

ISSN 2072-8964

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО - ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**4 (60) 2010**  
**ИЮЛЬ-АВГУСТ**

№ 4 (60) июль-август 2010

Издается с 2002 года. Выходит 6 раз в год

Учредитель – государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Орловский государственный технический университет»

### Редакционный совет

Голенков В.А., председатель  
Радченко С.Ю., заместитель председателя  
Борзенков М.И., секретарь

Астафичев П.А., Иванова Т.Н., Киричек А.В.,  
Колчунов В.И., Константинов И.С.,  
Новиков А.Н., Попова Л.В., Степанов Ю.С.

### Главный редактор

Константинов И.С.

### Редколлегия

Архипов О.П., Аверченков В.И.,  
Гайндрик К.Г., Еременко В.Т.,  
Иванов Б.Р., Иванников А.Д.,  
Ипатов О.С., Колоколов Ю.В.,  
Корндорф С.Ф., Коськин А.В.,  
Подмастерьев К.В., Поляков А.А.,  
Располов В.Я., Сотников В.В.,  
Шкатов П.Н.

### Адрес учредителя журнала

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
(4862) 42-00-24; www.ostu.ru;  
E-mail: admin@ostu.ru

### Адрес редакции

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 40  
(4862) 43-40-39; www.ostu.ru; E-mail: isit@ostu.ru

Зарег. в Федеральной службе по надзору в сфере  
связи и массовых коммуникаций.  
Св-во о регистрации средства массовой информации  
ПИ № ФС77-35333 от 17.02. 2009 г.

Сдано в набор 15.06.2010 г.

Подписано в печать 25.06.2010 г.

Формат 70x108 1/16.

Усл. печ. л. 9,5. Тираж 300 экз.

Заказ № 221/06 П1

Отпечатано с готового бригннал-макета на  
полиграфической базе СрепГТУ  
302030, г. Орел, ул. Московская, 65

### Рубрики номера

1. Математическое  
и программное обеспечение  
вычислительной техники  
и автоматизированных систем..... 5-21
2. Математическое и компьютерное  
моделирование..... 22-48
3. Информационные технологии  
в социально-экономических  
и организационно-технических  
системах..... 49-88
4. Автоматизация и управление  
технологическими процессами  
и производствами..... 89-118
5. Телекоммуникационные системы  
и компьютерные сети.....119-137
6. Информационная безопасность.....138-153

### Редакция

Г.А. Константинова  
А.И. Мотина  
А.А. Митин

До второго полугодия 2009 г.  
журнал выходил под названием  
«Известия ОрелГТУ».  
Серия «Информационные системы  
и технологии».

Подписной индекс 15998  
по объединенному каталогу  
«Пресса России»

Журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых  
научных журналов и изданий, определенных ВАК для  
публикации трудов на соискание ученых степеней  
кандидатов и докторов наук.

© ОрелГТУ, 2010



Scientific  
and technical journal

## Information Systems and Technologies

№ 4 (60) July-August 2010

The journal is published since 2002, leaves six times a year  
The founder – Orel State Technical University

### *Editorial council*

Golenkov V.A., president  
Radchenko S.Y., vice-president  
Borzenkov M.I., secretary

Astafichev P.A., Ivanova T.N., Kirichek A.V.,  
Kolchunov V.I., Konstantinov I.S.,  
Novikov A.N., Popova L.V., Ctepanov Y.S.

### *Editor-in-chief*

Konstantinov I.S.

### *Editorial committee*

Arhipov O.P., Averchenkov V.I.,  
Galndrik K.G., Eremenko V.T., Ivanov B.R.,  
Ivannikov A.D., Ipatov O.S., Kolokolov J.V.,  
Korndorf S.F., Koskin A.V., Podmasterlev K.V.,  
Polyakov A.A., Raspopov V.Ya.,  
Sotnikov V.V., Shkatov P.N.

### *The address of the founder of magazine*

302020, Orel, Highway Naugorskoye, 29  
(4862) 42-00-24; [www.ostu.ru](http://www.ostu.ru);  
E-mail: [admin@ostu.ru](mailto:admin@ostu.ru)

### *The address of the edition*

302020, Orel, Highway Naugorskoye, 40  
(4862) 43-40-39; [www.ostu.ru](http://www.ostu.ru);  
E-mail: [isit@ostu.ru](mailto:isit@ostu.ru)

Journal is registered in Federal Department  
for Mass Communication.

The certificate of registration  
ПИ № ФС77-35333 from 17.02.2009.

It is handed over in a set of 15.06.2010,  
25.06.2010 are sent for the press  
Format 70x108 1/16.

Press conditions L. 9,5. Circulation 300 copies  
The order № \_\_\_\_\_

It is printed from a ready dummy on polygraphic base  
of OrelSTU  
302030, Orel, street Moscow, 65

### In this number

1. Software of the computer facilities  
and the automated systems.....5-21
2. Mathematical  
and computer simulation.....22-48
3. An information technology in social  
and economic and organizational  
-technical systems..... 49-88
4. Automation and management  
of technological processes  
and manufactures..... 89-118
5. Telecommunication systems  
and computer networks..... 119-137
6. The informational safety ..... 138-153

### The edition

Konstantinova G.A.  
Motina A.I.  
Mitin A.A.

Before the second half of the year 2009  
the magazine was leave under the name  
«Izvestia Orel State Technical University.  
Information systems and technologies».

Index on the catalogue  
of the «Pressa Rossli» 15998

© OrelSTU, 2010

Journal is included into the list of the Higher Examination  
Board for publishing the results of theses for  
competition the academic degrees.

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

<i>Башкин В.А.</i> Верификация на основе моделей с одним неограниченным счетчиком .....	5
<i>Юраков А.Ю., Калачев А.В.</i> Система потоковой обработки информации в реальном времени .....	13

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

<i>Лебедева М.Ю.</i> Построение регрессионных моделей в условиях мультиколлинеарности .....	22
<i>Майдаков М.А.</i> Использование графических процессоров для параллельного вычисления дискретной интерполяции Сибсона без промежуточного построения диаграммы Вороного .....	27
<i>Пашковский А.В.</i> Комбинированный метод стандартных и конечных элементов в расчете магнитного поля и силовых характеристик асинхронного тягово-подъемного модуля .....	33
<i>Тарасова М.А.</i> Основные тенденции и динамика развития лабораторной базы инженерного образования .....	43

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ И ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

<i>Аверченков В.И., Казаков П.В.</i> Эволюционный алгоритм поиска решений задачи оптимизации инвестиционного планирования .....	49
<i>Карминская Т.Д.</i> Подходы к управлению системой подготовки кадров для региональных экономических систем .....	57
<i>Константинов И.С., Фролов А.И., Кравцова Н.А.</i> Модель хранения данных в адаптивной автоматизированной системе административного мониторинга .....	66
<i>Терентьев С.В., Бондарев В.А.</i> Использование информационно-аналитических ресурсов в оценке деятельности интегрированных образовательных комплексов .....	74
<i>Царегородцев А.Л.</i> Применение XML в автоматизированных медицинских информационных системах .....	83

### АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

<i>Аверченков А.В., Симуни А.Е., Терехов М.В., Шкаберин В.А.</i> Подготовка управляющих программ для станков с ЧПУ в интегрированной САПР Pro/ENGINEER с применением виртуальных моделей оборудования, режущего инструмента и станочных приспособлений .....	89
<i>Вовченко А.И., Ломазов В.А.</i> Автоматизация оценки и прогнозирования технического состояния железнодорожных колесных пар .....	95
<i>Дунаев А.В., Жеребцов Е.А., Егорова А.И.</i> Особенности использования канала лазерной доплеровской флоуметрии в аппарате лазерной терапии .....	100
<i>Конищев А.В.</i> Автоматизация процессов управления качеством производства радиоэлектронного предприятия .....	105
<i>Сотников В.В., Сибаров Д.А., Григорьев А.П., Комаров П.И., Демидов А.П.</i> Системы управления процессом изомеризации .....	112

### ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И КОМПЬЮТЕРНЫЕ СЕТИ

<i>Дорофеев Н.В., Кузичкин О.Р., Орехов А.А.</i> Первичная обработка сигналов в распределенных сетях регистрации геомагнитного поля .....	119
<i>Лазарев С.А., Демидов А.В.</i> Концепция построения системы управления информационным обменом сети корпоративных порталов .....	123
<i>Платунова С.М.</i> Модель корпоративной сети при настройке IP-доменов .....	130
<i>Фисун А.П., Фисенко В.Е.</i> Новые подходы к снижению вычислительной сложности оценки надежности элементов частично коммутируемых ИТКС .....	134

### ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

<i>Калмыков И.А., Барильская А.В., Кихтенко О.А.</i> Разработка математической модели системы криптографической защиты информации, функционирующей в полиномиальной системе классов вычетов .....	138
<i>Можин С.В.</i> Алгоритм автоматического определения циклов в исполняемом коде .....	146
<i>Соловьев Б.И., Просолупов С.А., Лукьянченков И.Ю., Подваленчук Д.И.</i> Определение зон безопасности в цифровой сети связи .....	150

## CONTENT

### SOFTWARE OF THE COMPUTER FACILITIES AND THE AUTOMATED SYSTEMS

<i>Bashkin V.A.</i> Verification based on the models with a single unbounded counter .....	5
<i>Yurakov A.Y., Kalachev A.V.</i> Computing system for real time signal processing.....	13

### MATHEMATICAL AND COMPUTER SIMULATION

<i>Lebedeva M.Yu.</i> Construction of model of regress in conditions multicollinearity.....	22
<i>Maidakov M.A.</i> Using GPU for parallel computation of discrete sibson interpolation without pre-computing of Voronoi diagram .....	27
<i>Pashkovsky A.V.</i> The combined method of standard and final elements in calculation of the magnetic field and power characteristics of the asynchronous traction-elevating module .....	33
<i>Tarasova M.A.</i> The basic tendencies and dynamics of development of laboratory base engineering education .....	43

### AN INFORMATION TECHNOLOGY IN SOCIAL AND ECONOMIC AND ORGANIZATIONAL-TECHNICAL SYSTEMS

<i>Averchenkov V.I., Kazakov P.V.</i> The evolutionary algorithm for a solving problem of the optimization investment planning .....	49
<i>Karminskaya T.D.</i> Approaches to management of system of a professional training for regional economic systems.....	57
<i>Konstantinov I.S., Frolov A.I., Kravtsova N.A.</i> The data storage model in the adaptive automated system of administrative monitoring .....	66
<i>Terentev S.V., Bondarev V.A.</i> Automation of formation of information and analysis resources in a higher education institution based on the integration of existing information systems.....	74
<i>Tsaregorodtsev A.L.</i> Using XML in automated medical information systems .....	83

### AUTOMATION AND MANAGEMENT OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND MANUFACTURES

<i>Averchenkov A.V., Simuni A.E., Terekhov M.V., Shkaberin V.A.</i> Preparation of operating programs for CNC integrated cad Pro / ENGINEER with virtual models of equipment, cutting tools and machine tool adaptations.....	89
<i>Vovchenko A.I., Lomazov V.A.</i> Computer-assisted estimation and prediction of railway wheels technical status .....	95
<i>Dunaev A.V., Zhrebtsov E.A., Egorova A.I.</i> Application of laser doppler flowmetry in the laser therapy apparatus .....	100
<i>Konischev A.V.</i> Automatization of quality control processes of manufacture of radio electronics company .....	105
<i>Sotnikov V.V., Sibarov D.A., Grigoriev A.P., Komarov P.I., Demidov A.P.</i> System of control for process of isomerization .....	112

### TELECOMMUNICATION SYSTEMS AND COMPUTER NETWORKS

<i>Dorofeev N.V., Kuzichkin O.R., Orekhov A.A.</i> Preprocessing of signals in the allocate networks of registration of the geomagnetic field .....	119
<i>Lazarev S.A., Demidov A.V.</i> The concept of construction of a control system of an information exchange in the network of corporative portals.....	123
<i>Platunova S.M.</i> Corporate network model for IP-domain installation .....	130
<i>Fisun A.P., Fisenko V.E.</i> New approaches to decrease in computing complexity of an estimation reliability of elements partially switched information-telecommunication systems .....	134

### THE INFORMATION SAFETY

<i>Kalmikov I.A., Baril'skaya A.V., Kihtenko O.A.</i> Development to mathematical system model kriptographic protection information, functioning in polynomial system of the classes deduction .....	138
<i>Mozhin S.V.</i> Automatic cycles definition algorithm.....	146
<i>Soloviev B.I., Prosolupov S.A., Lukyanchenkov I.U., Podvalenchuk D.I.</i> Allocating security zones of digital telecommunication network .....	150

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

УДК 004.021; 519.711

В.А. БАШКИН

ВЕРИФИКАЦИЯ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ  
С ОДНИМ НЕОГРАНИЧЕННЫМ СЧЕТЧИКОМ

Предлагается новый метод доказательства свойств систем, моделируемых при помощи односчетчиковых сетей Петри (параллельных и распределенных процессов, алгоритмов и протоколов). Подобные модели позволяют представлять системы как с конечными, так и с бесконечными множествами состояний. Проверяемые свойства предлагается записывать при помощи формул темпоральной логики EF (логики достижимости). Новизна метода состоит в использовании некоторых конструктивных теоретико-числовых свойств бесконечной части одномерных линейных и полулинейных множеств. Представлен алгоритм формальной верификации темпоральных формул логики EF, использующий декомпозицию формулы и вычисления над однопериодическими полулинейными базисами специального вида.

**Ключевые слова:** глобальная верификация моделей; темпоральная логика; односчетчиковые сети; полулинейность; достижимость.

*A new method is presented for verification of systems, modeled by one-counter Petri nets (parallel and distributed processes, algorithms and protocols). Petri net models allow to represent both finite- and infinite-state systems. It is proposed to formulate the checked property by EF-formula (where EF is a temporal logic of reachability). The novelty of our approach is based on the application of some specific constructive number-theoretic properties of an infinite part of one-dimensional linear and semilinear sets. We present an algorithm of EF temporal formulae verification, that uses formula decomposition and computations over specific single-periodic semilinear bases.*

**Keywords:** global model-checking; temporal logic; one-counter nets; semilinearity; reachability.

## ВВЕДЕНИЕ

При разработке достаточно сложных систем важной задачей является строгое доказательство их корректности, то есть соответствия системы формальному описанию её предполагаемых свойств. Такими свойствами могут быть: отсутствие тупиков, невозможность заикливания, справедливое распределение ресурса, правильная последовательность действий, отсутствие избыточных элементов и т.д. В случае параллельных и распределенных систем возникают дополнительные критические свойства, связанные с возможностью возникновения нескольких независимых потоков вычислений: максимальная и минимальная степени параллелизма, неизбежность синхронизации после распараллеливания и т.д.

Одним из классических способов формализованного анализа систем является верификация моделей (model checking) [5]. Метод состоит в том, что вначале строится математическая модель системы, адекватно отражающая важные аспекты её структуры (например, диаграмму переходов управляющего устройства), а также формулируется математическое утверждение, описывающее нужное свойство (например, отсутствие тупиков). Далее запускается какой-то алгоритм проверки, который выясняет истинность данного утверждения для данной модели.

Для описания проверяемых свойств обычно используют формулы, заданные посредством различных темпоральных логик. Например, свойства трасс достаточно хорошо описываются при помощи логики линейного времени (LTL – Linear Time Logic), свойства систем переходов – при помощи логики ветвящегося времени (CTL –

Computation Time Logic). В данной работе мы рассматриваем свойства графа достижимых состояний системы, формализованные при помощи логики EF (сужения CTL) [5].

В тех случаях, когда модель системы конечна (может быть описана конечным автоматом) и не очень велика, мы простым перебором можем проверить практически все её интересные свойства. Однако если реальная система содержит какие-то неограниченные составляющие (например, целочисленные переменные) или просто достаточно объемна, проверка становится невозможной или слишком трудоемкой. В частности, для моделей систем с двумя счетчиками и проверкой на ноль неразрешимы практически все важнейшие свойства – достижимость заданного состояния, отсутствие тупиков и т.д. (что следует из неразрешимости проблемы останова для универсальных моделей вычисления, к которым относятся и двухсчетчиковые машины Минского).

В связи с этим в настоящее время большое внимание уделяется поиску более узких классов бесконечных моделей со всё ещё достаточно обширными наборами разрешимых свойств, а также разработке новых символьных методов анализа этих свойств. Символьные методы подразумевают использование для задания бесконечных множеств (например, множеств состояний) какого-то конечного (символьного) представления. Так, в регулярной верификации используется представление бесконечных множеств при помощи регулярных выражений. Для представления бесконечных полулинейных множеств возможно использование формул арифметики Пресбургера [4].

Данная работа посвящена исследованию систем, содержащих один потенциально неограниченный ресурс, моделируемый целочисленным неотрицательным счетчиком. Такие системы эквивалентны сетям Петри не более чем с одной неограниченной позицией [2]. Примерами ресурсов могут служить «заявки» или «исполнители» в схемах потоков работ (workflow), «пакеты» или «задержки» в моделях сетевых протоколов, «финансы» в схемах бизнес-процессов и т.д. Проблема локальной верификации систем с одним ресурсом достаточно хорошо изучена ([5,7,9]). Нами рассматривается более общая проблема глобальной верификации, которая может быть сформулирована следующим образом: «При каких точных количествах ресурса (значениях счетчика) заданная система обладает заданным свойством?» Здесь в качестве «свойства» предполагается произвольная формула логики EF. Разработан алгоритм решения данной проблемы, основанный на представлении бесконечных наборов значений счетчика в виде однопериодических полулинейных базисов. Алгоритм состоит из двух этапов: вначале строится конечное символьное дерево достижимости системы, затем на его основе индуктивно по структуре логической формулы строится множество ресурсов, для которых данная формула выполняется.

Работа построена следующим образом. В разделе 2 даны синтаксис и семантика логики EF, показаны примеры свойств, записанных на этом языке. Сформулированы проблемы локальной и глобальной верификации (доказательства свойств). В разделе 3 приведен способ моделирования систем при помощи односчетчиковых сетей. Раздел 4 посвящен описанию новых результатов, касающихся конструктивных особенностей однопериодического представления полулинейных множеств натуральных чисел. В разделе 5 приводятся основанные на этих результатах алгоритм построения символьного дерева достижимости для односчетчиковой сети и алгоритм глобальной символьной верификации темпоральной формулы. В заключении приводятся возможные направления дальнейших работ в данной области.

## ФОРМАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ СВОЙСТВ

Пусть  $LTS = (S, s_0, \rightarrow, L)$  – система помеченных переходов, где  $S$  – множество состояний,  $s_0 \in S$  – начальное состояние,  $\rightarrow \subseteq S \times S$  – отношение переходов (множество дуг),  $L: (\rightarrow) \rightarrow \Sigma$  – помечающая функция (здесь и далее  $\Sigma$  – конечный алфавит меток срабатываний).

Переход  $t=(s,s')$  меняет состояние системы с  $s$  на  $s'$ . Таким образом, система помеченных переходов – это предельно абстрактная схема функционирования обладающей состояниями реальной системы. Она может быть и бесконечной, если бесконечно множество состояний  $S$ .

Темпоральная логика EF обладает следующим синтаксисом [5,6]:

$$\varphi ::= \text{true} \mid \neg\varphi \mid \varphi_1 \wedge \varphi_2 \mid E\langle a \rangle\varphi \mid EF\varphi$$

Отношение выполнимости  $\models$  для состояния  $s$  системы LTS, темпоральной формулы  $\varphi$  и метки  $a \in \Sigma$  определяется индуктивно:

$$s \models \text{true};$$

$$s \models \neg\varphi \Leftrightarrow \neg(s \models \varphi);$$

$$s \models \varphi_1 \wedge \varphi_2 \Leftrightarrow s \models \varphi_1 \wedge s \models \varphi_2;$$

$$s \models E\langle a \rangle\varphi \Leftrightarrow \exists s' \in S : (s,s') \in (\rightarrow) \wedge L(s,s')=a \wedge s' \models \varphi;$$

$$s \models EF\varphi \Leftrightarrow \text{для некоторого пути } (s_1, s_2, \dots), \text{ где } s=s_1, \exists i \geq 1 : s_i \models \varphi.$$

Стандартным образом через  $\wedge$  и  $\neg$  определяются остальные логические связи ( $\vee, \Rightarrow$  и др.). Для удобства записи формул обычно дополнительно определяют двойственные темпоральные операторы:  $A\langle a \rangle\varphi = \neg E\langle a \rangle\neg\varphi$ ,  $AG\varphi = \neg EF\neg\varphi$ .

Формула  $E\langle a \rangle\varphi$  означает «может сработать переход с меткой  $a$ , переводящий систему в какое-то новое состояние, в котором выполняется формула  $\varphi$ ». Двойственная к ней формула  $A\langle a \rangle\varphi$  означает «срабатывание любого перехода с меткой  $a$  переводит систему в состояние, в котором выполняется формула  $\varphi$ ». Таким образом, оператор  $E$  формализует понятие «существования», оператор  $A$  – понятие «неизбежности».

Формула  $EF\varphi$  означает «может сработать последовательность переходов, переводящая систему в какое-то новое состояние, в котором выполняется формула  $\varphi$ ». Двойственная к ней формула  $AG\varphi$  означает «срабатывание любой последовательности переходов переводит систему в состояние, в котором выполняется формула  $\varphi$ ».

Логика EF является расширением логики Хеннеси-Милнера и сужением логики ветвящегося времени CTL [5]. Она позволяет формализовать всевозможные свойства достижимости, например:

–  $AG EF A\langle a \rangle\text{true}$  – в системе всегда существует вероятность наступления события « $a$ » (точнее, из любого достижимого состояния достижимо состояние, при котором может выполниться только переход « $a$ »). Это свойство может служить признаком правильной завершаемости процесса (если « $a$ » — действие, возможное только в финальном состоянии).

–  $EF AG E\langle a \rangle\text{true}$  – система может сработать таким образом, что в ней возникнет единственный постоянно активный переход « $a$ ». Например, этот переход может сигнализировать о возникновении переполнения памяти.

–  $AG (E\langle a \rangle\text{true} \Rightarrow E\langle b \rangle\text{true})$  – событие « $b$ » возможно только в таких состояниях системы, в которых возможно событие « $a$ ». Например, подтверждение транзакции возможно только тогда, когда возможен и её откат.

–  $A\langle a \rangle EF E\langle b \rangle\text{true}$  – если возможно « $a$ », то после его выполнения остается хотя бы одна возможность когда-то в будущем выполнить « $b$ ». Например, в качестве « $a$ » может выступать событие принятия рискованного решения, в качестве « $b$ »

- событие получения крупных дивидендов (другими словами, «риск не является бессмысленным»).
- $AG A\langle a \rangle AG EF\langle b \rangle true$  – если возможно « $a$ », то после его выполнения рано или поздно неизбежно наступает « $b$ ». Например, это может соответствовать правильности написания параллельной программы (если « $a$ » – событие распараллеливания, « $b$ » – событие синхронизации, то есть соединения распараллеленных ветвей вычисления).
- $AG ((EF E\langle a \rangle true) \vee (E\langle b \rangle true))$  – всегда возможно либо возникновение в будущем « $a$ », либо прямо сейчас – « $b$ ». Например, « $a$ » – это правильное завершение процесса, « $b$ » – предусмотренный аварийный выход.

Таким образом, темпоральная логика EF очень удобна в качестве языка описания интересующих нас свойств систем. Разумеется, она не является универсальной (в частности, не позволяет формализовать существование бесконечной последовательности срабатываний одного и того же перехода), однако для большинства задач проверки свойств достижимости достаточно выразительна.

*Задача (локальной) верификации* состоит в определении того, выполняется ли данная формула темпоральной логики в данном состоянии системы.

*Задача глобальной верификации* состоит в построении конечного эффективного представления множества всех состояний системы, в которых выполняется данная формула темпоральной логики.

Для конечных систем задача глобальной верификации сводится к конечному набору задач локальной верификации, каждая из которых может быть решена перебором. В общем случае систем с бесконечным числом состояний даже задача локальной верификации становится неразрешимой. Следовательно, разумно, рассматривать какие-то промежуточные классы систем, например, системы с одним видом неограниченного ресурса.

### ФОРМАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ С ОДНИМ РЕСУРСОМ

Пусть  $\mathbf{Nat}$  – множество неотрицательных целых чисел.

*Односчетчиковую сеть* [7] называется набор  $N = (Q, T, L)$ , где

- $Q$  – конечное множество управляющих состояний,
- $T \subset Q \times Q \times \mathbf{Z}$  – конечное множество переходов,
- $L: T \rightarrow \Sigma$  – помечающая функция.

*Состояние* сети описывается парой  $(q, c)$ , где  $q \in Q$  – текущее управляющее состояние,  $c \in \mathbf{Nat}$  – текущее значение счетчика.

Переход  $t = (q, q', z)$  *активен* в состоянии  $(q, c)$ , если  $c + z > 0$ .

Активный переход может *сработать*, переводя сеть в состояние  $(q', c + z)$  (обозначается  $(q, c) \xrightarrow{t} (q', c + z)$ ). Изменение счетчика  $z$  также будем обозначать  $\delta(t)$ .

Внешний наблюдатель в момент срабатывания перехода  $t$  видит только его метку  $L(t)$  (то есть он не может различить срабатывания переходов с одинаковой меткой).

Для конечной последовательности переходов  $U = t_1.t_2...t_{n-1}.t_n$  определим пред- и постусловие (далее  $\dot{\phantom{x}}$  обозначает усеченное вычитание до нуля):

$$\begin{aligned} \dot{U} &= \dot{(t_2...t_{n-1}.t_n)} + |\delta(t_1)| \text{ при } \delta(t_1) < 0 \text{ и } \dot{U} = \dot{(t_2...t_{n-1}.t_n)} - \delta(t_1) \text{ при } \delta(t_1) \geq 0; \\ U^* &= (t_1.t_2...t_{n-1})^* \dot{+} |\delta(t_n)| \text{ при } \delta(t_n) < 0 \text{ и } U^* = (t_1.t_2...t_{n-1})^* + \delta(t_n) \text{ при } \delta(t_n) \geq 0. \end{aligned}$$

Односчетчиковые сети эквивалентны сетям Петри с не более чем одной неограниченной позицией [2]. Таким образом, эта модель адекватно формализует как последовательные, так и параллельные системы с неограниченным ресурсом. Процесс моделирования состоит в построении схемы конечной части реальной системы, то есть

множества управляющих состояний и переходов между ними, а затем – сопоставлении переходам операций над ресурсом (потребления и производства ресурса, то есть уменьшения и увеличения счетчика).

Счетчик может принимать бесконечное множество значений, поэтому граф достижимости односчетчиковой сети с заданным начальным состоянием представляет собой бесконечную (в общем случае) систему помеченных переходов. Переборные алгоритмы анализа здесь неприменимы, следовательно, требуются символьные методы вычислений.

Задача локальной верификации для счетчиковых сетей (и для более общего случая счетчиковых машин) достаточно хорошо изучена ([5,7,9]). В частности, известно, что для сетей с произвольным числом счетчиков задача верификации формул логики EF неразрешима [5]. Также известно [7], что для односчетчиковых сетей эта задача разрешима, хотя и является  $P^{NP}$ -полной.

Для положительного решения более широкой задачи глобальной символьной верификации требуется наличие конечного символьного представления для множества выполнимости произвольной формулы. Известно, что одно- и двухсчетчиковые сети обладают полулинейным множеством достижимости [8], так что в качестве такого представления естественно использовать периодичность значений счетчика.

### ВЫЧИСЛЕНИЯ НАД БЕСКОНЕЧНЫМИ МНОЖЕСТВАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОДНОПЕРИОДИЧЕСКИХ ПОЛУЛИНЕЙНЫХ БАЗИСОВ

Для множества  $k$ -мерных векторов  $M \subseteq \text{Nat}^k$  и вектора  $m \in \text{Nat}^k$  определим операции «сдвига вправо» и «сдвига влево»:  $M \gg m =_{\text{def}} \{m' + m \mid m' \in M\}$ ,  $M \ll m =_{\text{def}} \{m' - m \mid m' \in M \wedge m \geq m'\}$ .

Множество  $m \subseteq \text{Nat}^k$  называется *линейным*, если оно представимо в виде

$$m = \{v + n_1 w_1 + \dots + n_l w_l \mid n_1, \dots, n_l \in \text{Nat}\}, \text{ где } v, w_1, \dots, w_l \in \text{Nat}^k \text{ — фиксированы.}$$

Вектор  $v$  обычно называют базовым вектором линейного множества, вектора  $w_1, \dots, w_l$  – периодами.

Множество  $m \subseteq \text{Nat}^k$  называется *полулинейным*, если оно является объединением конечного числа линейных множеств.

Если  $M, M' \subseteq \text{Nat}^k$  – полулинейные множества, то  $\text{Nat}^k \setminus M$  и  $M \cap M'$  тоже являются полулинейными [6]. Операции сдвига также сохраняют полулинейность. Известно, что полулинейные множества – это в точности те множества, которые описываются арифметикой Пресбургера.

Пусть  $x, y \in \text{Nat}$ . Через  $\text{НОД}(x, y)$  и  $\text{НОК}(x, y)$  обозначим наибольший общий делитель и наименьшее общее кратное чисел  $x$  и  $y$ . В одномерном случае из линейности множества следует его однопериодичность:

**Лемма 1. [3]** Пусть  $m \subseteq \text{Nat}$  — линейное множество, такое что  $m = \{v + n_1 w_1 + n_2 w_2 \mid n_1, n_2 \in \text{Nat}\}$ , где  $v, w_1, w_2 \in \text{Nat}$  фиксированы. Тогда, обозначив  $p = \text{НОД}(w_1, w_2)$  и  $b = v + p(w_1/p - 1)(w_2/p - 1)$ , имеем:

$$m = m_0 \cup m_\infty, \text{ где } m_0 \subseteq \{b - kp \mid k \in \{1, 2, \dots, (w_1/p - 1)(w_2/p - 1)\}\}, m_\infty = \{b + kp \mid k \in \text{Nat}\}.$$

В доказательстве леммы используется теорема теории чисел ([1], задача 3.22) о том, что для любых натуральных  $a, b$  и  $c$ , таких что  $a$  и  $b$  взаимно простые, а  $c \geq (a-1)(b-1)$ , уравнение  $ax + by = c$  имеет натуральное решение.

Свойство единственности периода бесконечной части переносится и на произвольное полулинейное множество:

**Теорема 1. [3]** Любое полулинейное множество  $m \subseteq \text{Nat}$  может быть представлено как объединение конечного множества и конечного набора линейных однопериодических множеств с одинаковым периодом: для некоторых  $p, b \in \text{Nat}$  существует *характеристическое множество*  $\Psi \subseteq \{b, b+1, b+2, \dots, b+(p-1)\}$ , такое что

$$m = m_0 \cup m_\infty, \text{ где } m_0 \subseteq \bigcup_{k=1}^{\lfloor b/p \rfloor} (\Psi \ll kp), m_\infty = \bigcup_{k=0}^{\infty} (\Psi \gg kp).$$

Рассмотрим двоичный вектор  $v$  длины  $p$ , такой что  $v[i]=0$  для  $b+i \notin \Psi$  и  $v[i]=1$  для  $b+i \in \Psi$ . Теорема утверждает, что этот вектор является «битовой маской» для периодического «закрашивания» натурального ряда справа от числа  $b$ . Таким образом, мы можем использовать в качестве конечного символического представления произвольного полулинейного одномерного множества  $m$  его *однопериодический базис*  $(m_0, b, p, v)$ , состоящий из

- конечного базового множества  $m_0$ ,
- базового элемента  $b$ ,
- длины периода  $p$ ,
- вектора периода  $v$ .

Данное представление проще формул арифметики Пресбургера, однако может быть использовано только в одномерном случае.

Базис  $Z = (m_0, b, p, v)$  полулинейного множества  $m \subseteq \text{Nat}$  называется *минимальным*, если для любого базиса  $Z' = (m_0', b', p', v')$  множества  $m$  выполняется  $p < p'$  или  $(p = p'$  и  $b \leq b')$ .

Известно [3], что минимальный базис существует и единственен; произвольный базис может быть преобразован в минимальный за полиномиальное время (обозначим соответствующий алгоритм как  $\text{Mmz}$ ).

Минимальный базис множества  $m$  обозначим как  $\text{Base}(m)$ ; множество, определяемое базисом  $Z$ , обозначим как  $\text{Set}(Z)$ .

Для двоичных векторов  $v, v' \in \{0, 1\}^p$  через  $\text{NOT}(v)$ ,  $\text{AND}(v, v')$  и  $\text{OR}(v, v')$  обозначим покомпонентное отрицание, умножение и сложение соответственно:

$$\text{NOT}(v)[i] =_{\text{def}} (1 - v[i]), \text{AND}(v, v')[i] =_{\text{def}} \min\{v[i], v'[i]\}, \text{OR}(v, v')[i] =_{\text{def}} \max\{v[i], v'[i]\}.$$

Через  $v^k$  обозначим конкатенацию  $k$  векторов  $v$ .

Теоретико-множественные операции и отношения могут вычисляться непосредственно над однопериодическими базисами:

**Теорема 2. [3]** Пусть  $m, m' \subseteq \text{Nat}$  — полулинейные множества,  $\text{Base}(m) = (m_0, b, p, v)$ ,  $\text{Base}(m') = (m_0', b', p', v')$ ,  $y \in \text{Nat}$ . Обозначим  $K = \max\{b, b'\}$  и  $L = \text{НОК}(p, p')$ . Пусть  $K = b + ip = b' + jp'$  для некоторых  $i, j \in \text{Nat}$ . Тогда:

1.  $\text{Base}(\text{Nat}) = (\emptyset, 0, 1, (1))$ ;
2.  $\text{Base}(m \cup m') = \text{Mmz}(\{x \in m \cup m' \mid x < K\}, K, L, \text{OR}(v^{L/p}, (v')^{L/p'}))$ ;
3.  $\text{Base}(m \cap m') = \text{Mmz}(\{x \in m \cap m' \mid x < K\}, K, L, \text{AND}(v^{L/p}, (v')^{L/p'}))$ ;
4.  $\text{Base}(m \setminus m') = \text{Mmz}(\{x \in m \setminus m' \mid x < K\}, K, L, \text{AND}(v^{L/p}, \text{NOT}((v')^{L/p'})))$ ;
5.  $m \subseteq m' \Leftrightarrow \text{AND}(v^{L/p}, (v')^{L/p'}) = v^{L/p} \wedge \forall x \in m (x < K \Rightarrow x \in m')$ ;

$$6. \text{Base}(m \gg y) = \text{Mmz}(\{x + y \mid x \in m_0\}, b + y, p, v);$$

$$7. \text{Base}(m \ll y) = \text{Mmz}(\{x - y \mid x \in m, x < B, x \geq y\}, B, p, v), \text{ где } B = \min_{\{k \in \text{Nat}\}} \{b + kp - y \mid b + kp - y \geq 0\}.$$

Все приведенные операции эффективны, то есть выполняются за полиномиальное время относительно размеров входных базисов. Ограничение  $K = b + ip = b' + jp'$  носит технический характер — оно позволяет записать формулы в более краткой форме.

**Теорема 3. [3]** Пусть  $m \subseteq \text{Nat}$  — полулинейное множество, представленное в однопериодическом виде,  $x, y \in \text{Nat}$ . Пусть  $\{A^{(i)}\}$  — последовательность полулинейных множеств такая, что  $A^{(0)} = m$ ,  $A^{(i+1)} = (A^{(i)} \ll x) \gg y$ . Тогда

найдется  $j \leq \max\{\lceil b/(|x-y|) \rceil, \text{НОК}(p, |x-y|)\} + 1$  такое, что  $\bigcup_{i=1}^{\infty} A^{(i)} = \bigcup_{i=1}^j A^{(i)}$ .  $\square$

Эта теорема показывает важное свойство одномерных полулинейных множеств: конечно определенная аддитивная последовательность всегда стабилизируется за конечное число шагов. Свойство стабилизации приводится уже в [8], но только для прибавления ресурса (сдвига вправо) и без оценки достаточного числа шагов.

### ФОРМАЛЬНОЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВО СВОЙСТВ СИСТЕМ

Использование операций над базисами и представления в однопериодическом виде позволяет строить полное символьное дерево достижимости односчетчиковой сети. Узлами этого дерева являются пары вида  $(q|Z)$ , где  $q$  — управляющее состояние,  $Z$  — базис полулинейного множества возможных значений счетчика.

#### Алгоритм 1. (символьное дерево достижимости)

1. Корень:  $(q_0 | \text{Base}(c_0))$ , пометим узел как «новый».

2. Пока есть «новые» узлы, для такого узла  $(q|Z)$  выполним:

2.1. Если  $\forall t = (q, q', z) \in T$  выполняется  $z < 0$  и  $(\text{Set}(m) \ll |z|) = \emptyset$ , пометим узел как «тупик».

2.2. Если  $(q | \text{Set}(Z)) \subseteq (q | \text{Reach}(q))$ , где  $\text{Reach}(q)$  — объединение всех уже вычисленных значений счетчика для  $q$ , то пометим узел как «старый».

2.3. Если на пути от корня найдется  $(q|Z')$  с  $\text{Set}(Z') \subset \text{Set}(Z)$ , то срабатывание последовательности  $(q|Z') \xrightarrow{U} (q|Z)$  — цикл, увеличивающий счетчик. Заменим  $(q|Z)$  на  $(q|Z^{\infty})$ , где  $Z^{(0)} = Z$ ,  $Z^{(i+1)} = \text{Base}(\text{Set}(Z^{(i)}) \cup ((\text{Set}(Z^{(i)}) \ll *U) \gg *U))$ .

2.4. Иначе пометим  $(q|Z)$  как «старый» и для любого активного перехода  $t = (q, q', z)$  добавим «новый» узел  $(q'|Z')$ , где  $Z' = \text{Base}(\text{Set}(Z) \ll |z|)$  при  $z < 0$  и  $Z' = \text{Base}(\text{Set}(Z) \gg z)$  при  $z \geq 0$ .

Сходимость алгоритма основана на свойстве стабилизации (теорема 3), а также на том факте, что односчетчиковые сети являются плоскими системами [10], то есть системами, в которых отношение достижимости исчерпывается простыми (невложенными) циклами.

Используя символьное дерево достижимости, мы можем решать глобальную проблему верификации формул темпоральной логики EF.

Обозначим как  $\text{Res}(q, \varphi)$  множество значений счетчика, при которых формула  $\varphi$  выполняется в управляющем состоянии  $q$ . Значение  $\text{Res}(q, \varphi)$  может быть вычислено индуктивно по структуре формулы  $\varphi$ :

#### Алгоритм 2. (глобальная символьная верификация)

–  $\text{Res}(q, \text{true}) = \text{Nat}$

–  $\text{Res}(q, \neg \varphi) = \text{Nat} \setminus \text{Res}(q, \varphi)$

–  $\text{Res}(q, \varphi_1 \wedge \varphi_2) = \text{Res}(q, \varphi_1) \cap \text{Res}(q, \varphi_2)$

–  $\text{Res}(q, E\langle a \rangle \varphi) = \bigcup_{(q|Z) \xrightarrow{t} (q'|Z') : L(t)=a} ((\text{Res}(q', \varphi) \cap \text{Set}(Z')) \ll *t) \gg *t$

–  $\text{Res}(q, EF \varphi) = \bigcup_{(q|Z) \xrightarrow{U} (q'|Z')} (((\text{Res}(q', \varphi) \cap \text{Set}(Z')) \ll *U) \gg *U)$

В определении алгоритма запись « $(q|Z) \xrightarrow{t} (q'|Z')$ » означает «для всех  $Z, t, q', Z'$  таких, что в символьном дереве достижимости есть дуга  $t$ , соединяющая узлы  $(q|Z)$  и  $(q'|Z')$ »; запись « $(q|Z) \xrightarrow{U} (q'|Z')$ » означает «для всех  $Z, U, q', Z'$  таких, что в символьном дереве достижимости есть цепочка дуг  $U$ , соединяющая узлы  $(q|Z)$  и  $(q'|Z')$ ».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен новый метод глобальной верификации, основанный на символьных вычислениях при помощи однопериодических базисов. Такие базисы представляют собой достаточно удобный инструмент, обладающий набором интересных конструктивных свойств. В частности, они допускают полиномиальную нормализацию и эффективное вычисление всех основных теоретико-множественных операций. На наш взгляд, это делает однопериодические базисы перспективным средством формального описания и алгоритмического анализа для систем, работающих с полулинейными множествами натуральных чисел.

В настоящее время для односчетчиковых сетей также разработаны основанные на однопериодических базисах символьные методы глобальной проверки достижимости [3]. Возможными направлениями дальнейших исследований в данной области являются создание алгоритмов верификации для формул более выразительных темпоральных логик (например, логики UB [5]), а также изучение свойств более общих классов формальных моделей с одним счетчиком (например, односчетчиковых процессов [7]).

Предложенный в данной работе алгоритм верификации может использоваться в качестве модуля доказательства корректности в различных программных комплексах. В частности, в системах управления потоками работ (workflow) он может применяться в качестве инструмента проверки соответствия разрабатываемого процесса его спецификации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гашков С.Б., Чубариков В.Н. Арифметика. Алгоритмы. Сложность вычислений. – М.: Высшая школа, 2000. – 320 с.
2. Котов В.Е. Сети Петри. – М.: Наука, 1984. – 160 с.
3. Bashkin V.A. On the single-periodic representation of reachability in one-counter nets // Proc. of CS&P'2009. Warsaw.– 2009. – P.60-71.
4. Comon H., Y.Jurski Multiple counters automata, safety analysis and Presburger arithmetic // Proc. of CAV'98, LNCS 1427. – 1994. – P.268-279.
5. Esparza J. Decidability of model checking for infinite-state concurrent systems // Acta Informatica. – 1997. – V.34 (2). – P.85-107.
6. Ginsburg S., Spanier E.H. Semigroups, Presburger formulas and languages, // Pacific Journal of Mathematics. – 1966. – V.16. – P.285-296.
7. Goller S. On the Computational Complexity of Verifying One-Counter Processes / S.Goller, R.Mayr, A.W.To // Proc. of LICS'2009. – 2009. – P.235-244.
8. Hopcroft J.E., Pansiot J.-J. On the reachability problem for 5-dimensional vector addition systems // Theor. Comp. Sci. — 1979. — V.8(2). — P.135-159.
9. Jancar P. DP Lower bounds for equivalence-checking and model-checking of one-counter automata / P.Jancar, A.Kucera, F.Moller, Z.Sawa // Inf. Comput. – 2004. – V.188(1). – P.1-19.
10. Leroux J. On flatness for 2-dimensional vector addition systems with states / J.Leroux, G.Sutre // Proc. of CONCUR'04, LNCS 3170. – 2004. – P.402-416.

**Башкин Владимир Анатольевич**

Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, г. Ярославль

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической информатики

Тел.: 8(4852)79-77-67

E-mail: [bas@unijar.ac.ru](mailto:bas@unijar.ac.ru)

А.Ю. ЮРАКОВ, А.В. КАЛАЧЕВ

**СИСТЕМА ПОТОКОВОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ  
В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ**

*В данной статье приводится описание вычислительного модуля на базе многоядерного процессора S40C18 (SEAForth40), позволяющего строить масштабируемые вычислительные системы различной топологии. Основные области применения модуля – во встраиваемых высокопроизводительных системах реального времени. Описаны структура и технические характеристики модуля.*

**Ключевые слова:** многоядерный матричный процессор; энергоэффективность; встраиваемые системы; системы реального времени; SEAForth40; вычислительный модуль; реконфигурируемые системы.

*This article describe a multilevel modular system that provides the level of data collection, the level of pre-processing and management, tasks management level, the level of modeling and data storage. The core of the system are modules based on energy-efficient multi-core processors SEAForth40. Provided the dynamic change of system configuration and executable programs at all levels of the system. The key properties of the system are low power, compact size, the reaction time to external events and the order of ten nanoseconds.*

**Keywords:** scalable Array Architecture; power efficiency; embedded system; real time systems; SEAForth40; computing module; reconfigurable systems.

При разработке вычислительных систем основным практически всегда стоит вопрос выбора оптимального состава аппаратных средств и, прежде всего, микропроцессоров, обеспечивающих получение максимально возможной эффективности работы системы. Во всех рыночных сегментах наблюдается постоянная потребность в повышении степени интеграции, увеличении вычислительных возможностей, расширении коммуникационных возможностей и возможностей поддержки графики, в снижении энергопотребления и повышении удельной производительности вычислений. С помощью высокопроизводительных встроенных систем (НРЕС) можно решать сложные технические задачи по разработке различных систем сбора и обработки информации, где общие функции сводятся к перелаче множества сигналов в один центр для оценки и принятия решения.

Некоторые области применения НРЕС:

- аппаратная поддержка искусственных нейронных сетей;
- использование в автомобильных приложениях;
- обработка потоковых данных (звук/видео), математические преобразования;
- просчёт моделей процессов или объектов в реальном времени;
- управление внешними устройствами.

Под встроенными системами понимают такие системы специального назначения, где компьютер встроен в устройство, которым он управляет. В отличие от универсального компьютера, компьютер встроенный способен решать заранее предопределенные и запрограммированные задачи. Специализация предполагает адаптацию к условиям и оптимизацию размеров, стоимости и других показателей [3, 6].

Для решения перечисленных задач помимо специализированных сигнальных процессоров требуются еще и многоядерные многопоточные встроенные процессоры, параллельные многопроцессорные системы и программное обеспечение, поддерживающее grid-среды и кластеры. Задачи НРЕС-систем и традиционных высокопроизводительных вычислений (High Performance Computing). Коренное отличие заключается в следующем: основной компонент стратегии НРС состоит в

приспособлении алгоритмов к аппаратному обеспечению, а в НРЭС аппаратное обеспечение адаптируется к алгоритмам.

Основная проблема встроенных высокопроизводительных систем не в достижении высокого уровня производительности, а в необходимости выдерживать два важных требования – реальное время и низкое потребление электроэнергии [7, 10].

Цель работы – создание масштабируемой системы для встраиваемых приложений реального времени на основе современных многоядерных процессоров (с количеством ядер более 8-ми). Основные критерии при выборе технических решений и элементной базы – производительность, масштабируемость, низкое энергопотребление и малые габариты. Также одним из ключевых моментов является способность системы подстраиваться под решаемую задачу. Предполагается дальнейшая интеграция с одной из сред визуального программирования, а также создание или адаптация языка программирования системы.

Классы задач, на которые ориентирован комплекс, – обработка тепловизионных изображений (включая видимый свет и ближние ИК), обработка сигналов при активном и пассивном радиоволновом зондировании, дикторонезависимое распознавание речи, управление сложными антенными системами (ФАР, ЦАР) и задачи программно-управляемого радио.

На основе предварительных исследований архитектур и способов построения высокопроизводительных встроенных и реконфигурируемых систем [1, 2, 5] при разработке системы применен многоуровневый подход совместно с независимыми модулями в пределах каждого уровня. Были выделены три уровня – уровень сбора данных, уровень предварительной обработки данных и оперативного управления, уровень управления задачами, уровень моделирования и хранения данных.

Уровень сбора данных организован сенсорами и сенсорными узлами, например, входящими в состав сенсорной сети. Данные с сенсорного уровня агрегируются на уровне предварительной обработки данных, в задачи которого входит обработка данных, принятие решений по управлению устройствами. Таким образом, устройства, реализующие данный уровень, должны иметь значительную вычислительную мощность, малое время реакции на изменения обстановки, иметь возможность быстрой смены алгоритмов.

В качестве основы для реализации уровня предварительной обработки и управления был выбран низкопотребляющий многоядерный процессор SEAForth40. По сравнению с обычными микроконтроллерами и микропроцессорами, процессор SEAForth40 выигрывает по показателям энергоэффективности в активном режиме и пиковой производительности как по отдельным ядрам, так и по суммарной. Также большим преимуществом перед остальными процессорами является очень малое время реакции на событие, высокая скорость выдачи данных на внешние выходы – до 90 МГц. Наиболее близки по этим показателям процессорные ядра AVR32 и ARM Cortex-M3. SEAForth40 проигрывает в операциях типа умножение, умножение с накоплением, деление, поскольку они в нем реализованы программными средствами [12]. Также может несколько снизить производительность ограниченный набор команд и необходимость динамической замены кода во время работы приложений. К недостаткам также можно отнести малый размер памяти, небольшой набор периферийных устройств, необходимость подключения внешней памяти для хранения пользовательских программ. Все это сказывается на подходе к программированию процессора SEAForth, который существенно отличается от традиционного для процессоров общего назначения и микроконтроллеров.

Процессор SEAForth 40C18 является одним из процессоров семейства масштабируемых матричных процессоров фирмы InteliaSys. Данный процессор предназначен для использования во встраиваемых, беспроводных и портативных системах и построен на базе платформы Scalable Embedded Array (SEA).

Процессор содержит 40 ядер, объединенных в решетку 4x10. Каждый из вычислителей имеет встроенный механизм межпроцессорных коммуникаций для обеспечения высокой вычислительной мощности как в показателях миллион операций в секунду/цена, так и миллион операций в секунду/мощность. В процессорах применен ряд технологий, позволяющих добиться значительной экономии энергии. Например, ядро, первым подошедшее к точке передачи данных, автоматически переходит в спящий (пассивный) режим до тех пор, пока взаимодействующее с ним ядро не подойдет к этой же точке. При этом время выхода из пассивного режима составляет примерно 10 нс. В спящем режиме ядро рассеивает порядка 1 мкВт, плюс обеспечивается прозрачная для прикладного программиста синхронизация процессов, выполняющихся на различных ядрах. Как правило, во время работы приложения одновременно активны 8-16 ядер. Основные характеристики процессора представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики процессора S40C18

Количество ядер, шт.	40
Производительность ядра/общая, MIPS	700, суммарная – 26TIPS
Линии ввода-вывода (GPIO)	5
АЦП количество/разрядность, биты	3/18 (характеристика нелинейная)
ЦАП количество /разрядность, биты	3/9, токовый выход, номинальная нагрузка 75 Ом
Последовательные порты	SPI, 3 синхронных порта, 2 асинхронных последовательных порта, 2 – SERDES
Параллельные порты/ разрядность	2/18 бит двунаправленные
Напряжение питания	1,8В

Благодаря наличию нескольких периферийных ядер, процессор может одновременно обслуживать несколько источников событий с минимальной задержкой, что идеально для систем, работающих в режиме жесткого реального времени. Поскольку ядра асинхронные, исполнение программы происходит с максимально возможной скоростью. Процессор не нуждается в режимах пониженной частоты, характерных для обычных микроконтроллеров с целью уменьшения энергопотребления.

Вычислительный модуль целесообразно разделить на три базовых блока. Структурная схема вычислительного модуля представлена на рисунке 1.

Функциями уровня управления задачами являются – распределение работ, оперативная смена алгоритмов обработки данных, передача необходимых данных на хранение или на уточнение моделей. Для этого уровня также актуальны вопросы динамической смены алгоритмов, также устройства данного уровня должны обладать несколькими стандартными интерфейсами для связи как с персональными ЭВМ, так и с устройствами уровня обработки данных и с сенсорными узлами (при необходимости). На роль управляющих элементов для данного уровня вполне подходят контроллеры на базе ARM-ядер, поскольку обладают достаточным быстродействием, относительно низким энергопотреблением, развитой периферией. Кроме этого ARM-ядра имеют развитую поддержку в виде программных инструментов разработки [13].

Предполагается также, что отдельные уровни системы могут работать отдельно друг от друга.

Система (рисунок 1) состоит из управляющего модуля на базе ARM7 процессора, подключенного к персональному компьютеру (возможно входящего в состав вычислительной сети), и одного или нескольких вычислительных модулей, содержащих 40-ядерный процессор SEAForth40. Вычислительный модуль занимается сбором и предварительной обработкой информации с сенсорных модулей или с непосредственно подключенных к нему датчиков или производит обработку потоков информации (аналоговой или цифровой) в реальном времени.

Вычислительный модуль целесообразно разделить на два блока – основной блок и блок памяти. Структурная схема основного блока представлена на рисунке 2

Основной блок (MainBoard), содержит:

- процессор;
- аналоговые и цифровые линии ввода/вывода;
- параллельные и последовательные порты ввода/вывода;
- Flash-память или энергонезависимую RAM с интерфейсом SPI;
- разъемы для соединения между собой и подключения второго базового модуля.

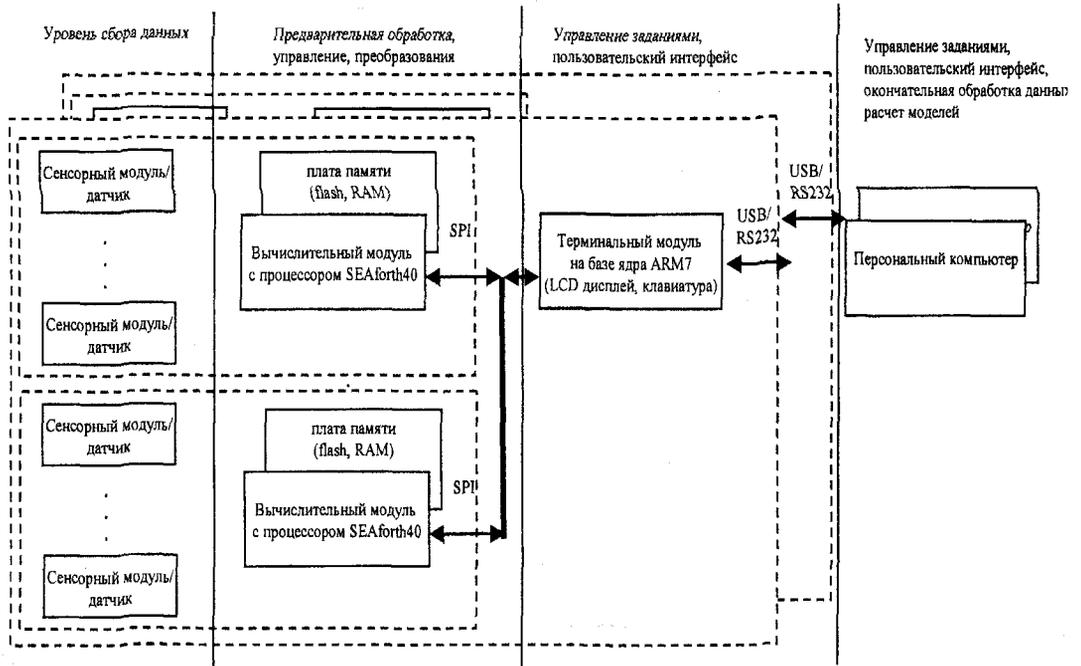


Рисунок 1 - Структура системы

Основная плата вычислительного модуля содержит: сам процессор, SPI-память, разъемы для интерфейсов RS-232 и SERDES, аналоговые и цифровые порты ввода/вывода, разъемы для подключения плат памяти и плат, содержащих дополнительные интерфейсы.

На процессоре SPI-порты реализуются четырьмя линиями ввода/вывода. Код в ПЗУ предусматривает загрузку пользовательского кода из внешней последовательной Flash-памяти. В процессе загрузки SPI работает на скорости 150 Кбит/с, позволяя использовать относительно дешевые устройства памяти. По окончании загрузки интерфейс может работать со скоростью порядка 20 Мбит/с.

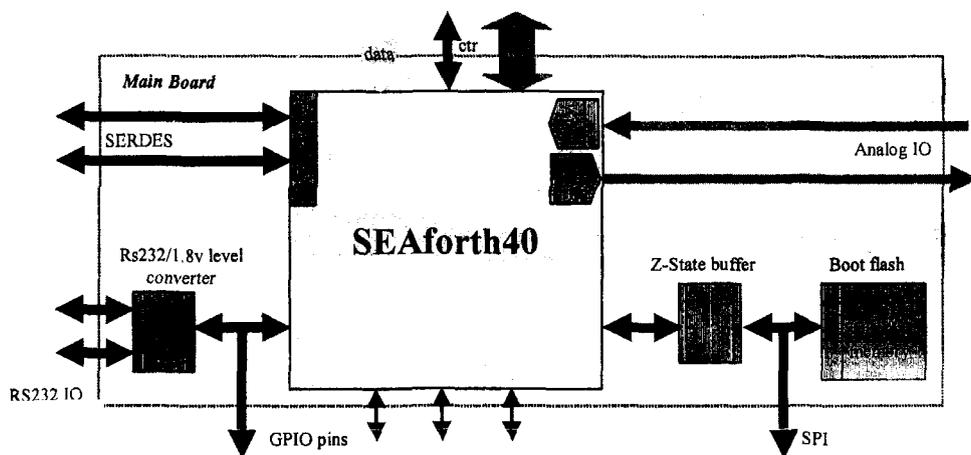


Рисунок 2 – Структура основного блока вычислительного модуля

С помощью буфера с тремя состояниями реализована функция записи пользовательского кода в SPI-память исполнимого кода через внешний разъем. При необходимости записи в память, буфер переводится в z-состояние, отключая выводы процессора от микросхемы памяти.

Для реализации интерфейса RS232 используется преобразователь уровней (микросхема приемопередатчика MAX3218). Напряжение питания данной микросхемы составляет 1,8В, что полностью согласуется с напряжением питания процессора, а выходное напряжение удовлетворяет напряжению стандарта RS-232. Это позволяет подключать микросхему непосредственно к процессору без использования каких-либо стабилизаторов напряжения. Скорость данного интерфейса составляет около 120 Кбит/с.

Предусмотрена возможность отключения интерфейса RS-232 и использования соответствующих выводов процессора как линий ввода/вывода общего назначения.

Процессор S40C18 имеет три АЦП, что позволяет реализовать три аналоговых порта ввода и три порта вывода. Аналоговые порты выводов работают в токовом режиме, а при подключении нагрузочных резисторов получается выход по напряжению. Шины Data, Addr, Ctr могут быть использованы как для подключения платы памяти, так и для организации связи с другими основными блоками. Главной особенностью является то, что разъемы на основной плате и на плате памяти располагаются одинаково, т.к. для подключения платы памяти к основной используется мезонинная технология.

Выводы SERDES используются в основном при соединении процессорных модулей при наращивании количества процессоров в системе. Скорость через SERDES составляет около 400Мбит/с. Свободные линии используются как линии ввода/вывода общего назначения или для подключения интерфейсной платы.

Второй блок – (MemoryBoard), содержит NAND-Flash память и быстродействующую статическую оперативную память (SRAM) (Рисунок 2). Шина Ctr используется для переключения между flash памятью и оперативной памятью, и для управления процессами чтения/записи оперативной памяти. Для доступа к оперативной памяти также задействуются шины Data и Addr. Работа с flash-памятью идет только при помощи шин Data и Ctr, при этом по шине Data передаются и управляющие команды, которые фиксируются в регистре-защелке, и записываемые/считываемые данные.

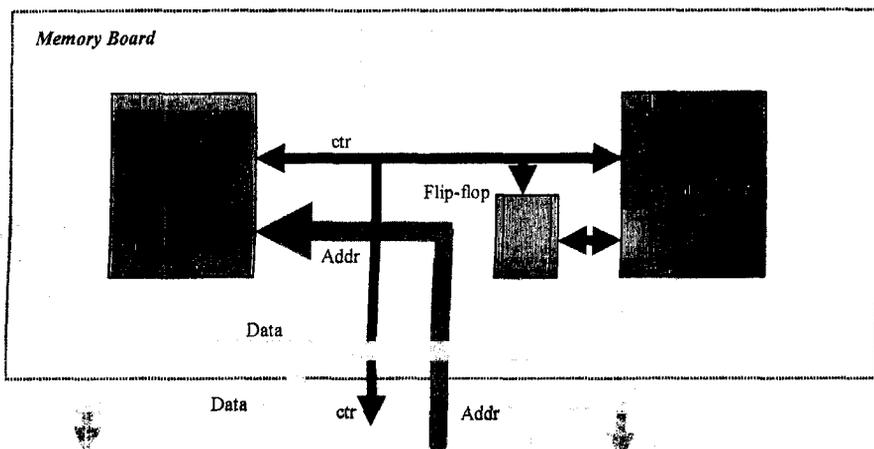


Рисунок 3 - Структура блока памяти

Внешний вид вычислительного модуля представлен на рисунке 4.



Рисунок 4 – Внешний вид вычислительного модуля на базе процессора SEAForth40 с платой памяти

В таблице 2 представлены основные технические характеристики вычислительного модуля на базе процессора SEAForth 40C18, в базовом комплекте (основная плата, плата памяти, интерфейсный модуль).

Таблица 2 - Основные технические характеристики вычислительного модуля

Процессор	SEAForth 40C18 700МГц
Память	SPI – 1 Мбайт
	SRAM – 256 Кбайт
	Flash – 512 Мбайт
Интерфейсы	RS-232 / UART – до 20 Мб/с SERDES – до 400 Мб/с
Аналоговые порты ввода/вывода	3 / 3
Цифровые порты ввода/вывода	6 / 5
Напряжение питания, В	1,8
Энергопотребление (при пиковой нагрузке), Вт	<0,75
Рабочая температура, °С	от -40 до +85

Терминальный модуль построен на контроллере LPC2148[14]. Плата также содержит микросхему преобразователь уровней ST232 позволяющую подключаться к COM порту персонального компьютера, содержит 40 настраиваемых линий ввода-

вывода, 24 из которых совмещают несколько функций, таких как последовательные интерфейсы SPI, I2C, UART, аналоговые входы порта 0 микроконтроллера, остальные 16 – программируемые линии порта 1.

В качестве управляющей программы модуля используется форт-система для ARM процессоров – MPE PowerForth system [15]. Управляющий модуль предназначен для программирования загрузочной SPI-памяти, запуска или останова вычислительных модулей, для хранения и распространения исполнимого кода вычислительных модулей путем загрузки его через SPI интерфейс или асинхронные линии. Система интегрируется со средой разработки VentureForth [16].

Вид системы обработки сигналов в реальном времени в составе терминального и вычислительного модулей представлен на рисунке 5.



Рисунок 5 – Вид системы обработки сигналов в реальном времени – терминальный и вычислительные модули

Отдельные вычислительные модули могут быть объединены в структуры как линейной, так и плоской или трехмерной топологии при помощи интерфейсов SERDES или шин Addr, Data и Ctr. SERDES обеспечивает скорость обмена данными порядка 20Мслов/с (400Мб/с) в одном направлении, шины адреса и данных порядка 90Мслов/с.

Примеры простых линейных структур на основе вычислительного модуля приведены ниже. Это соединение их в линейку (рисунок 6) или в кольцо (рисунок 7) при помощи интерфейсов SERDES. Свободные параллельные шины позволяют к каждому основному блоку подключать свой блок памяти. Направление передачи данных может быть произвольным (определяется выполняемой программой).

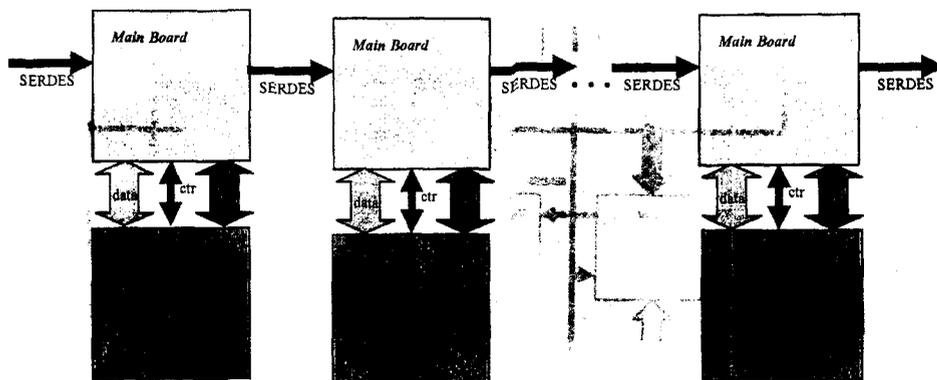


Рисунок 6 – Линейка основных блоков с памятью, связанных интерфейсами SERDES

При помощи комбинации интерфейсов передачи и схем объединения возможна организация двумерных структур.

В том случае, если для передачи данных задействовать и последовательные и параллельные интерфейсы, возможно создание структур типа решетка или тор (рисунок 8). Правда, в этом случае возможности по подключению блока памяти могут быть ограничены периферийными ядрами системы. На основе представленных возможны и другие схемы объединения блоков и вычислительных модулей.

К любому из основных блоков в представленных структурах возможно подключение интерфейсного блока через SPI или RS232 интерфейсы для программирования flash-памяти блоков, запуска и управления заданиями, обмена данными с внешней системой (например, персональным компьютером или сетью).

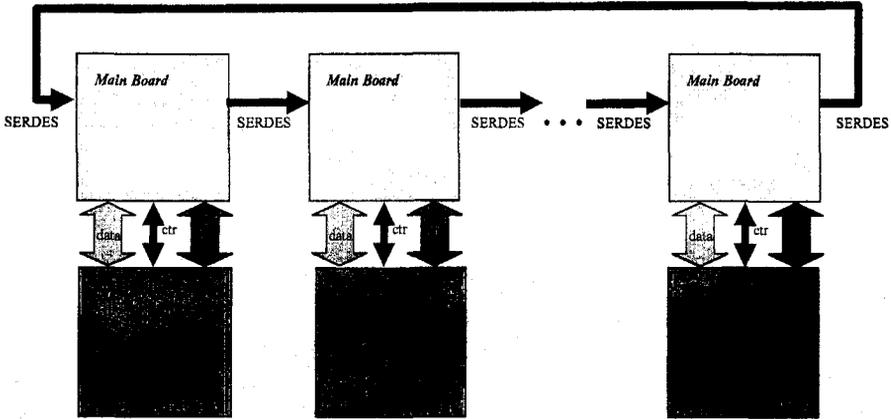


Рисунок 7 – Кольцо из основных блоков с локальной памятью, связанных по SERDES

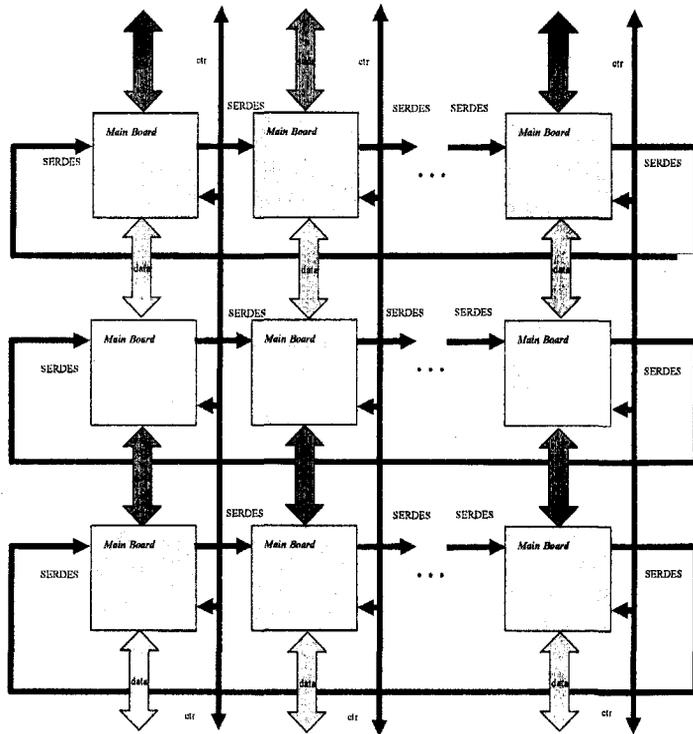


Рисунок 8 – Двумерная решетка из основных блоков

В результате вычислительная система имеет низкое энергопотребление при достаточной вычислительной мощности и объемах памяти, позволяет создавать

топологию связей близкую к специфике задачи с приемлемыми скоростями передачи данных, допускает динамическую замену исполняемого кода на любом из уровней. Обеспечивается динамическое обновление кода программ, управление заданиями.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А., Шмойлов В.И. Реконфигурируемые мультиконвейерные вычислительные структуры; под общ. ред. И.А. Каляева. – Ростов/Д: Издательство ЮНЦ РАН, 2008. – 320 с.
2. Косенков П.А., Терентьев А.О. Особенности проектирования современных встраиваемых вычислительных систем // «Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО», 2007. – №40. – С. 16-21.
3. Черняк Л. Высокопроизводительные встроенные компьютеры // «Открытые системы», 2006. – №7.
4. Информационные контрольно-диагностические системы. [Электронный ресурс] – URL: <http://electronic-auto.info/rb.html>, свободный. – Загл. с экрана – Яз. рус.
5. Палагин А.В., Опанасенко В.Н. Реконфигурируемые вычислительные системы: Основы и приложения. – К.: Просвита, 2006. – 280 с.
6. Сергей Кузнецов. Реконфигурируемый компьютинг // «Открытые системы», 2007. – №3.
7. Черняк Л. Архитектура фон Неймана, реконфигурируемые компьютерные системы и антимашина // «Открытые системы», 2008. – №6.
8. Пахомов С. Эра многоядерных энергоэффективных процессоров // «КомпьютерПресс», 2006. – №12.
9. Томас Хейзингер, Джозеф Сифакис. Дисциплина проектирования встроенных систем // «IEEE Computer Society», 2007. – №10.
10. Уэйн Вульф. Панорама встроенных систем // «IEEE Computer Society», 2007. – №10.
11. SEAForth 40C18 Device Data Sheet. [Электронный ресурс] – URL: [http://www.intellasy.net/templates/trial/content/S40C18\\_DataSheet.pdf](http://www.intellasy.net/templates/trial/content/S40C18_DataSheet.pdf), свободный. – Яз. англ.
12. Александр Калачев. Процессоры семейства SEAForth // «Компоненты и технологии», 2009. – №4. – С. 66-73.

**Калачев Александр Викторович**

Алтайский государственный университет, г. Барнаул  
Кандидат физико-математических наук, ст. преподаватель  
Тел.: 8-913-027-84-06  
E-mail: forther@yandex.ru

**Юраков Андрей Юрьевич**

Алтайский банк Сбербанка России, г. Барнаул  
Старший инженер-программист  
Тел.: 67-15-78, 399-287, 8-903-912-40-90  
E-mail: and-yurakov@mail.ru

УДК 658.012.011.56

М.Ю. ЛЕБЕДЕВА

## ПОСТРОЕНИЕ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ МУЛЬТИКОЛЛИНЕАРНОСТИ

*Регрессионные модели имеют широкое распространение при построении математических описаний различного рода систем. Основная проблема при моделировании многофакторных линейных по параметрам моделей – наличие мультиколлинеарности при оценивании параметров модели и неустойчивость оценок параметров, снижение прогнозирующей способности модели.*

*Ключевые слова: регрессионная модель; эффект мультиколлинеарности; центрирование переменных; стандартизация переменных; ридж-регрессия.*

*Regressive models have a wide circulation at construction of mathematical descriptions of a various sort of systems. The basic problem at modelling multifactorial linear models on parameters – presence multicollinearity at evaluation parameters of model and instability of estimations of parameters and decrease in predicting ability of model.*

*Keywords: regressive model; effect of multicollinearity; centring of variables; standardization of variables.*

О наличии мультиколлинеарности судят по матрице парных коэффициентов корреляции между факторами модели. Если коэффициенты парной корреляции превышают величину 0,8, то считается, что модель приходится строить в условиях мультиколлинеарности.

При построении модели в условиях мультиколлинеарности возникают осложнения при вычислениях, поскольку при этом появляется эффект слабой обусловленности матрицы системы нормальных уравнений – её определитель очень близок к нулю. В таком случае оценки параметров многофакторных моделей будут неточными, а интерпретация влияния факторов на прогнозируемый показатель не адекватна реальной ситуации. Следовательно, снижается ценность регрессионных моделей при решении задач прогнозирования.

Рассмотрим используемые методы для смягчения эффекта мультиколлинеарности.

### МЕТОД ВЫДЕЛЕНИЯ НАИБОЛЕЕ «ВАЖНЫХ» ФАКТОРОВ

В многофакторной модели могут встретиться «важные» и «неважные» факторы. Обычно «важными» являются факторы, которые оказывают сильное влияние на зависимую переменную, «неважные» не оказывают такого влияния на зависимую переменную. При построении регрессионных моделей в условиях мультиколлинеарности необходимо учитывать влияние на отклик только нескольких заранее известных исследователю «важных» факторов. Также задача исследования может заключаться в поиске наиболее значимо влияющих на отклик факторов. В этих случаях для интерпретации необходимо и достаточно, чтобы только эти важные или наиболее значимо влияющие факторы не были связаны как между собой, так и с другими входящими в регрессионную модель факторами.

Для ранжирования факторов воспользуемся коэффициентами частной корреляции.

С использованием численных значений коэффициентов частной корреляции можно расположить все факторы в порядке их наибольшего влияния на функцию отклика  $Y$ .

Продемонстрируем эффективность предлагаемого подхода на статистических данных показателей экономической динамики одного из регионов России [1]. Значения показателей развития организации представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Показатели экономической динамики одного из регионов России

Потребление электроэнергии, $x_{1,i}$	Основные производственные фонды, $x_{2,i}$	Численность занятых, $x_{3,i}$	Фонд оплаты труда, $x_{4,i}$	Производство продукции, $y_i$
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,948	1,099	1,015	1,037	1,041
0,980	1,211	1,032	1,088	1,091
1,134	1,335	1,040	1,127	1,139
1,138	1,484	1,057	1,178	1,190
1,134	1,676	1,078	1,228	1,244
1,432	1,804	1,097	1,311	1,341
1,598	1,962	1,113	1,398	1,429
1,768	2,095	1,111	1,5012	1,494
2,106	2,201	1,103	1,613	1,522

Вычисленные значения парных коэффициентов корреляции подтвердили наличие мультиколлинеарности.

На основе данных таблицы 1 в пакете статистического анализа SPSS была построена регрессионная модель без учета эффекта мультиколлинеарности, которая выявила нелепый результат о том, что фонд оплаты труда отрицательно влияет на производство продукции.

Для устранения этого недостатка были вычислены частные коэффициенты корреляции, которые определили «наиболее важные» факторы ( $x_3$ ,  $x_4$ ) и «менее важные» факторы ( $x_2$ ,  $x_1$ ), о чем свидетельствуют вычисленные значения частных коэффициентов корреляции:  $r_{1,Y,2,3,4} = -0.50$ ,  $r_{2,Y,1,3,4} = -0.30$ ,  $r_{3,Y,1,2,4} = -0.85$ ,  $r_{4,Y,1,2,3} = 0.64$ .

С помощью пакета статистического анализа SPSS было получено уравнение регрессии от наиболее влияющих факторов в следующем виде:

$$y_i = 0.156 \cdot x_{3,i} + 0.868 \cdot x_{4,i}, \quad i = 1(1)10.$$

В интервальном виде регрессионное уравнение имеет вид:

$$[y_{n,i}, y_{s,i}] = [-0.01, 0.322] \cdot x_{3,i} + [0.728, 1.008] \cdot x_{4,i}, \quad i = 1(1)10.$$

Анализ построенной регрессионной модели показывает, что увеличение выпуска продукции обуславливается положительным влиянием факторов  $x_3$  и  $x_4$  (численность занятых, фонд оплаты труда), а остальные факторы не оказывают существенного влияния на выпуск продукции.

Таким образом, выявление наиболее важных факторов позволяет строить регрессионные модели в условиях мультиколлинеарности.

### МЕТОД ЦЕНТРИРОВАНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ

Операция центрирования представляет собой такое преобразование исходных переменных, при котором из каждого значения переменной вычитается среднее арифметическое значение переменной.

Результаты построения уравнения регрессии с использованием метода центрирования переменных имеет вид:

$$y_i - 1.24 = 0.097 \cdot (x_{1,i} - 1.32) + 2.043 \cdot (x_{3,i} - 1.59) + 0.351 \cdot (x_{4,i} - 1.25), \quad i = 1(1)10.$$

Полученное регрессионное уравнение согласуется с оценкой полученных ранее частных коэффициентов корреляций.

Поэтому метод центрирования переменных целесообразен и при построении регрессионных моделей в условиях мультиколлинеарности.

### УПРОЩЕННЫЙ МЕТОД СНИЖЕНИЯ МУЛЬТИКОЛЛИНЕАРНОСТИ

Метод предполагает осуществление преобразования результатов пассивных наблюдений факторов «вручную» на основе построения графика зависимости между переменными (диаграмму рассеяния точек).

В зависимости от требований к степени корректности интерпретации (точной, приближённой или грубой) задаётся приемлемое максимальное «критическое», «пренебрежимо малое» значение коэффициента корреляции  $r_{крит}$ . Начинать преобразование можно с изучения диаграммы для пары переменных  $x_i$  и  $x_j$ , определяющих максимальное по модулю значение коэффициента корреляции между ними.

Чем ближе значение величины  $|r_{i,j}|$  к единице, тем более вытянутым и узким будет «эллипс», окаймляющий облако точек на диаграмме рассеяния. В этом случае необходимо отбросить те «крайние» точки, которые придают «эллипсу» вытянутую форму. Снова повторяют расчет корреляционной матрицы факторов. Такие же действия следует сделать с другими переменными, определяющими следующее максимальное по модулю значение коэффициента корреляции. Преобразование данных заканчивается, когда максимальное по модулю значение коэффициента парной корреляции  $|r_{i,j}|$  не будет превышать «критического» значения  $r_{крит}$ .

Применение этого метода целесообразно при большом количестве экспериментальных точек.

### МЕТОД РИДЖ-РЕГРЕССИИ

Наиболее радикальным средством устранения последствий мультиколлинеарности считается метод гребневой (ридж) регрессии. В этом случае к диагональным элементам корреляционной матрицы прибавляют малое число (ридж-параметр). Добавление этого малого параметра приводит к небольшой систематической ошибке в оценке коэффициентов регрессии, зато существенно снижает их случайную изменчивость. Как известно, дисперсии случайных ошибок коэффициентов регрессии пропорциональны диагональным элементам матрицы:

$$C = (R_{xx})^{-1},$$

где  $R_{xx}$  – корреляционная матрица объясняющих переменных.

При мультиколлинеарности определитель корреляционной матрицы может оказаться близким к нулю (вырождение), тогда численные значения элементов обратной матрицы будут очень велики. Введение даже малого ридж-параметра сдерживает непомерный рост численных значений элементов обратной матрицы.

В работе [2] описан результат исследования зависимости трудоемкости обработки деталей на станке ( $y$ ) от факторов:  $x_1$  – массы детали,  $x_2$  – количества операций,  $x_3$  – количества обрабатываемых поверхностей,  $x_4$  – количества деталей.

Рассмотрим корреляционную матрицу между всеми переменными.

$$R_{xy} = \begin{vmatrix} & x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & y \\ x_1 & 1 & 0.97 & 0.96 & 0.96 & 0.9186 \\ x_2 & 0.97 & 1 & 0.996 & 0.993 & 0.98 \\ x_3 & 0.96 & 0.996 & 1 & 0.995 & 0.99 \\ x_4 & 0.96 & 0.993 & 0.995 & 1 & 0.99 \\ y & 0.9186 & 0.98 & 0.99 & 0.99 & 1 \end{vmatrix}.$$

Из приведенной матрицы видно, что наиболее тесно трудоемкость обработки связана с количеством деталей ( $R_{x_4y} = 0.99$ ). С использованием пакета статистического

анализа SPSS была получена регрессионная модель с учетом всех влияющих факторов в виде:

$$y_i = -223 - 0.59 \cdot x_{1i} - 0.94 \cdot x_{2i} + 1.24 \cdot x_{3i} + 1.23 \cdot x_{4i}, i = 1(1)10.$$

Это уравнение «объяснило» 99,7% общей изменчивости отклика  $y$ . Получился нелепый результат: будто бы с увеличением массы детали и количества операций трудоемкость обработки уменьшается. Причина этого недоразумения видна из корреляционной матрицы между факторами: показатель  $x_4$  тесно связан с остальными переменными.

Рассмотрим способ уменьшения эффекта мультиколлинеарности.

Рассмотрим две обратные матрицы для  $R_{xx}$  и  $(R_{xx} + k \cdot I)$ , где  $I$  – единичная матрица,  $R_{xx}$  – корреляционная матрица между объясняющими переменными.

В таблице 2 приведены результаты вычисления обратных матриц (исходной  $C$  и с учетом ридж-параметра  $C_k$ ) в системе компьютерной математики Mathcad.

Таблица 2 – Результаты вычисления обратных матриц

Матрица $C$	Матрица $C_k$
$R_{xx}^{-1} = \begin{pmatrix} 21.066 & -51.637 & 33.841 & -2.502 \\ -51.637 & 285.988 & -212.059 & -23.784 \\ 33.841 & -212.059 & 270.287 & -90.651 \\ -2.502 & -23.784 & -90.651 & 117.273 \end{pmatrix}$	$R_{xx}^{-1} = \begin{pmatrix} 7.171 & -3.386 & -1.555 & -1.847 \\ -3.386 & 13.893 & -5.563 & -4.794 \\ -1.555 & -5.563 & 12.982 & -5.627 \\ -1.847 & -4.794 & -5.627 & 12.506 \end{pmatrix}$

Как видно из таблицы 2, введение малого параметра  $k = 0.05$  уменьшило элементы обратной матрицы  $C_k$  более, чем в 10 раз, что позволяет смягчить эффект мультиколлинеарности. Это означает, что при изменении параметра  $k$  стандартизованные коэффициенты регрессии  $\beta_i$  должны иметь устойчивую динамику для влияющих факторов и неустойчивую для невливающих факторов. Последние могут быть удалены из уравнения регрессии. Вектор-столбец стандартизованных коэффициентов регрессии вычисляется по следующей формуле:

$$\beta^T = (R_{yx})^T \cdot C_k.$$

Протокол решения задачи для одного значения ридж-параметра  $k = 0$  представлен на рисунке 1.

Результаты полученных стандартизованных значений коэффициентов регрессии для  $k$ , изменяющегося от 0 до 0.12 с шагом 0.01, приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Стандартизованные значения коэффициентов регрессии

Значение ридж-параметра $k$	Значения стандартизованных коэффициентов регрессии			
	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$
0.00	-0.297	-0.359	0.633	1.003
0.01	-0.291	0.155	0.449	0.662
0.02	-0.233	0.22	0.428	0.559
0.03	-0.184	0.243	0.41	0.504
0.04	-0.143	0.252	0.394	0.467
0.05	-0.109	0.257	0.381	0.440
0.06	-0.081	0.259	0.37	0.420
0.07	-0.058	0.259	0.36	0.403
0.08	-0.037	0.259	0.352	0.389
0.09	-0.019	0.259	0.344	0.377
0.1	0.004	0.258	0.337	0.367
0.11	0.009	0.258	0.331	0.358
0.12	0.021	0.257	0.326	0.351

$$\begin{aligned}
 &k := 0.0 \\
 &R_{xy} := \begin{pmatrix} 1 & 0.97 & 0.96 & 0.96 & 0.92 \\ 0.97 & 1 & 0.996 & 0.993 & 0.98 \\ 0.96 & 0.996 & 1 & 0.995 & 0.99 \\ 0.96 & 0.993 & 0.995 & 1 & 0.99 \\ 0.92 & 0.98 & 0.99 & 0.99 & 1 \end{pmatrix} \\
 &R_{xx} := \begin{pmatrix} 1+k & 0.9681 & 0.9549 & 0.9558 \\ 0.9681 & 1+k & 0.9967 & 0.9939 \\ 0.9549 & 0.9967 & 1+k & 0.9955 \\ 0.9558 & 0.9939 & 0.9955 & 1+k \end{pmatrix} \\
 &R_{xx}^{-1} = \begin{pmatrix} 21.066 & -51.637 & 33.841 & -2.502 \\ -51.637 & 285.988 & -212.059 & -23.784 \\ 33.841 & -212.059 & 270.287 & -90.651 \\ -2.502 & -23.784 & -90.651 & 117.273 \end{pmatrix} \\
 &C_k := R_{xx}^{-1} \\
 &C_k = \begin{pmatrix} 21.066 & -51.637 & 33.841 & -2.502 \\ -51.637 & 285.988 & -212.059 & -23.784 \\ 33.841 & -212.059 & 270.287 & -90.651 \\ -2.502 & -23.784 & -90.651 & 117.273 \end{pmatrix} \\
 &R_{YX} := \begin{pmatrix} 0.9186 \\ 0.9813 \\ 0.9901 \\ 0.9925 \end{pmatrix} \quad R_{YX}^T \cdot C_k = (-0.297 \quad -0.359 \quad 0.633 \quad 1.003) \\
 &\beta := R_{YX}^T \cdot C_k \\
 &\beta^T = \begin{pmatrix} -0.297 \\ -0.359 \\ 0.633 \\ 1.003 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Рисунок 1 – Результаты вычисления стандартизованных коэффициентов регрессии

Как видно из таблицы 3 только один стандартизованный коэффициент регрессии  $\beta_1$  имеет неустойчивую динамику и его можно исключить из рассмотрения.

**ВЫВОДЫ**

Наиболее радикальными средствами построения регрессионных моделей в условиях мультиколлинеарности следует признать следующие методы:

- метод выявления наиболее значимых факторов;
- метод центрирования переменных;
- метод гребневой (ридж) регрессии.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Светульников С.Г. Методы маркетинговых исследований: учебное пособие. – СПб.: Издательство ДНК, 2003. – С.178.
2. Горбач А.Н., Цейтлин Н.А. Анализ спонтанных последовательностей в регрессионных моделях в маркетинге. – Харьков: ФО-П Шейнина О.В., 2008. – 182 с.

Лебедева Марина Юрьевна  
 Филиал ГОУВПО «МЭИ (ТУ)», г. Смоленск  
 Кандидат технических наук  
 Доцент кафедры менеджмента и информационных технологий в экономике  
 Тел.:35-49-91  
 E-mail: marilieb@yandex.ru

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГРАФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОРОВ ДЛЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВЫЧИСЛЕНИЯ ДИСКРЕТНОЙ ИНТЕРПОЛЯЦИИ СИБСОНА БЕЗ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ПОСТРОЕНИЯ ДИАГРАММЫ ВОРОНОГО

*Рассмотрен новый метод для построения дискретной интерполяции Сибсона с использованием возможностей параллельной обработки данных на графических процессорах с поддержкой технологии CUDA. Ускорение метода построения достигается за счет отсутствия необходимости предварительного вычисления диаграммы Вороного, а также распараллеливания вычислений на графическом процессоре с поддержкой технологии CUDA. В результате этого достигается существенное ускорение вычисления дискретной интерполяции Сибсона. В качестве ускорителя обработки матричных данных и распараллеливания вычислений применена графическая плата NVIDIA с поддержкой CUDA.*

**Ключевые слова:** дискретная интерполяция Сибсона; параллельные вычисления на графических процессорах; диаграмма Вороного.

*This paper describes a new method of discrete Sibson Interpolation with using the capabilities of parallel processing on CUDA-enabled graphics processing units. Acceleration of the method is achieved through the absence of the need to pre-calculate the Voronoi diagram, as well as parallel computing on the CUDA-enabled GPU. As a result, achieved a significant acceleration of computing discrete Sibson interpolation. As GPU accelerator to process data arrays and parallel computing was used NVIDIA CUDA-enabled graphic card.*

**Keywords:** discrete Sibson interpolation; discrete representation; parallel computing on GPU; Voronoi diagram.

### ВВЕДЕНИЕ

Построение и визуализация дискретных моделей на основе рассеянных пространственных данных вот уже несколько десятилетий привлекает к себе особое внимание, являясь одним из важнейших этапов компьютерного моделирования.

Однако для построения данных моделей необходимо иметь информацию о связности исходных точек данных. Рассеянные точки в «сыром виде» не содержат такой информации, что требует определения функции реконструкции для оценки значений в произвольных местоположениях. Среди множества известных методов реконструкции рассеянных данных особое место занимает интерполяция по методу естественных соседей, которая обеспечивает единственность и непрерывность результатов интерполяции.

Интерполяция естественных соседей, предложенная Сибсоном, строится на основе диаграммы Вороного для исходного набора данных, где весовой вклад пробы не задается мерой длины, одинаковой для всех направлений, а определяется соответствующей мерой Лебега в пространстве направлений [1]. Интерполяция естественных соседей существенно лучше традиционных методов дистанционного взвешивания, так как её плотность меняется в зависимости от суммарного вклада влияющих областей, что позволяет учитывать анизотропные свойства модели. Несмотря на многочисленные положительные свойства, метод Сибсона характеризуется весьма трудоемким и сложным в реализации, особенно когда он используется для высоких размерностей. Основная причина этих проблем состоит в том, что реализация метода основана на диаграмме Вороного всего множества точек данных.

Предлагаемый дискретный подход к оценке интерполянта Сибсона на регулярной решетке основан исключительно на нахождении взвешенного влияния ближайших

соседей без построения промежуточной диаграммы Вороного в том или ином виде. Легко реализуется с использованием существующего коммерческого трехмерного графического аппаратного обеспечения, обеспечивая значительное ускорение операций по сравнению с традиционными подходами для больших массивов рассеянных точек данных, при этом легко обобщается на случаи более высоких размерностей.

### ОПИСАНИЕ ОСНОВНЫХ МЕТОДОВ ДИСКРЕТНОЙ ИНТЕРПОЛЯЦИИ СИБСОНА

Определение коэффициентов интерполяции Сибсона опирается на понятие ячейки или диаграммы Вороного. Стандартная диаграмма Вороного представляет собой разбиение некоторой области на ячейки или регионы на основе заданного конечного множества рассеянных точек данных, названных сайтами. Диаграмма Вороного  $V(N)$  множества  $N$  в области  $\Omega$  является разбиением области на регионы  $V(p_i) \subset \Omega$  таким образом, что любая точка  $p$  принадлежащая  $V(p_i)$  находится ближе к пробе  $p_i$ , чем к любой другой пробе  $p_j \in N (j \neq i)$ . Регион  $V(p_i)$ , ассоциированный с пробой  $p_i$ , называется ячейкой Вороного и определяется как:

$$Vor(p_i) = \{p \in \Omega : d(p, p_i) < d(p, p_j) \forall i \neq j\}, \quad (1)$$

где  $d$  – метрика расстояния.

Тогда для получения значения функции интерполяции в узле  $p$  в диаграмму Вороного вставляется временная проба  $p$ , как это показано на рисунке 1(б). Полученная ячейка Вороного  $V(p)$  имеет  $k$  соседних ячеек  $V(p_1), \dots, V(p_k)$ . Смежные  $k$  проб  $p_1, \dots, p_k$  называются естественными соседями временной пробы  $p$ . Площадь или объем ячейки  $V(p)$  является объединением площадей или объемов  $u_i$  принадлежавших соседним ячейкам Вороного  $V(p_i)$  в исходной диаграмме Вороного, как это показано на рисунке 1(в). Интерполянт Сибсона функции  $f$  оценивается в узле  $p$  следующим образом [2]:

$$f(p) = \frac{\sum_{i=1}^k u_i f(p_i)}{\sum_{i=1}^k u_i} = \sum_{i=1}^k u_i f(p_i), \quad (2)$$

где  $u_i$  является пересечением площадей (объемов) ячейки Вороного для точки  $p_i$  и временной ячейки Вороного для точки  $p$ .

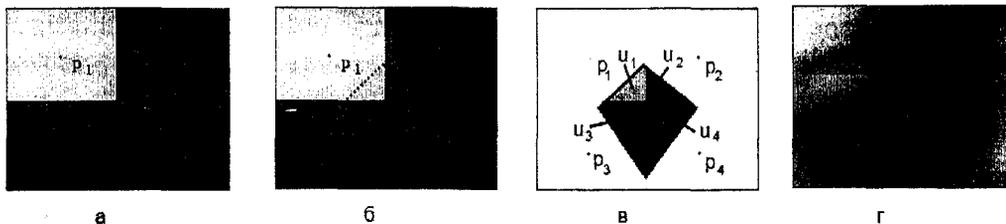


Рисунок 1 – Интерполяция Сибсона начинается с расчета диаграммы Вороного (а) и временной вставки узловой пробы  $p$  (б) для определения размеров областей  $u_i$  (в), которые используются в качестве весов интерполяции (г)

Интерполяция Сибсона традиционно реализуется геометрически, то есть вычисляются весовые вклады для интерполянта путём определения площадей или объемов  $u_i$ , связанных с пробами  $p_i$  после вставки в диаграмму Вороного временного узла  $p$ . Поскольку расчет интерполянта Сибсона в узле  $p$  эквивалентен определению средних значений соседних проб, то дискретная интерполяция Сибсона может быть вычислена путём усреднения дискретных элементов. Накапливая все значения данных опробования для исходной диаграммы Вороного внутри временно вставляемого

региона Вороного  $V(p)$  (рис. 1) и разделив накопленное значение на число просуммированных элементов, мы определим среднее значение для региона. Это значение и есть дискретный эквивалент значения интерполяции Сибсона. Поскольку дискретные элементы накапливаются в одной позиции, то данная схема интерполяции называется «подходом собирания».

Намного более эффективный подход предложен в работе [3]. Ключевая идея построения более эффективного интерполянта Сибсона состоит в рассмотрении проблемы с обратной стороны, когда значения «разбрасываются», а не собираются. Данный подход основывается на теореме 1.

### Теорема 1.

В дискретном интерполянте Сибсона значение  $V_c(i)$  раstra  $i$  воздействует только на те внешние растры  $p$ , которые находятся внутри некоторой  $d$ -мерной сферы вокруг раstra  $i$ , радиус которой равен расстоянию от раstra  $i$  до ближайшей пробы.

Тогда вместо итеративного прохода по всем позициям  $p$  и накопления всех значений позиций раstra  $i \in V(p)$  в  $c(p)$  можно выполнить итерации по растровым позициям  $i$  и определять, какие  $f(p)$  находятся под влиянием значения раstra  $i$  (рис. 2а). Смешав сферы для каждого раstra  $i$  (рис. 2б) в результате мы получим дискретную интерполяцию Сибсона (рис. 2в).

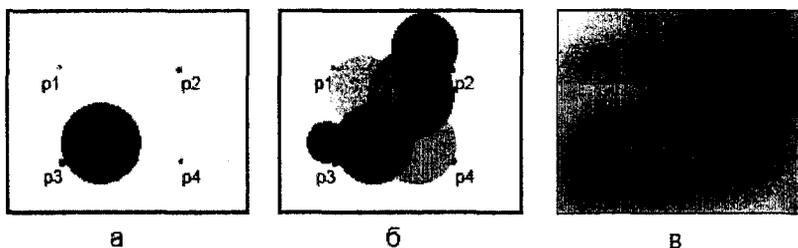


Рисунок 2 – Разброс значения одного раstra (а), смешивание значений растров (б), дискретная интерполяция Сибсона (в)

При этом нахождение ближайшего соседа происходит без прямого построения диаграммы Вороного, а при помощи построения  $kd$ -дерева. Однако для построения  $kd$ -дерева для  $n$  точек на предварительном этапе требуется  $O(n \cdot \log n)$  времени. Поиск ближайшего соседа для каждого раstra  $i$  потребует еще  $O(\log n)$  времени [4].

Построение в том или ином виде диаграммы Вороного и является слабым местом построения дискретной интерполяции Сибсона, поскольку такой подход требует не только вычислительных затрат для вычисления ближайших соседей, но и требует использования достаточно сложных структур данных для хранения промежуточных результатов, особенно в высоких размерностях. При этом с увеличением количества исходных точек данных существенно увеличивается и вычислительное время, что делает данные подходы дорогостоящими не только в вычислительном отношении, но и труднореализуемыми с алгоритмической точки зрения.

## МЕТОД ДИСКРЕТНОЙ ИНТЕРПОЛЯЦИИ СИБСОНА БЕЗ ПОСТРОЕНИЯ ДИАГРАММЫ ВОРОНОГО

В данной работе предлагается подход для вычисления дискретной интерполяции Сибсона без предварительного построения диаграммы Вороного. Данный метод основан на подходе с «разбросом» значения. Однако не требует предварительного поиска расстояния и значения ближайшего соседа.

Основная идея данного метода основывается на геометрических свойствах дискретной диаграммы Вороного и заключается в объединении задачи поиска

ближайшего соседа с задачей разброса значения для каждого растра. Разброс значения осуществляется с последовательным увеличением радиуса разброса для каждого растра  $i$  до тех пор, пока не встретится первая точка исходных данных (рис.3).

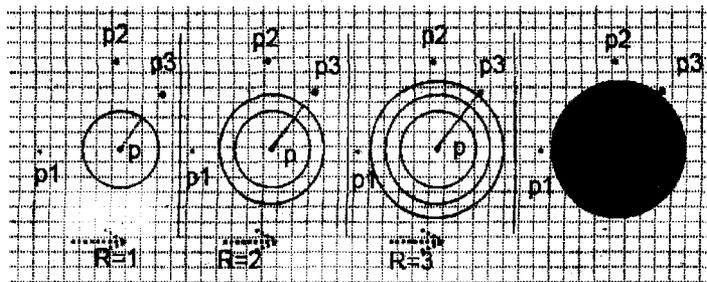


Рисунок 3 – Итерации поиска и разброса значения с последовательным увеличением радиуса

При этом нетрудно доказать, что точка исходных данных, которая первая встретится в результате такого разброса, и является ближайшим соседом для заданного растра. Основная проблема заключается в том, что до нахождения ближайшего соседа неизвестно его значение. Поэтому предлагается разбрасывать указатель на значение ближайшего соседа, т.е. адрес зарезервированной ячейки памяти. При этом, как только ближайший сосед будет найден в результате последовательного разброса, в данную ячейку памяти будет записано его значение, следовательно, оно будет присвоено всем ячейкам, находящимся под влиянием данного растра. После разброса значения всех растров для каждого растра осуществляется сложение всех значений и усреднение итогового значения путем деления на количество влиявших элементов.

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГРАФИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ

Интерполяция естественных соседей даже без предварительного вычисления диаграммы Вороного требует достаточно больших вычислительных ресурсов из-за необходимости «разброса» значений для каждой ячейки регулярной решетки.

Одним из основных преимуществ данного подхода является независимость задачи поиска значений интерполяции для узлов регулярной решетки, поэтому поиск значения каждого узла можно решать в рамках отдельной подзадачи, что обуславливает возможность распараллеливания вычислений. Однако использование параллельных вычислений выдвигает завышенные требования к аппаратной части вычислительных систем. При этом стоимость таких систем на основе CPU является слишком высокой.

В настоящее время большую популярность получили технологии использования графических процессоров GPU (Graphic Processing Units) для параллельных вычислений общего назначения в различных областях научной деятельности, таких, как квантовая механика, искусственный интеллект, физические расчеты, а также распознавание образов.

Данный подход имеет существенный ряд преимуществ по сравнению с использованием центрального процессора, поскольку современные графические процессоры существенно превосходят центральные процессоры в плане производительности, а также имеют существенно более низкую стоимость относительно решений на основе CPU, что позволяет существенно снизить стоимость вычислительных решений.

В предложенном методе построения дискретной интерполяции Сибсона задача поиска значения каждого узла дискретной модели не является слишком вычислительно сложной задачей и не выдвигает высоких требований к частоте процессора, поэтому решающим фактором для вычислительной скорости будет являться количество одновременно выполняющихся процессов. Поэтому в качестве элементарного блока

для распараллеливания вычислений на графическом процессоре в данном алгоритме будет выступать поиск значения интерполяции для одного растра регулярной решетки.

Использование графических процессоров также накладывает ряд ограничений на используемые вычислительные алгоритмы, поскольку для эффективного использования возможностей параллельной обработки данных на GPU необходимо учитывать их архитектурные особенности при разработке и реализации вычислительных алгоритмов.

Архитектура графических процессоров с поддержкой технологии параллельных вычислений CUDA (Compute Unified Device Architecture) подразумевает разделение решаемой задачи на элементарные блоки, которые, в свою очередь, также содержат элементарные подзадачи (нити). При этом, если задача, решаемая блоком, содержит ветвления, то все нити данного блока будут выполняться, пока выполняется условие ветвления хотя бы в одной нити данного блока. Поэтому количество ветвлений в пределах одной нити необходимо свести к минимуму.

Тогда задачу поиска значения интерполяции для каждого узла регулярной решетки целесообразно разбить на две подзадачи:

- 1) Разброс значения растра;
- 2) Усреднение значения растра.

Поскольку подзадача разброса значения предполагает некоторое количество ветвлений, а усреднение значения растра их не содержит, для наиболее эффективной реализации данные задачи необходимо выполнять с разной конфигурацией ядра графического процессора.

Для подзадачи разброса значения необходимо использовать наименьшее количество нитей в одном блоке и наибольшее количество блоков, учитывая архитектурные особенности современных графических плат с поддержкой технологии CUDA, в данной реализации будет использована конфигурация ядра GPU с блоком, содержащим 16 нитей (4x4). В то же время для задачи усреднения значений с блоком, содержащим 64 нити (8x8).

Тогда подзадача разброса значения для одного растра регулярной решетки будет выглядеть следующим образом.

– Установить начальное значение радиуса разброса  $R$ , равным 1, промежуточное значение  $V$ , равным 0, счетчик присваиваний  $C = 0$  и состояние текущей ячейки в «не найдено».

– Пока состояние ячейки «не найдено», выполнить:

– для всех растров, лежащих на окружности радиуса  $R$  с центром в данной ячейке, проверить:

– если растр содержит значение, то установить состояние в «найдено», а промежуточное значение ячейки  $V$  равным значению текущего растра.

– Увеличить радиус  $R$  на единицу.

– Для всех растров, лежащих внутри описанной окружности радиуса  $r < R$  в данной ячейке:

– увеличить количество присваиваний  $C$  на единицу и текущее значение  $F$  на  $V$ .

– После выполнения подзадачи разброса значения необходимо выполнить задачу усреднения значения для всех растров регулярной решетки следующим образом:

– установить значение  $V$  текущего растра, равным текущему значению, разделенному на количество присваиваний  $C$ :  $V=F/C$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В отличие от других методов дискретной интерполяции Сибсона, предложенный метод позволяет обойтись без построения и хранения промежуточной диаграммы Вороного, что обуславливает алгоритмическую простоту данного метода и позволяет существенно сократить вычислительное время для больших наборов исходных данных.

Для оценки производительности данного метода дискретной интерполяции Сибсона с использованием параллельных вычислений на графических процессорах, поддерживающих технологию CUDA, было произведено сравнение алгоритмов на основе данного метода, реализованных для вычислений на CPU и GPU для случайных наборов исходных данных.

Сравнение времени выполнения алгоритмов производилось на персональном компьютере с процессором Intel Core2Duo 3GHz, имеющем 2GB RAM, с графическим ускорителем NVIDIA GeForce 250 GTS и операционной системой Windows XP. На 4 проиллюстрировано сравнение времени вычислений обоих алгоритмов при и числа входных значений для регулярной решетки 512 x 512 пикселей.

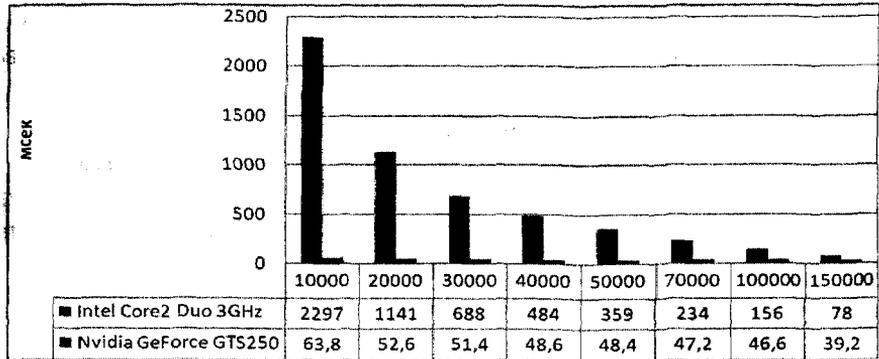


Рисунок 4 – Сравнение времени вычислений на CPU и GPU

На графике видно, что алгоритм, реализованный с использованием технологии параллельных вычислений на GPU, существенно быстрее аналогичного алгоритма, реализованного на CPU, особенно для сравнительно небольшого числа исходных данных. И даже при использовании недорогого графического ускорителя (GeForce 250GTS) был получен выигрыш в производительности алгоритма до 36 раз, что позволяет вычислять дискретную интерполяцию Сибсона в реальном времени.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев П.В., Майдаков М.А. Дискретная интерполяция Сибсона с использованием модели M2M // X Международная научно-методическая конференция «Информатика: проблемы, методология, технологии». – Издательство Воронежского государственного университета. – 2010. – Том 2. – С.3-8.
2. Васильев П.В., Майдаков М.А. Использование графического ускорения интерполяции Сибсона для моделирования геотекстур // I-я международная научно-техническая конференция «Компьютерные науки и технологии». – Издательство Белгородского государственного университета. – 2009. – С.67-69.
3. Sung W. Park; Lars Linsen; Oliver Kreylos; John D. Owens; Bernd Hamann Discrete Sibson Interpolation. IEEE Transactions On Visualization And Computer Graphics, 2006. vol. 12. – No. 2. – Pp. 243 - 253.
4. YingPeng Zhang, ZhiZhuo Zhang, Qiong Chen. A New Nearest Neighbour Searching Algorithm Based on M2M Model. Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2007, IMECS 2007, Hong Kong, China. March, 2007. – Pp. 31-37.

**Майдаков Михаил Александрович**

Белгородский государственный университет, г. Белгород  
 Аспирант кафедры математического и программного обеспечения  
 информационных систем  
 Тел.: 8-919-2225525  
 E-mail: m-email@inbox.com

УДК 519.637.4

А.В. ПАШКОВСКИЙ

**КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД  
СТАНДАРТНЫХ И КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
В РАСЧЕТЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
И СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
АСИНХРОННОГО ТЯГОВО-ПОДЪЕМНОГО МОДУЛЯ**

*Используется комбинированный метод стандартных и конечных элементов для расчета магнитного поля и силовых характеристик асинхронного тягово-подъемного модуля. Анализируется точность и возможности метода на основе сравнения с экспериментальными данными и результатами расчета комбинированным методом граничных и конечных элементов.*

*Ключевые слова: метод конечных элементов; метод стандартных элементов; краевые полевые задачи; численное решение.*

*The combined method of standard and final elements for computing of the magnetic field and power characteristics of the asynchronous traction -elevating module is used. Accuracy and opportunities of a method are analyzed on the basis of comparison with experimental data and results of calculation by the combined method of boundary and final elements*

*Keywords: method of final elements; method of standard elements; regional field problems; the numerical decision.*

Современные численные методы – методы конечных элементов (МКЭ), граничных элементов (МГЭ), комбинированный граничных и конечных элементов (КМГиКЭ) и другие – позволяют осуществлять разнообразные типы полевых расчетов, однако характеризуются целым рядом особенностей, оказывающих негативное влияние на их точность и производительность. В качестве основных можно выделить: линейную аппроксимацию решения, неудовлетворительную склейку нормальных производных решения на границах разнородных сред, специальные приемы по формированию многомерных матриц алгебраических систем уравнений, особые методы их решения для приемлемой скорости сходимости итерационных процессов, вычисление многомерных интегралов от функций, имеющих особенности и т.д.

Эти недостатки особо значимы в неоднородных и кусочно-однородных средах (КОС) при наличии особенности решения в окрестности угловых точек, осцилляции решений в КОС и их границах, многофазных средах с тонкими включениями, нелинейными характеристиками включений, имеющих место в производстве, технологиях и научных разработках новых электромеханических, электромагнитных и тепловых устройств. Прогнозируемо усугубление ситуации в расчётах трехмерных полей в устройствах с использованием в них мели, микро и нанотехнологий.

Для полевых расчетов в подобных КОС автором разработан комбинированный метод стандартных (на основе рядов Фурье) и конечных элементов (КМСФиКЭ), который лишен большинства из вышеперечисленных недостатков.

Основная идея КМСФиКЭ состоит в совместном использовании для решения краевых задач аналитического и численного методов решений (МКЭ). Это становится возможным, благодаря выделению в расчетных областях стандартных элементов (СЭ), удовлетворяющих требованиям:

– геометрия СЭ должна быть характерной и «удобной» для разбиения КОС. Она должна позволять максимально заполнить КОС совокупностью СЭ различной формы;

– в выбранном СЭ должно существовать решение краевой задачи, найденное классическими методами решения. Постановка краевой задачи в СЭ определяется постановкой исходной краевой задачи и расположением СЭ в КОС.

Пусть рассматривается некоторая краевая полевая задача в области  $G$  (рис.1). Введем КМСФикЭ следующим образом:

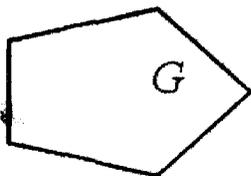


Рисунок 1 – Расчетная область  $G$

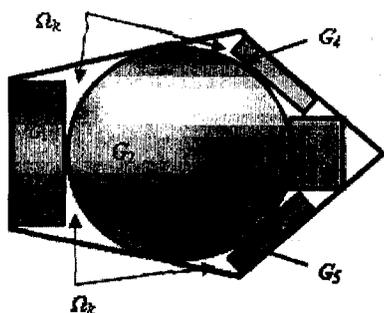


Рисунок 2 – Пример заполнения расчетной среды

1. Для поставленной краевой задачи, как обычно это бывает в вариационном исчислении [1], строится соответствующий ей функционал  $J$ , рассматриваемый на множестве  $L$  функций, определенных в области  $G$ , где ищется решение задачи, и удовлетворяющих необходимым краевым условиям.

2. Область  $G$  (рис. 2) разбивается на стандартные элементы  $G_i$  – те, в которых известны решения краевых задач для заданного уравнения, и подобласти  $\Omega_k$ , дополняющие их до всей области  $G$ .

3. Область определения  $L$  функционала  $J$  сужается на множество функций, удовлетворяющих уравнению Эйлера для функционала  $J$  в стандартных элементах.

4. С использованием связей между функцией и ее производными, принесенных из стандартных элементов на их границы, функционал  $J$  преобразуется к новому

функционалу  $J_1$ , областью определения которого является множество  $E$  функций с областью определения  $\cup \Omega_k$ .

5. Функционал  $J_1$  минимизируется на  $E$  с помощью МКЭ, что дает значения решения краевой задачи в узлах, принадлежащих множеству  $\cup \Omega_k$ .

6. Решение исходной краевой задачи в элементах  $G_i$  находится с помощью решения краевых задач в них классическими методами [2; 3] с использованием полученных узловых значений на границе множества  $\cup \Omega_k$ .

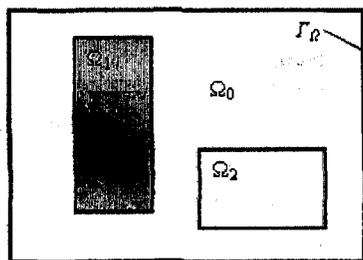


Рисунок 3 – Магнитная система с нелинейными включениями  $\Omega_1$

Очевидно, что КМСФикЭ сочетает преимущества МСЭФ в расчетах полей линейных сред [4], с преимуществами МКЭ в расчетах нелинейных сред [5]. При этом, заполняя «линейную» часть расчетной области стандартными элементами различной геометрии и «удобных» размеров, можно максимально сократить степень применения МКЭ в области. Использование КМСФикЭ обеспечивает рост точности расчетов при его численной реализации по отношению к МКЭ за счет замены в СЭ линейной аппроксимации расчетной функции (как это сделано в МКЭ) на ее

аналитическое представление. Заметим, что использование полиномов более высокого порядка в МКЭ для аппроксимации решения ограничено в применении [6] и обеспечивает худшую точность по сравнению с использованием аналитического представления решения в СЭ.

Рассмотрим магнитную систему  $\Omega$  (рис. 3) с линейными свойствами среды в областях  $\Omega_2, \Omega_0$  и нелинейными в области  $\Omega_1$ . Свойства среды в каждой точке области  $\Omega_1$  задаются материальным оператором  $\bar{H} = \bar{F}(\bar{B})$ . Магнитное поле создается токами, распределенными в области  $\Omega_2$  с плотностью  $\bar{J} = J(x, y) \cdot \bar{e}_z$ . В этом случае плоскопараллельное магнитное поле в областях  $\Omega_0, \Omega_1, \Omega_2$  может быть задано уравнениями:

$$\begin{aligned} \Delta A &= 0 && \text{в } \Omega_0, \\ \text{rot}_z \bar{F} &= 0 && \text{в } \Omega_1, \\ \Delta A &= J && \text{в } \Omega_2 \end{aligned}$$

и следующими условиями на границах раздела областей:

$$\begin{aligned} A^+ \Big|_{\Gamma} &= A^- \Big|_{\Gamma}, \\ F_\tau \left( \frac{\partial A^+}{\partial y}; -\frac{\partial A^+}{\partial x} \right) \Big|_{\Gamma_1} &= -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A^-}{\partial n} \Big|_{\Gamma_1}, \\ \frac{1}{\mu} \frac{\partial A^+}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} &= -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A^-}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2}, \end{aligned}$$

где  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$  – границы раздела областей  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$ .

Заполним части  $\Omega_0$  и  $\Omega_2$  расчетной области, имеющие линейные магнитные характеристики, стандартными элементами  $G_i$ , а часть  $\Omega_1$  – конечными элементами (с линейной интерполяцией) для уточненного учета нелинейности стали. Граничные условия (2) выполняются на границах всех введенных стандартных и конечных элементов. Для получения решения используем итерационный процесс расчета (на каждой итерации  $\mu_i = \text{const}$ ).

Сформулированная краевая задача при выполнении данных допущений может быть сведена к задаче минимизации функционала на функциях, определенных в расчетной системе, удовлетворяющих уравнению Эйлера в выделенных стандартных элементах, крайевым условиям и принадлежащих пространству  $W_2^1(G_i)$ . Функционал, соответствующий краевой задаче (1), (2), примет вид:

$$J(A) = J_{МКЭ} + J_{МСЭФ} = \frac{1}{\mu_{\Omega_1}} \int (A_x^2 + A_y^2) ds + \frac{1}{\mu_{\Omega_0}} \int (A_x^2 + A_y^2) ds + \int_{\Omega_2} \left( \frac{1}{\mu} A_x^2 + \frac{1}{\mu} A_y^2 + 2AJ \right) ds.$$

Отметим, что для любого  $i$ -го СЭ ( $i = 1 \div k$ ) можно записать:

$$\begin{aligned} 0 &= \int_{G_i} \left( \frac{1}{\mu_i} A_{xx} + \frac{1}{\mu_i} A_{yy} - J \right) A ds = \int_{G_i} \left( \frac{1}{\mu_i} (A_x A)_x + \frac{1}{\mu_i} (A_y A)_y - \frac{1}{\mu_i} A_x^2 - \frac{1}{\mu_i} A_y^2 - AJ \right) ds = \\ &= \frac{1}{\mu_i} \int_{G_i} \left( (A_x A)_x + (A_y A)_y \right) ds - \int_{G_i} \left( \frac{1}{\mu_i} A_x^2 + \frac{1}{\mu_i} A_y^2 + AJ \right) ds \end{aligned} \quad (3)$$

Используя формулу Грина, преобразуем первый интеграл выражения (3) в интеграл по границе  $i$ -го СЭ:

$$\frac{1}{\mu_i} \int_{G_i} \left( (A_x A)_x + (A_y A)_y \right) ds = \frac{1}{\mu_i} \int_{S_i} A \frac{\partial A}{\partial n} dl,$$

тогда:

$$J(A) = J_{МКЭ} + J_{МСЭФ} = \frac{1}{\mu_{\Omega_1}} \int (A_x^2 + A_y^2) ds + \sum_{\Omega_0 \cup \Omega_2} \frac{1}{\mu_i} \int A \frac{\partial A}{\partial n} dl + \sum_{\Omega_2} \int AJ ds = J_1 + J_2 + J_3. \quad (4)$$

Основную идею методики КМСФикЭ можно сформулировать следующим образом: функционал (4) будет выражен через коэффициенты Фурье разложения

векторного потенциала на границах СЭ, не примыкающих к нелинейной части  $\Omega_1$  области, и через узловые значения потенциала в нелинейной части  $\Omega_1$  области и ее границе. Минимизация функционала по совокупности значений коэффициентов Фурье и узловых значений, на соответствующих границах позволит найти решение исходной краевой задачи (1), (2).

Действительно, выберем в  $J_2$  в качестве стороны интегрирования сторону  $s_{12}$  «склейки» линейных СЭ прямоугольной формы (рис.4). Узлы на стороне не вводятся. «Склейка» производится с использованием коэффициентов разложения следа решения на границах СЭ в ряд Фурье. Используя разложения векторного потенциала  $A$  и нормальной производной в ряд Фурье на стороне  $s_{12}$ , можем получить вид части функционала  $J_2$  для стороны  $s_{12}$ :

$$J_{s_{12}} = \frac{1}{\mu_1} \sum_{n=1}^{nkf} [cf_{20} f_0 \sqrt{b_2 - b_1} (1 - (-1)^n) / \pi / n + \sum_{k=1}^{nkf} cf_2(k) (1 - (-1)^{n+k}) / (\pi n (1 - k^2 / n^2))] b_{нормs_{12}}(n), \quad (5)$$

где:

$$b_{нормs_{12}}(n) = \frac{1}{(b_2 - b_1) \sinh(n\pi(a_2 - a_1)/(b_2 - b_1))} [\sqrt{2} cf_{10} (1 - (-1)^n) + \sum_{k=1}^{nkf} 2cf_1(k) \frac{1 - (-1)^{n+k}}{1 - k^2/n^2}] -$$

$$- \frac{1}{(b_2 - b_1) \tanh(n\pi(a_2 - a_1)/(b_2 - b_1))} [\sqrt{2} cf_{20} (1 - (-1)^n) + \sum_{k=1}^{nkf} 2cf_2(k) \frac{1 - (-1)^{n+k}}{1 - k^2/n^2}] +$$

$$+ \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{(b_2 - b_1)(a_2 - a_1) \sinh(n\pi(a_2 - a_1)/(b_2 - b_1))}} [\cosh(n\pi(a_2 - a_1)/(b_2 - b_1)) - 1] cf_{30} +$$

$$+ \frac{n\pi}{\sqrt{b_2 - b_1} (b_2 - b_1) \sinh(n\pi(a_2 - a_1)/(b_2 - b_1))} \sum_{k=1}^{nkf} csh(k, n) cf_3(k) -$$

$$- \frac{(-1)^n \sqrt{2}}{\sqrt{(b_2 - b_1)(a_2 - a_1) \sinh(n\pi(a_2 - a_1)/(b_2 - b_1))}} [\cosh(n\pi(a_2 - a_1)/(b_2 - b_1)) - 1] cf_{40} -$$

$$- \frac{(-1)^n n\pi}{\sqrt{b_2 - b_1} (b_2 - b_1) \sinh(n\pi(a_2 - a_1)/(b_2 - b_1))} \sum_{k=1}^{nkf} csh(k, n) cf_4(k). \quad (6)$$

$csh(k, n)$  – числовой коэффициент;

$cf_{i0}$  – нулевой коэффициент разложения потенциала в ряд Фурье на  $i$ -й стороне;

$cf_i(k)$  –  $k$ -й коэффициент разложения потенциала в ряд Фурье на  $i$ -й стороне;

$b_{нормs_{12}}(n)$  – коэффициент разложения нормальной производной потенциала в ряд

Фурье на  $s_{12}$ .

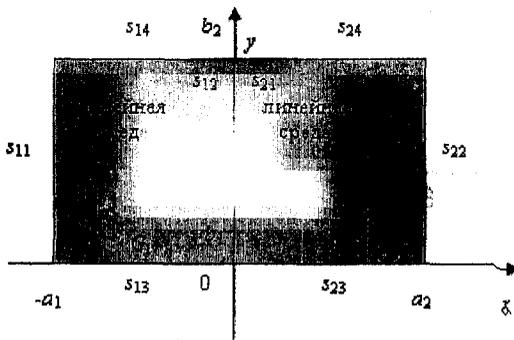


Рисунок 4 – «Склеенные» линейные СЭ  $G_1$  и  $G_2$

Таким образом, выражение (5) части функционала  $J_2$ , соответствующее интегралу по стороне  $s_{12}$ , действительно выражается через коэффициенты разложения векторного потенциала в ряд Фурье на сторонах  $s_{11} \div s_{14}$ .

Рассмотрим границу  $s_{12}$  «линейного» стандартного элемента  $G_1$  и элемента  $G_2$  с нелинейными свойствами среды и подвергнутого разбиению МКЭ для их учета (рис.5). Посредством узлов на общей границе  $s_{12}$  осуществляется склейка

решений. Часть функционала  $J_2$ , соответствующая интегралу по границе  $s_{12}$ , примет вид:

$$J_{s_{12}} = \frac{1}{\mu_1} \int_{s_{12}} A \frac{\partial A}{\partial n} ds = \frac{1}{\mu_1} \sum_{n=1}^{nkf} \left[ \frac{cf_{20} f_0 \sqrt{b_2 - b_1} (1 - (-1)^n)}{n\pi} + \sum_{k=1}^{nkf} cf_2(k) \frac{1 - (-1)^{(n+k)}}{n\pi(1 - k^2/n^2)} \right] b_{нормs_{12}}(n).$$

С учетом того, что

$$cf_{20} = \sqrt{\frac{2}{b_2 - b_1}} \int_0^L A ds \text{ и } cf_2(k) = \frac{2}{\sqrt{b_2 - b_1}} \int_0^L A \cos(k\pi s / (b_2 - b_1)) ds,$$

заменяем имеющиеся интегралы суммами, используя, например, формулу трапеций. Данная замена позволит осуществить "склежку" элементов, с учетом выделенных узловых значений потенциала на общей границе.

Так

$$cf_{20} = \sqrt{\frac{2}{b_2 - b_1}} h / 2 (A(x_0, b_1) + A(x_0, b_2) + 2 \sum_{m=2}^{n-1} A(x_0, s_m)),$$

где  $h = \frac{b_2 - b_1}{n-1}$ ,  $n$  - число узлов на общей границе элементов.

Аналогично:

$$cf_2(k) = \frac{2}{\sqrt{b_2 - b_1}} h / 2 (A(x_0, b_1) + A(x_0, b_2) (-1)^k + 2 \sum_{m=2}^{n-1} A(x_0, s_m) \cos(k\pi s_m / (b_2 - b_1))).$$

Тогда, имеем:

$$J_{s_{12}} = \frac{1}{\mu_1} \sum_{n=1}^{nkf} \frac{1}{\sqrt{b_2 - b_1}} h / 2 (A(x_0, b_1) + A(x_0, b_2) + \sqrt{2} \sum_{m=2}^{n-1} A(x_0, s_m)) \frac{1 - (-1)^n}{n\pi} + \sum_{k=1}^{nkf} \frac{2}{\sqrt{b_2 - b_1}} h / 2 (A(x_0, b_1) + A(x_0, b_2) (-1)^k + 2 \sum_{m=2}^{n-1} A(x_0, s_m) \cos(k\pi \cdot s_m / (b_2 - b_1))) \cdot \frac{1 - (-1)^{(n+k)}}{n\pi(1 - k^2/n^2)} b_{нормs_{12}}(n). \quad (7)$$

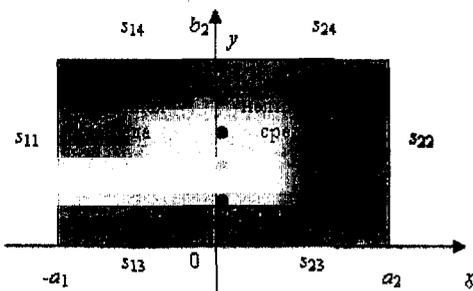


Рисунок 5 – «Склеенные» линейный  $G_1$  и нелинейный  $G_2$  стандартные элементы

на сторонах СЭ области  $\Omega_2$ , либо через совокупность узловых значений на этих сторонах.

С учетом вида (6) коэффициентов  $b_{нормs_{12}}(n)$  можно заключить, что выражение (7) части функционала  $J_2$  соответствующее интегралу по стороне  $s_{12}$  выражается через коэффициенты разложения векторного потенциала в ряд Фурье на сторонах  $s_{11}, s_{13}, s_{14}$ , а также через совокупность узловых значений на стороне  $s_{12}$ .

Очевидно, что слагаемое  $J_3$  также может быть выражено либо через коэффициенты разложения векторного потенциала в ряд Фурье

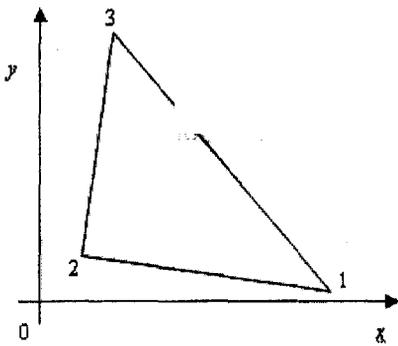


Рисунок 6 - Типичный треугольный конечный элемент в плоскости  $xOy$

Наконец, получим функционал задачи в нелинейной части расчетной области на основе введенных в ней узловых значений искомой функции решения. Рассмотрим нелинейную среду, в дискретизации которой используются конечные элементы для учета нелинейности свойств. В соответствии с методикой МКЭ нелинейные части покрываем сеткой треугольных элементов. Сущность МКЭ заключается в унифицированной аппроксимации потенциала внутри

каждого треугольного элемента (конечного элемента) и подборе таких распределений потенциала в различных элементах, при которых сохранялась бы его непрерывность во всей области определения. Будем полагать, что внутри типичного треугольного элемента (рис.6) потенциал адекватно аппроксимируется выражением:

$$A = a + bx + cy. \tag{8}$$

Таким образом, истинное решение заменяется кусочно-планарной функцией, гладкая поверхность фактического распределения потенциала в плоскости  $xOy$  заменяется многогранной поверхностью аппроксимации. Необходимо, однако, отметить, что распределение потенциала вдоль любой стороны треугольника определяется линейной интерполяцией между двумя значениями потенциала в его вершинах. Таким образом, поверхность  $A(x,y)$ , аппроксимирующая истинное решение в плоскости  $xOy$ , не имеет разрывов, приближенное решение является кусочно-планарным, но везде непрерывным. Коэффициенты  $a, b, c$  в уравнении (8) могут быть найдены из системы трех независимых уравнений, которые получаются из условий, где потенциалы в вершинах треугольника равны. Подставляя поочередно значения этих потенциалов и координат соответствующих им вершин треугольника в уравнение (8), получим систему относительно коэффициентов  $a, b, c$ . Комбинируя  $x, y$  и вводя новые функции положения, приведем уравнение (8) к следующему виду:

$$A = \sum_{i=1}^3 A_i \alpha_i(x, y).$$

Здесь  $\alpha_1(x, y) = (x_2 y_3 - x_3 y_2) + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y$  (9)

это линейная функция, зависящая только от положения вершин треугольника, площадь которого равна  $S$ . Функции  $\alpha_2(x, y)$  и  $\alpha_3(x, y)$  получаются из (8) циклической перестановкой индексов. С учетом введенных обозначений искомый функционал может быть представлен в виде:

$$J_{МКЭ}(A) = \int_{\Omega_1} \left( \frac{1}{\mu} A_x^2 + \frac{1}{\mu} A_y^2 \right) ds = \sum_L \int_L \frac{1}{\mu_L} \left( \sum_{i=1}^3 A_i A_j (\nabla \alpha_i) (\nabla \alpha_j) \right) ds = \sum_L \int_L \left( \frac{1}{\mu_L} \frac{1}{4S_L^2} [((y_2 - y_3)^2 + (x_3 - x_2)^2) A_1^2 + ((y_3 - y_1)^2 + (x_1 - x_3)^2) A_2^2 + ((y_1 - y_2)^2 + (x_2 - x_1)^2) A_3^2 + 2((y_2 - y_3)(y_3 - y_1) + (x_3 - x_2)(x_1 - x_3)) A_1 A_2 + 2((y_2 - y_3)(y_1 - y_2) + (x_3 - x_2)(x_2 - x_1)) A_1 A_3 + 2((y_3 - y_1)(y_1 - y_2) + (x_1 - x_3)(x_2 - x_1)) A_2 A_3 \right] ds \tag{10}$$

Полученная часть (10) функционала (4) выражается через узловые значения потенциала  $A$  в среде с нелинейными свойствами и на ее границе, которые являются неизвестными.

Таким образом, соответствующие части функционала (4) решаемой краевой

задачи выражены как через неизвестные коэффициенты Фурье разложения потенциала  $A$  на сторонах СЭ, так и через ее неизвестные узловые значения в нелинейной части области и ее границе. Последующая минимизация функционала (4) по неизвестным узловым значениям и коэффициентам Фурье функции на сторонах СЭ позволит сформировать систему КМСФиКЭ из уравнений, представляющих собой производные функционала  $J(A)$  по неизвестным коэффициентам Фурье на всех сторонах «склейки» СЭ и узловым значениям искомой функции в нелинейной среде. Ее решение позволит определить значения решения краевой задачи (1), (2) в узлах конечно-элементной сетки, принадлежащих областям  $\Omega_i$  и их границам. Решения краевых задач в СЭ  $G_i$  находятся с помощью классических методов решения краевых задач в СЭ с использованием полученных на их границах узловых значений решения и коэффициентов Фурье решения на границах СЭ.

Результаты [7, 8] с высокой долей уверенности позволяют говорить об обеспечении КМСФиКЭ высокой точности полевых расчетов, достаточной простоте использования прямоугольных СЭ для заполнения расчетных областей, удобной «склейки» СЭ между собой, возможности их комбинирования в расчетной области с конечными элементами. При этом использование КМСФиКЭ позволяет:

- резко сократить степень дискретизации КОС и вычислительные затраты;
- варьировать степень дискретизации расчетной области на СЭ той или иной геометрии;
- выбирать метод аппроксимации решения в СЭ, соответствующий требуемой точности;
- получать непрерывно дифференцируемые решения внутри СЭ;
- сохранить стабильность точности при наличии тонких включений и особенностей решения в окрестностях угловых точек КОС, осцилляции решения в расчетных средах.

Проведем исследование по сравнительной оценке точности и эффективности КМСФиКЭ по отношению к широко применяемому МКЭ в расчете векторного потенциала магнитного поля и силовых характеристик асинхронного тягово-подъемного модуля (рис.7) при наличии в расчетной области модуля особенностей решения в окрестностях точек угловых зон и узкого воздушного зазора. Для оценки точности расчетных значений КМСФиКЭ используем экспериментально полученные данные [9] и расчетные значения комбинированного метода граничных и конечных элементов (КМГиКЭ) из [10].

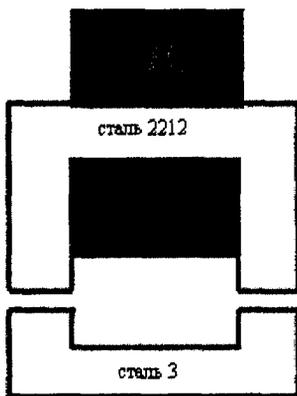


Рисунок 7 – Сечение асинхронного тягово-подъемного модуля

Исследуемый асинхронный тягово-подъемный модуль совмещает в себе функции электромагнитного подвеса и одностороннего линейного асинхронного двигателя. Обмотка намагничивания в данной системе располагается на ярме индуктора. Длина электромагнитной системы вдоль полюсов равна 940 мм. Механический зазор принят  $z=0.015$  м. Зависимости  $B(H)$  материалов магнитопровода нелинейные. Намагничивающая сила  $iW$  варьируется в пределах [6440; 12880] ампер. Экспериментальные значения нормального усилия определены для одного из шести асинхронных тягово-подъемных модулей тележки массой 6 т. Подъемная сила измерена с помощью четырех упругих элементов с тензорезисторами,

установленных на шпильках крепления путевого элемента к продольной балке стэнда. Механический зазор фиксировался диэлектрическими прокладками, расположенными между исследуемым индуктором и путевыми элементами.

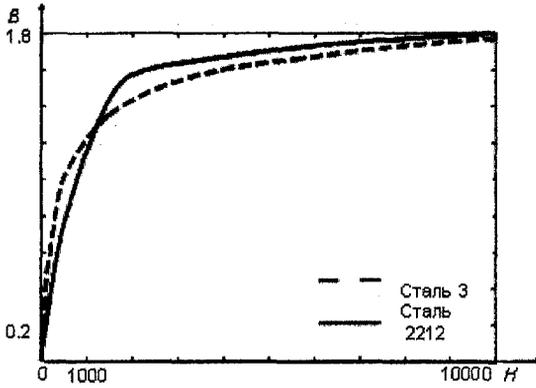


Рисунок 8 – Кривые намагничивания стали в ферромагнетиках

Задача расчета магнитного поля подъемно-тягового модуля при использовании КМГиКЭ была сведена к плоскопараллельной. В расчетах использованы кривые намагничивания сталей № 3 и № 2212 (рис.8). Для улучшения сходимости был применен метод нижней релаксации с введением коэффициента релаксации обратно пропорционального силе тока прямо пропорционального требуемой точности решения. В результате сходимость наблюдалась при любом числе ампервитков. Для решения линейной

задачи требовалось 2-3 итерации, а для нелинейной – 10-20 итераций.

Решим КМСФиКЭ эквивалентную исходной краевую задачу Дирихле для уравнения Пуассона в постановке:

$$\operatorname{div}\left(\frac{1}{\mu} \operatorname{grad} A\right) = f, \quad A|_S = 0. \tag{11}$$

Внешняя граница расчетной области установлена на удалении 0.06 м от границ рассчитываемой системы. Обратим внимание, что один из возможных вариантов

заполнения сечения асинхронного тягово-подъемного модуля стандартными элементами при линейных характеристиках материалов и использовании разработанного ранее МСЭФ приведен на рисунке 9.

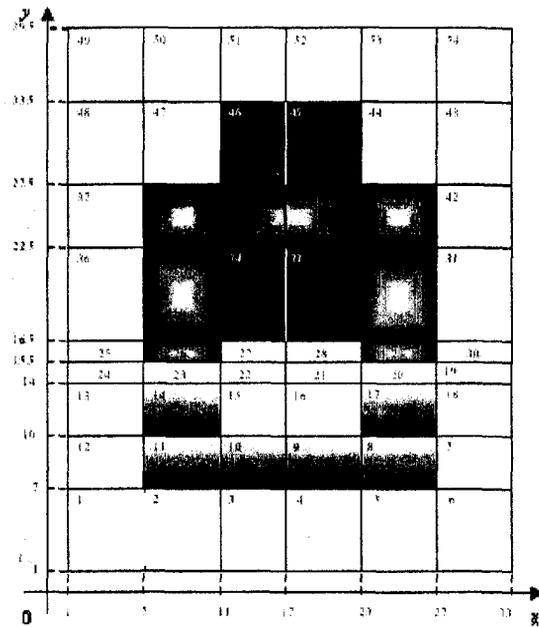


Рисунок 9 – Заполнение сечения асинхронного тягово-подъемного модуля СЭ

Дискретизация характерна полным отсутствием конечных элементов, а для заполнения сечения использовано лишь 54 прямоугольных СЭ типа – SERECD1234. С целью оценки точности КМСФиКЭ в задаче (1) прямоугольные СЭ, введенные в стальных с нелинейными магнитными свойствами, заменены конечно-элементной сеткой. При этом расположенные на их границе узлы использованы для склейки конечно-элементной сетки со СЭ. Один из возможных вариантов заполнения сечения асинхронного тягово-подъемного модуля стандартными и конечными

элементами при нелинейных характеристиках материалов приведен на рисунке 10. Разбиение содержит 25 СЭ и 864 конечных элемента.

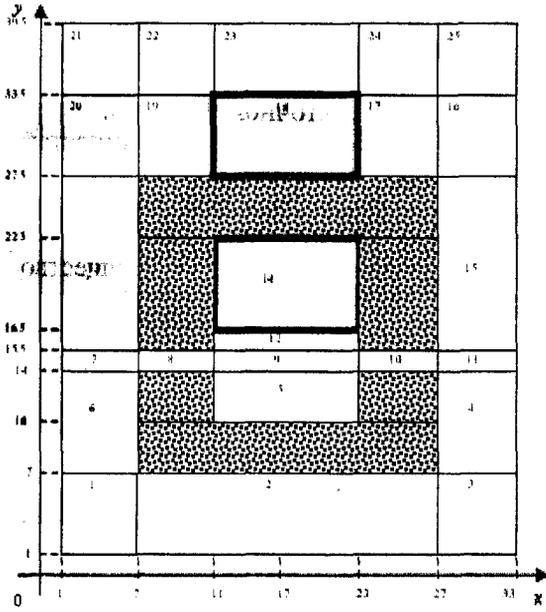


Рисунок 10 – Комбинированная дискретизация сечения ЭМС по методике КМСФиКЭ (25СЭ+864 конечных элемента)

Для расчета векторного потенциала магнитного поля и силовых характеристик применен оригинальный программный пакет *SEMF-CF*, реализованный в программной среде Mathlab. После нахождения распределения потенциала  $A$ , если итерационный процесс не закончен, пакетом вычисляются соответствующие составляющие и модуль индукции в каждом конечном элементе. По кривой намагничивания, аппроксимируемой кубическими сплайн-функциями, находится значение магнитной напряженности  $H^{(r)}$ , также предполагаемой постоянной на каждом конечном элементе, и магнитной проницаемости  $\mu^{(r)} = \frac{B^{(r)}}{H^{(r)}}$ . Таким

образом, производится пересчет магнитной проницаемости стальных элементов магнитопровода. Если итерационный процесс закончен, то

составляющие индукции вычисляются на сторонах СЭ и используются для дальнейшего анализа и вычисления силы. Для решения нелинейной задачи потребовалось 4-6 итераций.

Один из результатов экспериментальных исследований подъемной силы  $F_y$  как функции намагничивающей силы обмотки намагничивания  $iW$  и расчетов ее значений на основе КМГиКЭ и КМСФиКЭ приведен на рисунке 11 и в таблице 1.

Аналогичные расчёты, проведенные при варьировании величины точности конечного результата, также подтвердили, что требуемая точность при использовании КМСФиКЭ достигается при меньшем количестве итераций, чем при использовании КМГиКЭ.

Таблица 1 – Сопоставление расчетных значений  $F_y$  с экспериментальными

$iW$ (А)	$F_y$ (Н)			$\delta$ (%)	
	эксперимент	КМГиКЭ	КМСФиКЭ	КМГиКЭ	КМСФиКЭ
6440	1774	2258	1856	27.28	4.62
9660	4838	5323	5032	10.03	4.01
12880	8226	9387	8620	14.11	4.79

Таким образом:

1. Использование для численного расчета плоскопараллельного магнитного поля КМСФиКЭ в электромеханической системе позволяет значительно сократить степень дискретизации расчетной области.

2. Методика КМСФиКЭ, основанная на совместном использовании коэффициентов Фурье на границах СЭ и узлов конечно-элементной сетки, позволяет обеспечить высокую точность расчетов при малой размерности дискретной модели.

3. КМСФиКЭ позволяет при вычислении значений подъемной силы  $F_y$  использовать коэффициенты разложения потенциала и его нормальной производной в ряд Фурье, вычисленные на границе СЭ, ничего не предполагая о поведении потенциала в СЭ.

4. Применение КМСФиКЭ позволило сократить размерность расширенной матрицы решаемой системы уравнений и обеспечить точность решения, не прибегая к специальным алгоритмам ее формирования (ленточной матрице).

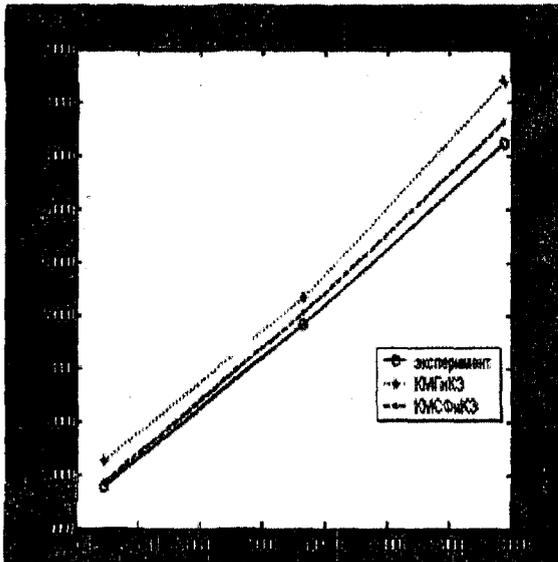


Рисунок 11 – Сопоставление расчетных значений подъемной силы  $F_y$  с экспериментальными при механическом зазоре  $z=0,015$  м.

5. Сравнение погрешностей КМСФиКЭ и КМГиКЭ в расчете силовых взаимодействий в расчетной системе на основе полученных экспериментальных данных показало преимущество КМСФиКЭ по точности.

6. При использовании КМГиКЭ уменьшение толщины тел, величин зазоров и отверстий приводит к существенному замедлению сходимости итерационных процессов. Этого недостатка лишен КМСФиКЭ.

7. Получено приемлемое совпадение результатов расчета подъемной силы с экспериментальными данными в асинхронном тягово-подъемном модуле.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Канторович Л.В., Акилов Г.П. Функциональный анализ. – М.: Наука, 1984. – 752 с.
2. Михлин С.Г. Курс математической физики. – М.: Наука, 1968. – 576 с.
3. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1972. – 724 с.
4. Пашковский А.В. Решение тестовых полевых задач в кусочно-однородной области методом стандартных элементов // Научно-технические ведомости СПбГПУ, 2009. – № 6. – С. 147-151.
5. Сильвестер П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров электриков. – М.: Мир, 1986. – 229 с.
6. Федюков А.Ю. Применение квадратичных треугольных конечных элементов с линейными сторонами при расчете двухмерных квазистационарных магнитных полей // Изв. ВУЗов. Электромеханика, 1988. – № 6. – С. 23-26.
7. Пашковский А.В., Пашковская И.В. МСЭФ в моделировании стационарного поля в области с П-образным сердечником // Изв. ВУЗов. Электромеханика, 2009. – № 2. – С. 10-12.
8. Пашковский А.В. Метод стандартных элементов в расчете магнитного поля линейного двигателя с постоянными магнитами // Научно-технические ведомости СПбГПУ, 2010. – № 2. – С. 130-136.
9. Исследовательские испытания характеристик магнитного поля, силовых взаимодействий и тепловых процессов макета электромагнитного подвеса опытного вагона транспортной линии Ереван-Абавян: протокол № ВС-ТМ2-49-87/ВЭлНИИ. – Новочеркасск, 1987. – 100 с.
10. Косиченко М.Ю. Численное моделирование электромагнитных полей и силовых характеристик в электромагнитных и магнитозлектрических системах комбинированным методом конечных и граничных элементов: дис. канд. техн. наук. – Новочеркасск, 2003. – 181с.

Пашковский Александр Владимирович

Невинномысский технологический институт, филиал ГОУ ВПО «СевКавГТУ», г. Невинномысск

Кандидат технических наук

Доцент кафедры «Информационные системы, электропривод и автоматика»

Тел.: 7-03-84, 8-918-7447-010

E-mail: alecsandr\_607@rambler.ru

М.А. ТАРАСОВА

## ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ БАЗЫ ИНЖЕНЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

*Рассмотрены основные тенденции развития лабораторной базы инженерного образования при современной двухуровневой системе образования. Показано использование реальных лабораторных установок, стендов, комплексов и виртуальных лабораторных практикумов, а также лабораторий удаленного доступа и научно-производственных лабораторий. Показаны задачи по улучшению состояния развития лабораторной базы инженерного образования.*

**Ключевые слова:** инженерное образование; оборудование; виртуальная лаборатория; информационно-коммуникационные технологии; удаленный доступ; научно-производственные лаборатории; методология.

*The basic tendencies of development of laboratory base of an engineering education are considered at modern two-level system formation. Use of real laboratory installations, stands, complexes and virtual laboratory practical works, and also laboratories of remote access and scientifically - industrial laboratories is shown. Problems on condition improvement are shown. Developments of laboratory base of an engineering education*

**Keywords:** an engineering education; the equipment; virtual laboratory; information communication technologies; remote access; scientifically-industrial laboratories; methodology.

Реформа высшего образования направлена на обеспечение качественно нового уровня общенаучной подготовки выпускников университетов, расширения их компетенций. Особая роль при этом отводится техническим вузам, способствующим развитию инновационных наукоемких производств и, как следствие, национальной экономики России [1].

Лабораторный практикум в системе инженерного образования – это потенциально наиболее значимый и результативный компонент естественнонаучной, общей профессиональной и специальной подготовки в области техники и технологий, причем на современной лабораторной базе, и предназначенный для приобретения навыков работы на реальном оборудовании, с аналогами которого будущему специалисту придется иметь дело в своей практической деятельности.

В настоящее время лабораторная база физического практикума и других технических дисциплин первой ступени обучения катастрофически устарела и требует серьезной модернизации. В связи с этим, учебная лабораторная база инженерного практикума развивается в двух направлениях:

- модернизация и использование реальных лабораторных установок;
- применение информационных технологий (ИТ), причем в этом направлении разрабатываются как виртуальные, так и совмещенные с реальными установками лабораторные комплексы.

На рынке продаж лабораторного оборудования успешно работают такие НПО как РНПО «Росучприбор», НПО Учебной техники «ТулаНаучПрибор», Владис, немецкая фирма RHYWE и др.

Технические университеты сотрудничают с НПО и приобретают лабораторное оборудование по общетехническим и специальным дисциплинам, типовые комплекты учебного оборудования, различные технические средства обучения [2]. Учебные

лабораторные установки и комплексы представляют собой полностью законченный и настроенный комплекс. Каждая установка снабжена методическим руководством, включающим теоретическое описание и порядок работы.

Необходимо отметить, что неотъемлемой частью лабораторной работы становится применение компьютерных программ для обработки результатов натурального эксперимента. Среди программ, которые могут обрабатывать результаты, – считать по формулам и строить графики, очень часто выбирают электронные таблицы Excel. Расчет физических величин, нахождение связей между ними и зависимости от различных параметров производят также с помощью программ LabView, Mathcad, MATLAB. Мощный потенциал компьютерной программы может вывести обучение на новый уровень – облегчить поиск и установить взаимосвязи между различными параметрами, научить использовать в работе «инструменты» и навыки из различных областей знания, помочь развить творческие способности.

Лабораторное оборудование, лабораторные стенды по физике и другим инженерным специальностям изготавливаются и на производственных базах таких университетов как МАИ, МГТУ им. Н.Э.Баумана, МЭИ, РУДН и др.[3].

Систематически проводятся выставки такого оборудования под патронажем Министерства образования и науки РФ и Российской академии наук, которые ориентированы на участие небольших фирм-производителей учебной техники, работающих в основном при кафедрах физики вузов России. Задача выставки - показать потенциал кафедр физики, наметить перспективы сотрудничества.

Современное образование во всех его формах немислимо без использования информационных технологий (ИТ). В настоящее время разработан ряд компьютерных продуктов, позволяющих провести успешную модернизацию лабораторного практикума. К таким продуктам относятся, например, среда графического программирования LabVIEW, «Открытая физика 2.6» и др. С помощью этих продуктов можно не только создать виртуальные лабораторные работы, но и объединить в единый лабораторный комплекс компьютер и лабораторную установку и проводить измерения реальных физических величин с помощью компьютера [4]. Такие комплексы производят все ведущие производители лабораторного оборудования.

В ОрелГТУ на базе лаборатории «Новые технологии в образовании» успешно используется пакет «Открытая физика 2.6», разработанный компанией «Физикон», предназначенный для проведения виртуальных лабораторных работ по физике. Разработан виртуальный физический практикум по механике и молекулярной физике с использованием среды графического программирования LabVIEW. Более того, ОрелГТУ располагает полным пакетом программ LabVIEW - 8.6 и уникальным учебно - лабораторным комплексом, оснащенным датчиками, аппаратно-цифровыми преобразователями и системой машинного зрения NI, позволяющие проводить более 70 различных лабораторных работ в режимах программно-управляемого эксперимента. Активно участвуют в разработке лабораторных работ на первой ступени обучения кафедры физики, динамики и прочности машин, мехатроники и международного инжиниринга, прикладной математики и информатики [5].

В Санкт-Петербургском государственном политехническом университете успешно реализована многоуровневая структура обучения студентов физических специальностей на основе LabVIEW-технологии. Для студентов 1-го курса разработаны виртуальные работы, для студентов 2-го курса лабораторные работы на LabVIEW-симуляторах, студенты 2 и 3 курсов сами разрабатывают виртуальные работы и,

наконец, научная работа в рамках бакалаврской и магистерской подготовки выполняется студентами 4 и 5 курсов [6].

На втором уровне обучения на базе фундаментальных знаний формируются образовательные профессиональные компетенции.

Развитие научно-технической базы целесообразно рассматривать в направлении:

- *использование лабораторных комплексов, лабораторных стендов с программным обеспечением, обладающим многофункциональным интерфейсом, способным работать с использованием ИКТ;*

- *создание виртуальной лаборатории;*

- *организация научных и научно-производственных лабораторий.*

Среди производителей лабораторного оборудования для второй ступени обучения выступают РНПО «Росучприбор», НПО Учебной техники «ТулаНаучПрибор», ООО «Инженерно-производственный центр «Учебная техника», НПО «ОВЕН», среди иностранных - фирма National Instruments, ряд немецких фирм.

Однако осуществление опережающего обучения, особенно его практической составляющей, сопряжено с такой трудностью, как непрерывно обновляющаяся номенклатура технических средств и инструментария, которая требует постоянного совершенствования лабораторной базы и разработки методик ее использования в образовательном процессе. Тем не менее, уже сегодня ряд университетов организует такие лаборатории.

Так на кафедре автоматики, электроники и метрологии Ставропольского государственного аграрного университета организована лаборатория опережающего обучения [7]. Выбирая технические средства для переоснащения лабораторий автоматики и электроники, остановились на продукции научно-производственного объединения «ОВЕН» (Москва), успешно внедряющего свои разработки за счет высокого качества и надежности. В вузе реализуется и другой подход к созданию лабораторной базы опережающего обучения. Если в первом варианте использовались приборы и устройства НПО «ОВЕН», а техническое и дидактическое проектирование, монтаж и наладка осуществлялись сотрудниками кафедры, то во втором варианте в основу проектируемых лабораторных стендов легли запатентованные научные разработки преподавателей кафедры.

Пермским государственным техническим университетом, реализующим инновационную образовательную программу, приобретено современное лабораторное оборудование, позволяющее повысить качество образования и эффективность обучения, обеспечить приобретение практических навыков и компетенций обучаемых в различных областях. На базе приобретенного оборудования созданы пилотные варианты учебно-технологических комплексов, основанных на совместном использовании дорогостоящего и уникального оборудования и аппаратно-программных, информационно-измерительных средств, электронных учебных пособий, баз данных, тестовых и контрольных материалов, других электронных образовательных ресурсов. Разработанные учебно-технологические комплексы, помимо всего прочего, включают в себя программное обеспечение для выполнения лабораторных работ, электронные описания работ и прочее. В состав оборудования входят приборы как иностранных, так и отечественных производителей.

Большое значение в подготовке специалистов с техническим образованием имеют лабораторные работы по изучению конструкций технических объектов. Для этой цели создаются специальные учебные кабинеты. Роль таких кабинетов в техническом образовании трудно переоценить. Однако их создание требует длительного времени, а

оснащение и содержание – значительных материальных ресурсов. Например, кабинет конструкции самолетов Самарского государственного аэрокосмического университета (СГАУ) [6] имеет богатую коллекцию агрегатов различных самолетов, которая собиралась более 50-ти лет. Она размещена на площади более тысячи кв. метров, в ее комплектацию и методическую подготовку вложен большой труд не одного поколения преподавателей. Агрегаты препарировались и размещались таким образом, чтобы обеспечить не только первоначальное знакомство с авиационной техникой, но и изучение фундаментальных принципов работы авиационных конструкций и типовых конструкторских решений.

В последние годы в сфере применения ИКТ в образовании появился новый термин «Виртуальная учебная лаборатория» (ВУЛ). ВУЛ для второй ступени инженерного образования могут интегрировать в себя не только виртуальные приборы, но и виртуальные учебные кабинеты конструкций технических объектов, системы математического и имитационного моделирования, учебные и промышленные пакеты прикладных программ, компоненты CALS-систем и т.п. А сами ВУЛ могут использоваться не только в лабораторном практикуме, но и в курсовом и дипломном проектировании, в учебно-исследовательских работах студентов.

В методологическом плане виртуальные лаборатории можно классифицировать, исходя из принятой в системах искусственного интеллекта типологии моделей представления знаний, на системы процедурного, декларативного и гибридного (процедурно-декларативного) типов.

Основу ВУЛ процедурного типа составляют учебные пакеты прикладных программ (ППП) или их промышленные аналоги, предназначенные для автоматизации инженерного труда. При их создании основное внимание обычно обращается на реализацию процедур математического моделирования, расчета и оптимизации изучаемых объектов или процессов.

Большинство технических университетов располагают ВУЛ процедурного типа, например, ОрелГТУ, Пермский государственный технический [8] и др.

ВУЛ декларативного типа сходны по подготовке и работе с ними с электронными учебниками, поскольку знания в них хранятся в готовом, препарированном преподавателем виде. Но их содержательными прототипами являются не первоисточники на бумаге, а натурные экспонаты. В состав виртуальных учебных кабинетов входят структурированные описания технических объектов, внутри которых размещаются графические иллюстрации (фотографии, схемы, рисунки) и гиперссылки, под которыми «спрятаны» дополнительные графические иллюстрации аналогичного типа, либо видео- или аудиофрагменты, анимации [9].

Гибридный подход к построению ВУЛ применяют обычно при разработке виртуальных приборов. При этом внешняя атрибутика, в частности панель управления, отображается визуально адекватно ее реальному аналогу, а различные режимы работы исследуются с помощью математических или имитационных моделей. ВУЛ такого типа могут создаваться не только на базе обычных лабораторных стендов, но и как дополнение лабораторий удаленного доступа. Для выполнения лабораторных работ с удаленным доступом нужно иметь экспериментальный стенд, оснащенный современным оборудованием и управляемый компьютером через Интернет.

Ведущие технические университеты страны располагают лабораториями удаленного доступа, например, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Пермский государственный технический университет, СибГУТИ, Технологический институт Тамбовского

государственного технического университета, Московский технический университет связи и информатики и др.[10].

Дальнейшее развитие лаборатории удаленного доступа получают при подготовке специалистов в области нанотехнологий. В этом случае учащемуся предстоит использовать широкий спектр дорогостоящего и уникального аналитического и технологического оборудования, участвовать в реализации крупных исследовательских и прикладных проектах, а также получить опыт коммерциализации научных разработок.

Положительными тенденциями в инженерном образовании являются создание новых формы интеграции образования с наукой и производством: корпоративные университеты, технопарки, инкубаторы новых технологий, инновационно-технологические центры, инновационно-промышленные комплексы и т.д.[11]. В рамках подобных структур расширяется спектр совместно выполняемых научно-образовательных-производственных проектов, научных исследований и разработок, формируется единое образовательное пространство. Образовательно-научно-производственные комплексы органически синтезируют научные, учебно-педагогические и производственно-технические функции.

Ярким примером в такой интеграции образования с наукой и производством является ОрелГТУ. Университетский учебно-научно-производственный комплекс (УНПК) включает более 50 экспериментально-промышленных предприятий, компаний и научно-инновационных подразделений государственной и акционерной форм собственности. Все подразделения научно-инновационно-производственной инфраструктуры являются базовыми при подготовке специалистов на профильных кафедрах, факультетах ОрелГТУ и в его филиалах. Благодаря коренной реконструкции и переоснащению современным технологическим, контрольно-измерительным и научным оборудованием предприятий УНПК ОрелГТУ в 90-х гг. материально-техническая, экспериментальная и производственная база комплекса стала одной из самых мощных технологических площадок технических вузов России.

Известен и иной способ взаимодействия высшего технического образования и производства. При этом целесообразным является более широкое практическое применение уже известных и успешно используемых в Тамбовском, Курском и других технических университетах «дуальных» технологий профессиональной подготовки инженеров [12]. Речь идет о технологиях, предусматривающих организационный перенос изучения дисциплин специальности и осуществления профессионально-ориентированной деятельности студентов в условия промышленного предприятия. В результате использования такой формы интеграции образования и производства появляется реальная возможность обновления образовательных программ, постоянной актуализации содержания профессиональной подготовки студентов технических специальностей и модернизации образовательных технологий в соответствии с процессами развития современной науки, передовой техники и высоких технологий. При этом формируется образовательно-научно-производственная среда, а соответствующее промышленное предприятие не только обеспечивает себя молодым кадровым пополнением, но и само трансформируется в современную форму «обучающей и обучающейся организации» с высоким уровнем коллективного знания, что является основой для формирования корпоративной компетентности и создания новой конкурентоспособной продукции.

Таким образом, тенденции развития лабораторной базы инженерного образования являются глубокие и всесторонние ее модернизации. Однако

модернизация должна быть направлена не только на приобретение новых приборов, оборудования, программ, но и на разработку методологии формирования лабораторной базы на принципах преемственности и системности. Это позволило бы объединить все лаборатории, например, университета в единый комплекс, задачей которого было бы обеспечение высокого качества компетенций российского инженерного образования на основе применения современных форм обучения, что в свою очередь соответствует требованиям реформы высшего образования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоров И. Инженерное образование: состояние, проблемы, перспективы // Высшее образование в России. – 2008. – №1. – С. 4.
2. РНПО «РОСУЧПРИБОР» [Электронный ресурс]. URL: [www.rosuchpribor.ru/](http://www.rosuchpribor.ru/)
3. Специализированный портал «ПОЛИТЕХНИЧЕСКАЯ ИНТЕРНЕТ-ЛАБОРАТОРИЯ» URL:[www.pilab.ru](http://www.pilab.ru).
4. Карпов Ю.Г., Филанович А.Н., Познер А.А. Использование современных компьютерных технологий для модернизации лабораторного физического практикума по механике и молекулярной физике // Школа и Вуз: Достижения и проблемы непрерывного физического образования: сборник трудов V Российской научно - методической конференции преподавателей вузов и учителей школ. – Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2008. – С. 260-263
5. Грядунов И.М., Тарасова М.А. Разработка программного приложения поддержки проведения лабораторных работ по курсу «Квантовая физика» средствами LabVIEW // Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments: сборник трудов VII научно-практической конференции. – М.: РУДН, 2008. – С.281-284.
6. Приходько А.В. Концепция внедрения виртуального и натурального практикума по физике в российскую образовательную среду на основе технологий компании National Instruments // Школа и Вуз: Достижения и проблемы непрерывного физического образования: сборник трудов V Российской научно-методической конференции преподавателей вузов и учителей школ. – Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2008. – С. 235-238
7. Минаев И., Вострухин А., Вахтина Е., Ушкур Д. Создание лабораторной базы опережающего обучения // Высшее образование в России. – № 9. – 2008. – С. 10-15.
8. ПГТУ [Электронный ресурс]. URL: [www.pstu.ru](http://www.pstu.ru).
9. Краевский И.Г. Виртуальные практикумы для открытого образования // Телематика, 2002: Труды Всероссийской научно-методической конференции. – Санкт-Петербург: СПбГИТМО, Москва: ГосНИИ ИТТ «Информика», 2002. – С. 299-300.
10. Малыгин Е.Н., Краснянский М.Н., Карпушкин С.В., Мокрозуб В.Г. Лаборатория удаленного доступа в системе открытого инженерного образования // Научно-практический журнал «Открытое образование», 2004. – № 1. – С.32-38.
11. Матухин Е., Сазонова З. Единство образования, науки и производства как принцип современной инженерной педагогики // Высшее образование в России.– № 9. – 2008. – С. 15-22.
12. Хильзе Х. Вклад корпорационных университетов в менеджмент знаний на предприятиях // Проблемы теории и практики управления – №6. – 2001. – С. 10-15

**Тарасова Маргарита Александровна**

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Физика»

Тел.: (4862) 41-98-89

E-mail: [martar1@yandex](mailto:martar1@yandex)

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ И ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 004.89+004.021

В.И. АВЕРЧЕНКОВ, П.В. КАЗАКОВ

### ЭВОЛЮЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ ПОИСКА РЕШЕНИЙ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ИНВЕСТИЦИОННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

*Рассматривается решение задачи определения оптимального состава инвестиционного портфеля с помощью кластерного расширения генетического алгоритма. Его применение позволяет эффективно решать данную задачу как многоэкстремальную с учетом прогнозируемых значений доходности и риска инвестиционного планирования. Представлены результаты практического применения генетического алгоритма для определения оптимального инвестиционного портфеля на основе фактических данных.*

*Ключевые слова:* инвестиционный портфель; эволюционное моделирование; кластерное расширение генетического алгоритма; многоэкстремальная оптимизация.

*The problem solving of the search an optimal investment portfolio is considered. It is used the cluster extension of a genetic algorithm. Its using allows effectively to solve a such problem as multimodal and allow for a yield and a risk of an investment planning. The results of practical using the cluster extension of a genetic algorithm for search an optimal investment portfolio with a factual investment data are presented.*

*Keywords:* investment planning; evolutionary computations; cluster extension of genetic algorithm; multimodal optimization.

#### ВВЕДЕНИЕ

Одним из ключевых факторов успешного увеличения доходности юридических физических лиц является эффективное инвестирование средств в ценные бумаги. В сложившейся мировой практике фондового рынка эта задача связана с управлением портфелем ценных бумаг или инвестиционным портфелем (ИП) [1-4]. Его целью является повышение качества инвестирования в виде надежного сбережения капитала или получение максимального дохода при допустимом риске. При этом предполагается наличие у инвестора определенной суммы денег, которую необходимо распределить по различным альтернативным вложениям (акциям, облигациям, иностранной валюте и др.), вместе обладающим такими инвестиционными характеристиками, которые недостижимы с позиций отдельно взятой ценной бумаги. Распределение средств следует произвести таким образом, чтобы доходность портфеля была максимальна, а возможный риск убытков минимален. В зависимости от инвестиционных свойств ценных бумаг могут быть сформированы различные инвестиционные портфели, в каждом из которых будет собственный баланс между существующим риском, приемлемым для владельца портфеля и ожидаемой доходностью в определенный период времени. Таким образом, изменяя состав ИП можно регулировать направление выбранной инвестиционной стратегии, среди целей которой могут быть:

- максимизация роста капитала;
- максимизация роста дохода;
- минимизация инвестиционных рисков;
- обеспечение требуемой ликвидности инвестиционного портфеля.

Вместе с этим инвестор может более конкретно определить критерии отбора вложений в инвестиционный портфель и его оценки. В частности, могут быть заданы

предельные значения капитальной стоимости, дохода, уровня допустимых инвестиционных рисков, ликвидности. Различие видов активов в составе ИП, целей и условий инвестирования позволяет классифицировать инвестиционный портфель по соотношению доходность/риск. Среди основных типов ИП выделяют портфель роста, портфель дохода, консервативный портфель, портфель высоколиквидных инвестиционных активов [3]. Названия каждого из перечисленных типов ИП во многом отражают возможные предпочтения потенциальных инвесторов. Одной из главных рекомендаций при формировании ИП независимо от вида является наличие в нем различных слабокоррелирующих активов [1-3].

Такой инвестиционный портфель называется диверсифицированным. Установлено, что максимальное снижение риска достигается, если в портфель отобраны от 10 до 15 различных ценных бумаг [4].

Принимая во внимание постоянное динамичное и часто плохо предсказуемое изменение финансового рынка, особенно в условиях международного экономического кризиса, возникает потребность в адекватной корректировке инвестиционного портфеля с целью нахождения той грани между ликвидностью, доходностью и риском, которая позволит найти оптимальный состав ИП. В связи с этим актуальным является развитие компьютерных методов автоматизации и повышения качества решения данной задачи. Анализ основных моделей оптимизации ИП [1-3] позволяет сделать вывод об ограниченном применении к ним традиционных численных методов, особенно при потребности в определении множества оптимальных решений. Прежде всего, это связано с наличием у моделей оптимизации ИП множества одновременно оптимизируемых переменных, критериев, а также комбинаторных свойств, делающих процесс поиска NP-полным. В связи с этим перспективным является применение адаптивных оптимизационных методов эволюционного моделирования, инвариантных к типам математических моделей и их сложности, а именно, генетических алгоритмов [5, 6]. Их использование позволяет с высокой точностью и за приемлемое время определять не одно, а множество оптимальных решений задачи оптимизации ИП по соотношению доходность/риск. Для этого может быть эффективно использовано кластерное расширение генетического алгоритма [7], показавшее высокое качество поиска при решении тестовых задач в сочетании с несложной настройкой дополнительных управляющих параметров.

### **МОДЕЛЬ И ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ ИНВЕСТИЦИОННОГО ПОРТФЕЛЯ**

В общем случае модель оптимизации ИП предполагает наличие множества Парето-оптимальных решений при оценке соотношения «доходность-риск», расположенных на так называемой границе эффективности инвестиционных портфелей [2]. Данная модель предложена Г. Марковицем [2] и является основной в теории инвестиционного портфеля. Однако эта модель характеризуется высокой вычислительной трудоемкостью в плане применения численных методов оптимизации. Из-за наличия комбинаторных свойств задача оптимизации ИП на основе модели Г. Марковица относится к NP-сложным – варьируя доли финансовых активов в ИП, можно сформировать их бесконечное множество с собственным балансом между ожидаемой доходностью и риском. В связи с этим данная модель обычно применяется с априорным заданием экспертом значений доходности или риска. В этом случае решением задачи является ИП, соответствующий максимальной доходности при заданном риске, либо ИП с минимальным риском при заданной доходности. Также используются другие модели оптимизации и выбора ИП, в частности, У. Шарпа,

Д. Тобина [3]. Их особенностью является наличие определенных упрощений относительно модели Г. Марковица прежде всего для снижения объемов вычислений. Однако это приводит к усложнению их адаптации к реальным инвестиционным условиям, а вынужденные упрощения в этих моделях снижают точность полученного результата.

В связи с этим предлагается новый способ решения задачи ИП, основанный на модели Г. Марковица [2], но с некоторой модификацией, предполагающей многоэкстремальную оптимизацию по критерию «доходность», с последующим вычислением риска для найденных ИП (возможен и обратный вариант, когда многоэкстремальная оптимизация выполняется по риску, а затем вычисляется доходность ИП). Следуя целям автоматизации решения данной задачи, а также учитывая доступные фактические данные по финансовым активам, предлагаемым на рынке ценных бумаг, эта модель была без потери общности скорректирована и имеет следующий вид:

$$J = \max \sum_{i=1}^n \bar{\gamma}_i \frac{\alpha_i x_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i x_i}, \quad \sum_{i=1}^n x_i \alpha_i \leq U, \quad (1)$$

где  $U$  – объем финансовых средств для формирования инвестиционного портфеля;

$\alpha_i$  – начальная стоимость одной единицы ценных бумаг вида  $i$ ;

$x_i$  – объем приобретаемых финансовых активов вида  $i$ ;

$x_i \in [x_i^-, x_i^+]$  – нижняя и верхняя граница объемов ценной бумаги вида  $i$ ;

$\bar{\gamma}_i$  – ожидаемая средняя доходность по  $i$ -му активу;

$\frac{\alpha_i x_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i x_i}$  – удельный вес стоимости  $i$ -го актива в ИП;

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i x_i$$

$i$  – число различных финансовых активов в ИП (далее  $n = 15$ );

$f^*$  – оптимизируемая функция доходности ИП с оптимальным значением  $f^*$ .

Значения  $\bar{\gamma}_i$  в выражении (1) рассчитываются на основе известного диапазона колебаний доходности финансового актива  $i$  за  $k$  периодов наблюдений (например, по факту проведения торгов на фондовой бирже) от минимального  $\gamma_i^-$  до максимального  $\gamma_i^+$ . При этом экспертом учитываются вероятности получения граничных и промежуточных значений доходности  $P(\gamma_{i,j})$ :

$$\bar{\gamma}_i = \sum_{j=1}^k \gamma_{i,j} P(\gamma_{i,j}),$$

$$\text{где } \gamma_i^- \leq \gamma_{i,j} \leq \gamma_i^+ \text{ – доходность актива } i \text{ за период } j; \quad \sum_{j=1}^k P(\gamma_{i,j}) = 1.$$

При формировании ИП кроме доходности также учитывается уровень его риска как в целом, так и по отдельным активам.

Риск (дисперсия) портфеля из  $n$  активов рассчитывается по следующей зависимости:

$$\sigma_R^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n y_i y_j C_{i,j}, \quad (2)$$

где  $C_{ij}$  – ковариация доходности активов, входящих в ИП;

$y_i, y_j$  – удельные веса активов в общей стоимости ИП.

В свою очередь, показатель ковариации между двумя активами  $A, B$  определяется по формуле [1]

$$C_{A,B} = \frac{\sum_{j=1}^k (y_j^A - \bar{y}^A) \cdot (y_j^B - \bar{y}^B)}{k}, \quad (3)$$

где  $y_j^A, y_j^B$  – доходности активов  $A, B$  в  $j$ -м периоде;

$\bar{y}^A, \bar{y}^B$  – средняя доходность активов  $A, B$  за  $k$  периодов.

Появление множества оптимальных решений связано не только с тем, что возможно более одного варианта состава ИП с максимальной доходностью. Также к набору оптимальных ИП могут быть добавлены те, которые имеют доходность несколько ниже (величина определяется экспертом), но в сочетании с меньшим риском, чем у лучших по доходности ИП. Здесь принимается во внимание тот факт, что окончательный выбор ИП будет производиться экспертом одновременно по двум критериям: доходность, риск. Таким образом, особенностью модифицированной модели Г. Марковица является отсутствие необходимости изначального задания инвестором главных характеристик ИП – значений желаемой доходности и допустимого риска, что далеко не всегда можно сделать из-за стохастически изменяющихся инвестиционных условий.

Возможности существующих традиционных численных методов для многоэкстремальной комбинаторной оптимизации в многомерных поисковых пространствах являются очень ограниченными как по точности, так и по времени поиска. Поэтому для автоматизации поиска вариантов оптимальных ИП применялось кластерное расширение генетического алгоритма (КГА) [7], показавшего высокую эффективность решения тестовых задач многоэкстремальной оптимизации. КГА реализует в себе принципы поддержки разнообразия популяции в процессе генетического поиска за счет кластеризации хромосом с точки зрения близости кодируемых ими решений.

Под кластером хромосом понимается группа решений, имеющих похожие свойства, то есть кодирующие их хромосомы с похожим фенотипом. Для определения меры близости между хромосомами могут быть использованы как вещественная (Евклидова), так и бинарная (Хемминга) метрики. Число кластеров зависит от задаваемого в качестве дополнительного управляющего параметра КГА радиуса гиперсферы кластера  $R_c$ . Хромосомы, располагающиеся в пределах  $R_c$  до центроида кластера, рассматриваются как похожие и принадлежащие этому кластеру. Подпопуляция найденных центроидов кластеров представляет собой механизм поддержания разнообразия популяции для параллельного исследования всех областей поискового пространства. С ее обработкой связаны две дополнительные вычислительные процедуры – выделения и копирования кластеров (рис. 1).

Первая состоит в определении в текущей популяции некоторого числа кластеров, определяемых координатами центроидов (по размерности пространства решений). Каждый из них соответствует хромосоме, доминирующей (то есть имеющей лучшее значение fitness-функции) другие – находящиеся от центроида в пределах расстояния  $R_c$ . Центроиды найденных кластеров сохраняются в отдельной подпопуляции. Основная популяция подвергается применению генетических операторов и, следовательно, изменяется. Поэтому найденные кластеры теряются. Для

предотвращения этого предварительно сохраненные центроиды по специальному алгоритму копируются в новую популяцию, тем самым направляя генетический поиск в соответствующие участки поискового пространства. Отмеченные процедуры, расширяющие возможности стандартного генетического алгоритма для решения задач многоэкстремальной оптимизации увеличивают его временную сложность вычислений. Исследование этого для разных случаев работы КГА показало, что добавочная сложность относительно невелика и изменяется от линейной до квадратичной в зависимости от значения  $R_c$ .



Рисунок 1 – Структура кластерного расширения генетического алгоритма

## РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ КЛАСТЕРНОГО РАСШИРЕНИЯ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Перед использованием генетического алгоритма создавалась эволюционная модель задачи оптимизации ИП [6]. Каждый вариант инвестиционного портфеля кодировался отдельной хромосомой из 15-ти двоичных генов (по числу активов в портфеле) фиксированной разрядности (рис. 2). Для определения оптимальности хромосомы была сконструирована fitness-функция, учитывающая специфику решаемой задачи, а именно: получение максимальной итоговой доходности по ИП, желание ЛПР «вложить» в ИП всю сумму или получить некоторый остаток денежных средств после формирования ИП, а также наличие или отсутствие контроля за превышением объема выделенных средств для формирования ИП. Последнее предполагает возможность увеличения начальных размеров капиталовложений для приобретения дополнительного числа ценных бумаг по перспективному, с точки зрения доходности, активу»

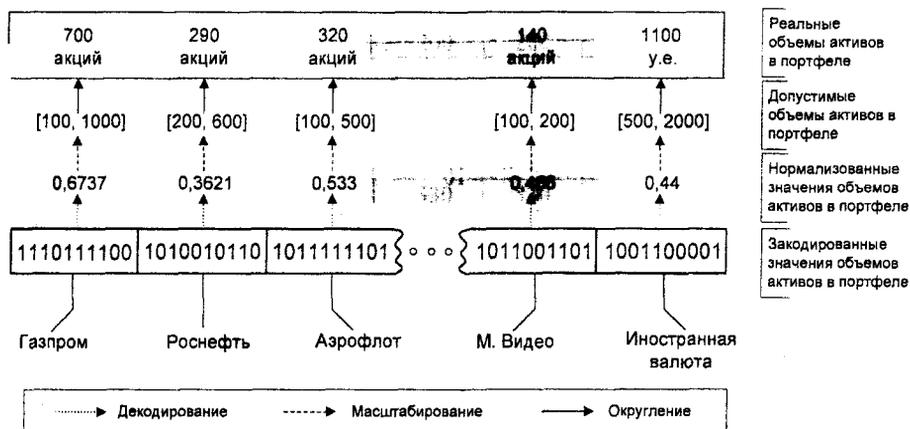


Рисунок 2 – Закодированный в виде хромосомы вариант инвестиционного портфеля

В качестве тестового примера для исследования работы КГА использовались фактические данные [8], выбранные на основе анализа динамики за определенный

период индексов и котировок ценных бумаг (таблица 1). В данном случае проверялось выполнение условия наличия положительной доходности активов в течение одного месяца, а также учитывался коэффициент корреляции доходности активов. Для оценки риска брались результаты торгов ценными бумагами в течение трех месяцев.

С целью получения наилучших результатов при поиске решения в сочетании с высоким быстродействием выполнялась настройка КГА. Анализ результатов настройки КГА позволили сделать вывод о локализации различного числа оптимальных решений в зависимости от конфигурации КГА. Здесь к оптимальным относились хромосомы, у которых значения fitness-функции были не более, чем на 0,2% хуже в сравнении с самой лучшей хромосомой в последней популяции. Большое влияние на эффективность поиска оказало соотношение параметров размер популяции и радиус кластера. Важным является определение таких их значений, чтобы сохранялся баланс между разнообразием популяции и направленным характером генетического поиска. На рисунке 3 показаны результаты работы программы оптимизации инвестиционного портфеля, приведены значения управляющих параметров генетического алгоритма, также число найденных ИП, граничные значения их доходности и риска.

Таблица 1 – Параметры инвестиционного портфеля

№	Название актива	Начальная стоимость (руб.)	Ожидаемая доходность (%)	Минимальное число ценных бумаг в портфеле	Максимальное число ценных бумаг в портфеле
1	Газпром	104	7	100	1000
2	Роснефть	108	8	200	600
3	Аэрофлот	24	3	100	500
4	Объединенные машиностроительные заводы	150	12	100	500
5	Заволжский моторный завод	62	15	100	500
6	Новолипецкий металлургический комбинат	30	5	200	700
7	Приволжское морское пароходство	5	15	100	500
8	Брянская сбытовая компания	12	10	300	700
9	Калужская сбытовая компания	13	10	200	600
10	Мобильные Телесистемы	114	5	200	500
11	РБК информационные системы	13	12	300	800
12	ДИКСИ	56	11	100	500
13	Сбербанк	18	5	100	600
14	М.Видео	26	6	100	200
15	Иностранная валюта (€)	39	7	500	2000

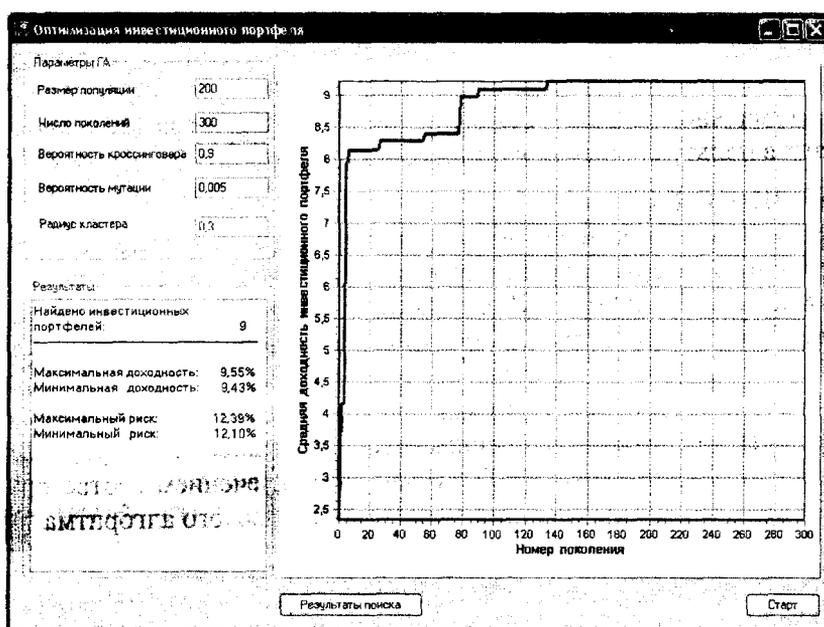


Рисунок 3 – Результаты работы программы оптимизации ИП

максимальное количество найденных оптимальных ИП составило девять портфелей. Для полученных таким образом инвестиционных портфелей далее были определены возможные риски (таблица 2).

Таблица 2 – Варианты оптимальных инвестиционных портфелей

№ АКТИВА	ИП1	ИП2	ИП3	ИП4	ИП5	ИП6	ИП7	ИП8	ИП9
1	280	280	280	280	110	280	110	280	280
2	570	500	500	500	510	500	510	500	500
3	130	130	130	130	120	130	130	130	130
4	390	390	390	390	400	390	390	390	390
5	460	470	460	470	250	470	410	460	190
6	260	260	260	260	610	260	600	260	260
7	490	490	490	490	490	490	490	490	490
8	360	640	360	640	630	640	660	360	640
9	550	320	550	320	560	340	280	560	550
10	200	200	200	200	200	210	200	200	200
11	790	740	740	740	740	750	790	740	740
12	160	500	500	500	490	160	160	220	470
13	120	120	170	170	100	300	170	420	120
14	100	100	110	180	180	130	180	150	100
15	510	620	580	530	530	590	630	590	640
Доходность, %	9,55	9,54	9,53	9,52	9,45	<b>9,44</b>	9,44	9,44	9,43
Риск, %	12,39	12,2	11,65	11,58	11,74	<b>10,37</b>	11,62	11,27	12,1

Анализ найденных вариантов ИП позволяет сделать вывод, что ни один из них не является оптимальным одновременно по доходности и риску. Поэтому полученные результаты далее должны быть предъявлены эксперту, который, учитывая вероятности рисков для каждого из найденных ИП, а также дополнительные условия инвестиционного планирования (пассивная или активная стратегия управления ценными бумагами), выработает окончательную рекомендацию для потребителя

инвестиционного портфеля. Так, в таблице 2 выделен состав ИП, обеспечивающий приемлемую (относительно других вариантов) доходность при минимальном риске. В случае возникновения ситуации, когда эксперта не устроят уровни риска по найденным ИП с оптимальной доходностью, предельные значения доходности могут быть уменьшены в пользу снижения итогового риска ИП.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Применение генетического алгоритма для решения задачи оптимизации инвестиционного портфеля позволило автоматизировать процесс планирования инвестиционных средств. Для поиска различных оптимальных составов инвестиционных портфелей применялось кластерное расширение генетического алгоритма. Варьирование значения параметра радиус кластера позволяет настраивать КГА на локализацию как группы глобальных, так и множества различных субоптимальных решений. Дальнейшее совершенствование информационной системы синтеза и выбора оптимального ИП связано с привлечением соответствующих методов экспертного оценивания результатов работы генетического алгоритма.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Серов В.М. Инвестиционный менеджмент. – М.: ИНФРА-М, 2000. – 272 с.
2. Markowitz H.M. Portfolio Selection: Efficient Diversification of Investments. – New York: John Wiley & Sons, 1959. – 344 p.
3. Шарп У. Инвестиционный менеджмент / У. Шарп, Г. Александер, Д. Бейли. – М.: ИНФРА-М, 2003. – 257 с.
4. Мищенко А.В., Попов А.А. Некоторые подходы к оптимизации инвестиционного портфеля // Менеджмент в России и за рубежом. – 2002. – №2.
5. Гладков Л.А. Генетические алгоритмы / Л.А. Гладков, В.В. Курейчик, В.М. Курейчик. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 320 с.
6. Аверченков В.И., Казаков П.В. Эволюционное моделирование и его применение монография. – Брянск: БГТУ, 2009. – 200 с.
7. Казаков П.В. Кластерное расширение генетического алгоритма для решения многоэкстремальных задач оптимизации // Информационные технологии. – 2009. – №8. – С. 33-38.
8. Социальная сеть инвесторов [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://tikr.ru>

#### **Аверченков Владимир Иванович**

Брянский государственный технический университет, г. Брянск  
Доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Компьютерные технологии и системы»  
Тел.: 8(4832)58-82-06  
E-mail: [aver@tu-bryansk.ru](mailto:aver@tu-bryansk.ru)

#### **Казаков Павел Валерьевич**

Брянский государственный технический университет, г. Брянск  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Компьютерные технологии и системы»  
Тел.: 8(4832)58-82-06  
E-mail: [pvk\\_mail@list.ru](mailto:pvk_mail@list.ru)

УДК 519.711.3:519.21:19.67

Т.Д. КАРМИНСКАЯ

## ПОДХОДЫ К УПРАВЛЕНИЮ СИСТЕМОЙ ПОДГОТОВКИ КАДРОВ ДЛЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*Разработана (с использованием нейронных сетей, нечетких множеств, адаптивного самонастраивающегося алгоритма оптимизации и алгоритмов прогнозирования) комплексная гибридная модель прогнозирования потребностей региональной экономики в квалифицированных кадрах трех уровней профессионального образования (высшего, среднего и начального) и модель оптимизации структуры региональной сети учреждений профессионального образования, разработан пакет программ и получены численные результаты. Методология, основанная на прогнозирующих нейронных сетях и аналитических подходах, представляет новый научный подход адаптивного управления системой подготовки кадров, ориентированной на актуальные потребности региональных экономик.*

**Ключевые слова:** управление подготовкой кадров; пакет программ; нейронные сети; гибридная модель прогнозирования; модель оптимизации

*Based on neural network models, fuzzy sets, adaptive self-adjusting algorithm for multidimensional global optimization, and prediction algorithm a hybrid model to forecast the regional demand for qualified personnel of three educational levels (higher, secondary, primary professional education), optimization model, programme package have been developed, numerical results have been obtained.*

**Keywords:** management model; neural network models; optimization model; hybrid model; programme package.

Система профессионального образования и практика управления системой образования в современном виде не в полной мере отвечают потребностям экономики. Вопросы приведения системы подготовки кадров в соответствие с потребностями современной инновационной экономики страны широко обсуждаются в различных целевых аудиториях и на разных уровнях.

Задача становления качественной системы подготовки кадрового потенциала особенно актуальна для регионов, которые играют ведущую роль в общероссийской экономике, обеспечивают стабильность в стране и обладают большими потенциальными возможностями промышленного роста. Формирование сети федеральных вузов, является убедительным доказательством важности и актуальности задачи формирования эффективных систем профессионального образования в регионах.

Вопросы качественной подготовки кадров непосредственно на территории расположения промышленных кластеров актуальны в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре. Система профессионального образования округа представлена сетью из 5 учреждений высшего профессионального образования (ВПО), 23 учреждений среднего и начального профессионального образования (СПО), другими учреждениями дополнительного образования. Сегодня численность обучающихся в системе профессионального образования округа составляет ВПО – более 48 тысяч человек, СПО и НПО – более 21 тысячи человек. Формирующийся рынок труда, стабилизация которого ожидается, начиная с 2015 года, диктует потребность в постоянном притоке специалистов на рынок труда и высокой «гибкости» профессионального образования для реагирования на непрерывно изменяющиеся потребности экономики.

Для эффективного управления региональной системы образования автономного округа необходимо разработать комплекс методов и механизмов, позволяющих прогнозировать и уточнять структуру квалификационных запросов регионального рынка труда, настраивать в соответствии с актуальными потребностями региональной экономики структуру системы подготовки кадров.

Для эффективного управления региональной системой профессионального образования автономного округа необходимо разработать комплекс методов и механизмов, позволяющих прогнозировать и уточнять структуру квалификационных запросов регионального рынка труда, настраивать в соответствии с актуальными потребностями региональной экономики структуру, содержание и требования к условиям функционирования системы подготовки кадров. Таким образом, система профессионального образования является представителем класса больших и сложных систем. Следовательно, для ее анализа необходимо применять специфические методы, основанные на синтезе процедур системного анализа, прогнозирования и оптимизации. Кроме того, при исследовании проблем управления сложными системами актуальным является использование нейросетевых моделей. Способность нейронных сетей после обучения к обобщению создает потенциальные предпосылки для построения на их базе различного рода прогнозирующих систем. Особенно это целесообразно, если есть возможность выделения определенной устойчивой структуры объекта и выявления определенных статистических зависимостей между элементами системы, что характерно для системы профессионального образования. Нейронная сеть является универсальным аппроксиматором и способна осуществить любое отображение входных сигналов в выходные со сколь угодно заданной точностью. Использование нейросетевых моделей в сочетании с современным уровнем средств вычислительной техники позволяет процедуру обработки знаний включить в контур создаваемых систем, обеспечивая высокое качество их работы в условиях неполноты, нечеткости и неопределенности поступающей входной информации, тем самым реализуется интеллектуальный подход в управлении [1].

Разработана прогнозирующая модель, которая количественно описывает связи между участниками динамической системы «образование-рынок труда и экономика» и представляет собой гибридную систему [2]. Гибридная система включает: математические балансовые модели спроса и предложения на рынке труда и рынке образовательных услуг, эффективный алгоритм многопараметрической глобальной оптимизации и модели прогнозирования потребностей в специалистах, соотнесенных к принятой в РФ классификации 28 укрупненных групп специальностей (УГС) на нейронных сетях и нечетких множествах [2,3].

Последовательно решены задачи:

1. Прогнозирование временных рядов, нейронными сетями и нечеткими моделями;
2. Определения среднегодовой численности работников в 13 отраслях экономики и промышленности по 7 уровням профессионального образования ХМАО;
3. Определения коэффициентов ротации для занятого населения в зависимости от уровня образования и отрасли экономики;
4. Определения потребности экономики региона по 28 укрупненным группам специальностей с разным уровнем профессионального образования.

В качестве исходных данных при разработке и отладке прогнозирующих алгоритмов были использованы статистические данные по Ханты-Мансийскому автономному округу.

Для определения потребности региона в профессиональных специалистах разного образовательного уровня вводим запланированные по годам, отраслям экономики и уровням образования валовые региональные продукты (ВРП)  $X_{o,j}(l)$ ,  $j=1, \dots, 13; l=1, \dots, k$ . Здесь  $k$  – задает горизонт прогноза,  $j$  – номер отрасли,  $O$  – обозначает уровни образования:  $B$  – высшее,  $НВ$  – неполное высшее,  $C$  – среднее профессиональное,  $H$  – начальное профессиональное,  $СП$  – среднее полное,  $ОО$  – основное общее и  $НО$  – начальное общее. Планируемые значения ВРП различаются по годам, отраслям и образовательным уровням занятых в экономике. Для реализации запланированных значений ВРП, при наличии соответствующих основных фондов и инвестиций, требуется определенное распределение количества специалистов с 7 образовательными уровнями во всех 13 отраслях экономики. Обозначим эти неизвестные матрицей:

$$\beta = \{\beta_{i,j}, i=1, \dots, 7; j=1, \dots, 13\}.$$

Модель выпускаемого валового регионального продукта с участием специалистов с разными образовательными уровнями в отраслях экономики представляется в виде:

$$XM_{i,j}(\beta, l) = \gamma_{i,j} \cdot w_j(l) \cdot \beta_{i,j} / (\beta_{i,j} \cdot k_{r,j}(l) - 0,04), i=1, \dots, 7, \quad (1)$$

где  $j=1, \dots, 13$  – число отраслей экономики округа;  $l$  – прогнозируемый год;  $\gamma_{i,j}$  – величины, характеризующие производительности труда занятых в отраслях экономики с разными уровнями образования. Они вычисляются по формулам:

$$\gamma_{i,j}(l) = \frac{X_j(l) \cdot a_{i,j}(l)}{w_j(l) \cdot a_{i,j}(l)}, \quad (2)$$

где  $w_j(l)$  – число занятого населения в отраслях экономики региона по годам;  $a_{i,j}(l)$  – элементы матрицы распределения занятого населения в 13 отраслях экономики округа по 7 уровням образования и по годам (решение задачи 2);  $X_j(l) \cdot a_{i,j}(l)$  – доля валового регионального продукта отраслей экономики с участием людей с разными уровнями образования;  $w_j(l) \cdot a_{i,j}(l)$  – доля работников с разными уровнями образования в отраслях экономики.

Для оценивания матрицы параметров  $\beta$  используется адаптивный алгоритм [4]. Полученные оценки векторов  $\hat{\beta}_{1,j}, \hat{\beta}_{2,j}, \hat{\beta}_{3,j}, j=1, \dots, 13$  позволяют получить спрогнозированные значения выпуска профессиональных специалистов по 28 укрупненным группам специальностей трех уровней:

$$Pt_B(l)_{j,v} = a_{j,v}(l) \cdot w_j(l) \cdot \hat{\beta}_{1,j}(l),$$

$$Pt_C(l)_{j,v} = a_{j,v}(l) \cdot w_j(l) \cdot \hat{\beta}_{3,j}(l),$$

$$Pt_H(l)_{j,v} = a_{j,v}(l) \cdot w_j(l) \cdot \hat{\beta}_{4,j}(l),$$

где  $j=1, \dots, 13; v=1, \dots, 28, l=1, \dots, k$ , соответствующие потребностям запланированных значений валового выпуска регионального продукта по годам, отраслям и уровням образования.

С использованием разработанного метода определен прогноз потребности экономики округа в специалистах с ВПО, СПО и НПО по 28 укрупненным специалистам на 2007 год, человек (Таблица 1.)

Таблица 1– Прогноз потребности экономики округа в специалистах с ВПО, СПО и НПО

2007	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
ВПО	492	420	877	127	801	392	179	1085	316	168	57	0	562	659	
СПО	133	60	1668	149	1831	4564	1123	5515	0	1096	1345	399	1420	2139	
НПО	0	2	33	0	0	0	185	969	0	1453	529	0	229	591	
2007	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	Сумма
ВПО	273	95	25	0	177	147	171	275	666	199	23	41	698	211	9137
СПО	1077	246	0	0	1086	93	737	1692	2630	221	169	753	1083	185	31413
НПО	548	0	0	88	2390	10	227	0	209	8	17	462	3229	0	11180

Все результаты получены с использованием ПО Statistica7.0 и методом нечетких множеств с использованием ПО Matlab Version 7.0.1. Проведен анализ сходимости результатов прогнозируемой и заявленной потребности в 2007 году, который показывает соотношение прогнозируемой потребности специалистов в 2007 год и заявленной потребности в Департамент занятости населения автономного округа на примере 2007 года.

Прогнозируемая посредством предлагаемого метода структура потребности экономики округа в квалифицированных кадрах хорошо коррелируется со структурой заявок в центры занятости населения Ханты-Мансийского автономного округа (рисунок 1)..

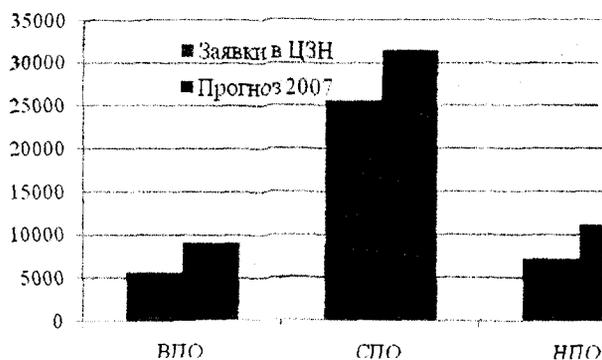


Рисунок 1 – Соотношение прогнозируемой и заявленной потребности на специалистов 2007 года

Следующим этапом исследования явился анализ соответствия структуры подготовки специалистов, которую может обеспечить система профессионального образования округа, прогнозируемой потребности. Проведенные исследования выявили несоответствия между реальной структурой подготовки специалистов системой образования округа и прогнозируемой потребности. Следовательно, необходимо разработать модель, позволяющую выявлять существенные факторы, обуславливающие выпуск специалистов и определять эффективные управляющие действия совершенствования региональной системы образования, позволяющих приблизить структуру выпуска специалистов к структуре потребностей регионального рынка труда.

Построена регрессионная модель, описывающая корреляционные зависимости между результативным показателем (выпуск специалистов учреждениями ВПО) и рядом факторных показателей. С использованием аппарата искусственных нейронных сетей рассматривается задача моделирования выпуска специалистов с точки зрения его структуры, т.е. по направлениям подготовки. Для этого решены задачи:

1) Структуризация нейронной сети управления подсистемой ВПО округа в рамках построенной типовой регрессионной модели.

2) Обучение нейронной сети с целью уточнения весовых коэффициентов (коэффициентов регрессии) регрессионной модели применительно к подсистеме ВПО ХМАО-Югры.

3) Оптимизация параметров модели с учетом прогнозируемой или заявленной потребности региона в специалистах с высшим профессиональным образованием для существующей структуры подготовки системы профессионального образования округа.

На первом этапе решается задача формирования некоторого множества нейросетевых моделей (моделей – кандидатов) и определение на их основе вектора входных переменных (регрессора), а также внутренней структуры нейронной сети (числа скрытых слоев и количества нейронов в каждом скрытом слое). Таким образом, решается задача идентификации системы. Реальная управляемая система профессионального образования представлена совокупностью учреждений, для которых входные и выходные параметры полностью ограничены одним функциональным уровнем. Для такого типа систем наиболее адекватным будет использование двухслойных нейронных сетей (слой выходных параметров и скрытый слой).

Для такого типа функций в практике построения нейронных сетей в качестве базовой модельной структуры, как правило, используют модель NNFRMAX 1 (Neural Network – based AutoRegressive, Moving Average, eXogenous signal, вариант 1) [5,6].

Структуризация нейронной сети управления подсистемой ВПО округа в рамках построенной типовой регрессионной модели имеет вид (рисунок 2.).

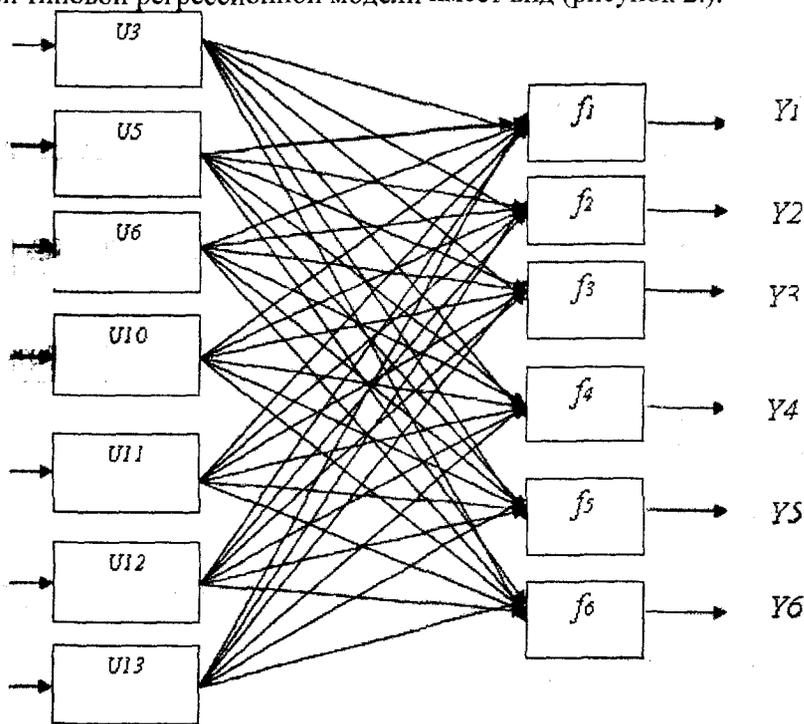


Рисунок 2 – Структура нейронной сети управления подсистемой ВПО округа

Нейронная сеть представляет собой однослойный перцептрон с семью входами и шестью выходами. Обучение нейронной сети с целью уточнения весовых коэффициентов (коэффициентов регрессии) регрессионной модели применительно к подсистеме ВПО округа проводилось на основании обобщенных для автономного округа данных (таблица 2).

В качестве входных потоков рассмотрены факторные переменные, выявленные как существенные при построении типовой регрессионной модели [7].

$U_3$  – площадь общежитий в расчете на одного студента (кв. м.);  $U_5$  – выпуск учащихся образовательными учреждениями региона в году, предшествующему году выпуска с пятилетним лагом (тыс. чел.);  $U_6$  – выпуск специалистов из образовательных учреждений СПО (тыс. чел.);  $U_{10}$  – среднегодовой прирост доли выпускников вузов, получивших направления на работу за пятилетний период обучения студента;  $U_{11}$  – среднегодовой прирост инвестиций в основной капитал, направленных в отрасль «Образование» (по высшему профессиональному образованию) за пятилетний период;  $U_{12}$  – среднегодовой прирост бюджетного финансирования отрасли «Образование» (по высшему профессиональному образованию) за пятилетний период;  $U_{13}$  – среднегодовой прирост доли студентов, обучающихся с полным возмещением затрат за обучение за пятилетний период.

В качестве выходных данных - выпуск специалистов по разным укрупненным группам специальностей:

$Y1$  – выпуск специалистов в рамках отраслевой специализации «Строительство»;  $Y2$  – выпуск специалистов в рамках отраслевой специализации «Транспорт и связь»;  $Y3$  – выпуск специалистов в рамках отраслевой специализации «Экономика и управление»;  $Y4$  – выпуск специалистов в рамках отраслевой специализации «Здравоохранение»;  $Y5$  – выпуск специалистов в рамках отраслевой специализации «Образование»;  $Y6$  – выпуск специалистов в рамках отраслевой специализации «Искусство».

Нейронная сеть представляет собой однослойный персептрон с семью входами и шестью выходами. Обучение нейронной сети с целью уточнения весовых коэффициентов (коэффициентов регрессии) регрессионной модели применительно к подсистеме ВПО ХМАО-Югры проводилось на основании обобщенных для автономного округа данных. Обозначенные данные в общем виде характеризуют систему профессионального образования автономного округа (табл. 2).

В качестве входных потоков рассмотрены факторные переменные, выявленные как существенные при построении типовой регрессионной модели [7].

$U_3$  – площадь общежитий в расчете на одного студента (кв. м.);  $U_5$  – выпуск учащихся образовательными учреждениями региона в году, предшествующему году выпуска с пятилетним лагом (тыс. чел.);  $U_6$  – выпуск специалистов из образовательных учреждений СПО (тыс. чел.);  $U_{10}$  – среднегодовой прирост доли выпускников вузов, получивших направления на работу за пятилетний период обучения студента;  $U_{11}$  – среднегодовой прирост инвестиций в основной капитал, направленных в отрасль «Образование» (по высшему профессиональному образованию) за пятилетний период;  $U_{12}$  – среднегодовой прирост бюджетного финансирования отрасли «Образование» (по высшему профессиональному образованию) за пятилетний период;  $U_{13}$  – среднегодовой прирост доли студентов, обучающихся с полным возмещением затрат за обучение за пятилетний период.

В качестве выходных данных – выпуск специалистов по разным укрупненным группам специальностей:

$Y1$  – выпуск специалистов в рамках отраслевой специализации «Строительство»;  $Y2$  – выпуск специалистов в рамках отраслевой специализации «Транспорт и связь»;  $Y3$  – выпуск специалистов в рамках отраслевой специализации «Экономика и управление»;  $Y4$  – выпуск специалистов в рамках отраслевой специализации «Здравоохранение»;  $Y5$  – выпуск специалистов в рамках отраслевой специализации «Образование»;  $Y6$  – выпуск специалистов в рамках отраслевой специализации «Искусство».

Таблица 2 – Исходные данные для нейросетевого моделирования подсистемы ВПО округа

Показатель	Год								
	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
<b>Выходные потоки</b>									
Выпуск тыс.чел.	1,45	1,57	1,99	3,27	4,33	5,54	6,10	6,8	6,92
Y1	0,58	0,63	0,82	1,28	1,65	2,22	2,44	2,79	2,84
Y2	0,13	0,14	0,14	0,23	0,30	0,44	0,49	0,61	0,62
Y3	0,20	0,25	0,34	0,69	0,95	1,22	1,40	1,63	1,73
Y4	0,15	0,19	0,22	0,36	0,43	0,50	0,49	0,48	0,42
Y5	0,32	0,31	0,40	0,59	0,78	0,94	1,04	1,02	1,04
Y6	0,07	0,06	0,08	0,13	0,22	0,22	0,24	0,27	0,28
<b>Входные потоки</b>									
U3	22,20	24,70	27,90	33,50	38,50	42,87	46,30	49,70	50,30
U5	9,80	10,40	11,65	12,98	14,23	15,80	16,70	17,30	17,44
U6	1,90	1,92	1,99	2,05	2,11	2,15	2,19	2,20	2,34
U10	2,00	4,00	3,60	4,80	6,60	8,20	7,90	8,00	6,70
U11	1,20	1,90	2,20	2,10	3,30	3,50	4,40	5,10	7,89
U12	2,30	2,45	5,65	6,45	7,23	7,14	7,65	8,10	8,90
U13	1,10	1,20	1,20	1,34	3,40	4,70	4,80	5,10	6,12

Построение нейросетевой модели проводится с использованием пакета Statistica Neural Networks (Statistica 7.0). Программа в процессе обучения сети самостоятельно определяет регрессионные зависимости между входами нейронной сети и ее выходами:

$$Y1=0,2145U11+0,1951U12; \quad Y2=-0,388+0,026U3-0,0385U12; \quad Y3=-87+0,1443U5+0,0834U13; \quad Y4=0,0467U10+0,0150U12 \quad Y5=-8,1454+4,5691U6-0,0615U11-0,073U12; \quad Y6=-,237+0,0293U5.$$

По всем нейрорегрессионным моделям средняя ошибка прогноза не превышает 10%, что позволяет использовать модели по каждому выходному потоку сети для прогнозирования показателей выпуска или для определения весовых параметров моделей под заданный выпуск.

Для оптимизации организационной структуры управления подсистемой ВПО (т.е. для определения ее параметров, обеспечивающих выпуск специалистов в соответствии с потребностями региона) необходимо скорректировать построенную нейронную сеть с учетом требуемых значений выходных потоков. В качестве

требуемых значений выходных потоков сети могут быть приняты как спрогнозированные, так и данные, полученные в аналитических отчетах Департамента занятости населения автономного округа, составленных на основе форм федерального статистического наблюдения №2-г (трудоустройство) «Сведения о предоставлении государственных услуг в области содействия занятости населения».

Найденные параметры структуры управления подсистемой ВПО такие, чтобы минимизировать отклонения, между существующей и заявленной структурой подготовки специалистов ВПО. Сформулированный вопрос относится к так называемым задачам распределения входных сигналов по заранее заданной структуре и величине выходных потоков. Подобный подход предполагает возможности использования метода структуризации управления на основе искусственных нейронных сетей при наличии надежного долгосрочного прогноза рынка труда.

После ввода в программу Statistica Neural Networks прогнозных данные по выходным потокам, программа по отношению к каждому выходному потоку формирует модели нейрорегрессии, параметры оптимальных моделей управления потоком выпускников учреждений ВПО, СПО и НПО.

Параметры оптимальной модели управления потоками выпускников:

$$Y1 = 0,311U11+0,1558U12; \quad Y2 = -0,5+0,0298U3-0,036U12; \quad Y3 = -1,3155+0,1528U5; \\ Y4 = 0,1818 U11+0,3218U12; \quad Y5 = -2,5825+0,1019U6; \\ Y6 = 0,0416U10-0,0914U13.$$

Результаты нейрорегрессии показали, что для некоторых выходных потоков не просто изменились коэффициенты регрессии, но сеть определила для них иные значимые факторные переменные.

Таким образом, в результате исследований решены задачи:

1) разработка математического обеспечения, позволяющего на основе данных о структуре и численности занятого в отраслях экономики округа населения по возрасту, полу и числу ежегодно выпускаемых специалистов разного уровня образования, сделать краткосрочный прогноз выпуска специалистов с разным уровнем профессионального образования (НПО, СПО, ВПО) в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре, позволяющего обеспечить выполнение заданного уровня ВРП;

2) в зависимости от потребностей отраслей экономики округа прогнозы выпуска специалистов по 28 УГС с начальным, средним и высшим профессиональными образованиями тесно увязать с планами приема в учебные заведения округа;

3) выявлять существенные факторы, обуславливающие выпуск специалистов и определять эффективные управляющие действия совершенствования структуры управления региональной системой образования;

4) приблизить структуру выпуска специалистов к структуре потребностей регионального рынка труда.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров И.М. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления / И.М. Макаров, В.М. Лохин, С.В. Манько, М.П. Романов. – Отделение информ. технологий и вычислит. систем РАН. – М.: Наука, 2006. – 333 с. – ISBN 5-02-033782-X (в пер.).
2. Питухин Е.А., Гуртов В.А. Математическое моделирование динамических процессов в системе «экономика - рынок труда - профессиональное образование» – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2006. – 350 с.

3. Карминская Т.Д., Алексеев В.И. Прогнозирование потребностей в квалифицированных кадрах для социально-экономических систем регионального уровня. // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2008. – №12(54). – С. 26-33.
4. Алексеев В.И. Субоптимальные рекуррентные алгоритмы оценивания в системах навигации // Изв. Вузов СССР. Радиоэлектроника. – 1987. – Т. 30. – № 3. – С. 34-39.
5. Головкин В.А. Нейронные сети: обучение, организация и применение: учеб. пособие для вузов. – М.: Радиотехника, 2001. – 256 с.
6. Дорогов А.Ю., Алексеев А.В. Математические модели быстрых нейронных сетей: // СПбГЭТУ «Системы управления и обработки информации»: сб. науч. трудов. – 1996. – Вып. 490. – С.79-84.
7. Разработка прогноза и выработка рекомендаций по совершенствованию (расширению) сети учреждений начального, среднего и высшего профессионального образования в разрезе муниципальных образований автономного округа с учетом развития рынка и региональных особенностей / науч. рук. Колоколов Ю.В., исп. Карминская Т.Д., Моновская А.В., Мелихов А.Ю., Шапкина О.Ф. //Итоговый отчет по контракту на выполнение НИР для государственных нужд №10/08.0623/НУ-ЮГУ-294 от 29.10.2008/Югорский государственный университет: Ханты-Мансийск, 2008.

**Татьяна Дмитриевна Карминская**

Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск

Кандидат технических наук, доцент,

зав. кафедрой «Компьютерное моделирование и информационные технологии»

Тел.: 8 (3467) 357-817

E-mail: ktd@mail.ru

УДК 621.369.6

И.С. КОНСТАНТИНОВ, А.И. ФРОЛОВ, Н.А. КРАВЦОВА

## МОДЕЛЬ ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ В АДАПТИВНОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ АДМИНИСТРАТИВНОГО МОНИТОРИНГА

*В статье рассматриваются информационные связи адаптивной автоматизированной системы административного мониторинга. Проводится анализ возникающих контуров управления. Предлагается модель хранения данных, представленная в виде формализованных элементов и их отношений.*

**Ключевые слова:** административный мониторинг; автоматизированная система управления; адаптация; сбор, хранение, обработка информации.

*There are observed information communications of the adaptive automated system of administrative monitoring in the article. There is performed analysis of arising contours of management. It is offered the model of the data storage presented in the form of formalized elements and their relations.*

**Keywords:** the administrative monitoring; the automated control system; adaptation; gathering, storage, information processing.

### ВВЕДЕНИЕ

Эффективное управление сложными организационно-техническими и социальными системами возможно только при условии получения достоверных и информативных данных об объекте управления. Для этого необходимо постоянное наблюдение и контроль над некоторыми значащими качествами объекта или его составных частей. Таким образом, для принятия обоснованных управленческих решений в сложных системах необходима организация получения оперативных данных об объекте, их хранения, обработки и предоставления информации для оценки, контроля, управления и прогнозирования, что составляет задачу мониторинга объекта управления.

В ряду задач мониторинга можно выделить класс задач административного мониторинга, то есть мониторинга в организационных, организационно-технических и социальных системах, где первичными источниками данных (операторами ввода) и потребителями (субъектами принятия решений) информации являются люди. В качестве источников данных также могут рассматриваться существующие базы данных информационных систем предприятия или организации.

В сложных системах объект мониторинга нельзя рассматривать как монолитную сущность. Чаще всего его можно представить в виде сложной структуры, элементами которой являются так называемые объекты учета – элементы и процессы рассматриваемого объекта мониторинга. Как правило, выделяемые объекты учета распределены в пространстве и имеют различную временную цикличность своих показателей (значащих качеств объекта управления). Распределенность объекта управления, огромный объем показателей и их изменчивость во времени не позволяют с легкостью получать информацию для принятия решений. Таким образом, задачи сбора, хранения, обработки и представления информации вырастают в самостоятельный класс задач мониторинга. Разнородность задач мониторинга и изменчивость требований к процедуре мониторинга обуславливает актуальность разработки адаптивных автоматизированных систем административного мониторинга [1]. При этом одним из важнейших вопросов в данной области является организация хранения данных, обеспечивающая возможность изменения структуры данных на логическом уровне без модификации физического представления.

Вопросы хранения данных должны рассматриваться с учетом места системы мониторинга в процессе организационного управления с точки зрения процессов обмена информацией. Система мониторинга не существует изолировано от окружающих ее элементов АСУ (в том числе АСУ предприятия), она в том или ином виде является подсистемой АСУ. Входные и выходные информационные потоки системы мониторинга являются информационными потоками, участвующими в контуре управления объектом управления.

В данной статье в общем виде представлены информационные входные и выходные потоки системы мониторинга. На основании анализа информационных потоков предлагается формализованная модель хранения данных.

### ВНЕШНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПОТОКИ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА

Основным процессом, позволяющим судить о состоянии распределенного объекта управления, является мониторинг значений показателей объектов учета, то есть получение отчетной информации на основе собранных и обработанных значений. Этот процесс образует основной поток данных от объекта мониторинга (рисунок 1). Получение данных об объекте управления системой мониторинга может осуществляться непосредственно, или посредством импорта данных из баз данных существующих информационных систем. Результатом функционирования системы мониторинга является совокупность различных отчетов, предназначенных для лица, принимающего решения (ЛПР). Под отчетом в данном случае можно понимать прошедшую первичную обработку структурированную информацию о состоянии объекта мониторинга.



Рисунок 1 – Общая схема информационных входных и выходных потоков системы мониторинга

Результаты функционирования системы мониторинга в виде отчетов используются для решения двух задач. Во-первых, она данная информация является исходной для системы поддержки принятия решений. Во-вторых, с учетом требований адаптивности системы мониторинга возникает необходимость реализации управления ее функционированием при изменении задач и требований мониторинга. Это представлено на рисунке 1 пунктирной линией. В данном случае объектом управления является сама система мониторинга, а субъектом управления – ЛПР. В процессе такого управления (настройки или адаптации) могут изменяться:

- типы объектов учета и их отношения;

- набор и взаимосвязи объектов учета;
- набор и свойства показателей каждого типа объектов учета;
- права доступа операторов к объектам учета и показателям;
- правила первичной обработки данных;
- настройки отчетов и др.

### **ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ В АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЕ АДМИНИСТРАТИВНОГО МОНИТОРИНГА**

Рассмотрим более детально информационные потоки системы мониторинга. На входы систему мониторинга поступают два входных потока: поток значений мониторинговых показателей и поток настроек. Последний можно разделить на две составляющие: поток управления процессами сбора и хранения данных и поток управления процессов первичной обработки и представления информации. В рамках данной статьи с целью моделирования представления информации в системе рассматриваются только первая из выделенных составляющих.

Входной поток, поступающий в подсистему настройки сбора и хранения, имеет ложную структуру. Он представляет собой несколько взаимосвязанных потоков. Поступающие данные можно разделить на 4 вида, которые определяют параметры функционирования системы мониторинга.

#### **Типы объектов учета**

Данные о типах объектов учета поступают на вход системы на этапе адаптации системы мониторинга к изменениям предметной области или изменениям требований при проведении мониторинга. Поскольку система мониторинга поддерживает не только линейную связанность типов объектов учета, но и сетевую, то, как правило, поступающие на вход типы сразу структурируются. То есть каждому вновь поступившему типу объекта учета назначаются возможные типы-родители и возможные типы-потомки. Совокупность типов образует входное множество  $V_t$ . Каждый тип сопоставлен с некоторым родительским типом. Множество родительских связей типов выражается подмножеством декартова произведения  $V_t \times V_t$ .

$$E_t = \{(t_1, t_2) \mid (t_1 \in V_t) \ \& \ (t_2 \in V_t)\}$$

Таким образом, модель связей типов объектов учета представляет собой граф  $T(V_t, E_t)$ , являющийся совокупностью двух множеств — непустого множества  $V_t$  (множества типов объектов учета) и множества  $E_t$  неупорядоченных пар различных элементов множества  $V_t$ .

#### **Показатели**

Здесь рассматривается множество показателей объектов учета, значения которых должны быть получены в ходе мониторинга. С течением времени интерес субъекта мониторинга смещается, что ведет к непрерывной подстройке системы. Данные о показателях могут поступать не только в подготовительный период работы системы, но и на протяжении всего времени мониторинга. Новые показатели добавляются, старые редактируются или удаляются. Это отражает меняющиеся требования к мониторингу.

Объекты учета распределяются по типам во многом по причине вести различное наблюдение за ними, прослеживая изменения или текущие состояния по определенным наборам показателей. Для этого определенным типам назначают наборы показателей. Именно по этим закрепленным наборам показателей и будет происходить мониторинг всех объектов учета данного типа.

Множество всех показателей, поступивших на вход системы, обозначим  $P$ . Тогда множество всевозможных наборов показателей является множеством всех подмножеств  $P$  и обозначается  $2^P$ .

$$2^P = \{X_P \mid X_P \subset P\}$$

Как было сказано выше, каждый тип объекта учета обладает набором показателей. Подмножество декартова произведения множеств ( $2^P \times V_t$ ) определит отношение  $R_{tr} \subset 2^P \times V_t$ , представляющее показатели, присущие данному типу объекта учета. Это отношение можно представить как отображение из булеана  $2^P$  в множество  $V_t$ :

$$R_{tr} = \{(X_P, t) \mid X_P \subset P \ \& \ t \in V_t\}.$$

#### Возможные значения показателей

Все показатели могут быть разделены на две группы: с неограниченной генеральной совокупностью возможных значений и с ограниченной [1]. Для второй группы необходимо задание возможных значений показателей  $X_t$  при настройке для ограничения выбора значений при регистрации.

#### Экземпляры объектов учета

Экземпляром объекта учета называется информационная сущность, соответствующая реальному объекту учета определенного типа. Данные об экземплярах объектов учета вносятся на этапе заполнения модели связей экземпляров объектов учета.

В обработку данных этого вида входит генерация иерархических и сетевых связей между добавляемыми и существующими экземплярами, контроль соответствия формата добавляемого экземпляра модели объекта учета, контроль санкционированности изменений в структуре связей экземпляров объектов учета. Экземпляры объектов учета при этом типизируются, то есть ставятся в соответствие определенному существующему типу.

При подаче на вход модели множества объектов учета создается *отношение типизирования* объектов ( $E_{t_0}$ ). Элементом данного отношения является экземпляр ОУ с сопоставленным ему типом  $(t, o)$ . Подобные *типизированные экземпляры* попарно связываются между собой связью "потомок  $\rightarrow$  родитель", создавая таким образом упорядоченные пары элементов множества  $E_{t_0}$ . Таким образом, модель связей экземпляров объектов учета опишем множеством:

$$E_0 = \{(E_{t_{01}}, E_{t_{02}}) \mid E_{t_{11}}=(t_1, t_2) \ \& \ E_{t_{01}}=(o_1, t_1) \ \& \ E_{t_{02}}=(o_2, t_2)\}$$

То есть типизированный экземпляр  $E_{t_{01}}$  является потомком типизированного экземпляра  $E_{t_{02}}$  если существует пара "тип-потомок  $\rightarrow$  тип-родитель"  $E_{t_{11}}=(t_1, t_2)$  такая что в паре  $E_{t_{01}}$  экземпляру  $o_1$  сопоставлен тип  $t_1$ , а в паре  $E_{t_{02}}$  экземпляру  $o_2$  сопоставлен тип  $t_2$ .

Отношение  $E_0$  как множество родительских связей типизированных экземпляров также можно представить массивом дуг, который можно изобразить в виде графа. Приведем на рисунке данный граф встроенным в обобщенную модель хранения. Граф выделен пунктирными линиями.

Данная модель позволяет создавать объекты учета с несколькими родителями, а также связывать их с дочерними объектами разных типов.

### СТРУКТУРИРОВАНИЕ ВХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ЕЕ ХРАНЕНИЯ

Созданное и сохраненное отношение  $E_t$  будем называть *отношением родительских связей типов*. Фактически оно представляет собой множество ребер графа, описывающего модель связей типов  $T(V_t, E_t)$ . При подаче на вход системы мониторинга множества объектов учета создается *отношение типизирования* объектов ( $E_{t_0}$ ), а также *отношение родительских связей типизированных объектов* ( $E_0$ ). После ввода множества возможных показателей ( $P$ ) происходит присвоение каждому типу

объектов учета набора показателей (как мониторинговых, так и служебных), что формально выражается отношением  $R_{tp}$ . Назовем это отношение *набором показателей, присущих типу*.

Для непосредственного сбора значений показателей необходимо определить элементарные единицы вводного интерфейса. Формально этой единицей интерфейса должен служить математический объект, сопоставленный с некоторым экземпляром объекта учета и показателем, значение которого и будет вводиться в систему. Для определения такого объекта необходимо составить отношение типизированных экземпляров объектов учета с набором показателями им присущими. Забегая вперед для пояснения, можно сказать, что каждый элемент данного отношения будет представлять множество элементов интерфейса для регистрации значений показателей определенного объекта учета. Отношение типизированных объектов учета к наборам показателей, по которым решено вести мониторинг можно представить композицией отношений  $E_{to} \circ R_{tp}$ .

$$R_{po} = E_{to} \circ R_{tp} = \{(o_1, X_p) \mid o_1 \in V_o \ \& \ X_p \subset P \quad t \in V_t \quad o_1 E_{to} t \ \& \ t R_{tp} X_p\}$$

Таким образом, элементом отношения является упорядоченная пара некоторого экземпляра объекта учета  $o_1$  и сопоставленного ему набора показателей  $X_p$ ,  $o_1 \in V_o \ \& \ X_p \subset P$ , при условии существования некоторого типа объекта учета из множества типов, что отношением  $E_{to}$  можно отобразить экземпляр  $o_1$  в тип  $t$  и отношением  $R_{tp}$  можно получить из типа  $t$  сопоставленные с ним показатели  $X_p$ .

Данное отношение позволяет описать множество генерируемых вводных интерфейсов для регистрации значений показателей объектов учета, что является результатом работы адаптации системы мониторинга к задачам предметной области. Сгенерированные интерфейсы поступают в хранилище для использования при сборе значений показателей. Каждый реализованный вводной интерфейс для экземпляра ОУ для ввода значений показателей представляет собой некоторую функцию  $i(o, X_p)$  от двух аргументов:

- экземпляра объекта учета и
- набора показателей, по которым необходимо регистрировать значения.

Множество подобных элементов интерфейса ввода значений показателей формально описывается отношением  $R_{po}$ . Данное отношение не является сохраняемым в подсистеме хранения. Оно генерируется каждый раз при обращении к интерфейсу ввода. Одной из причин генерации данного отношения является возможность изменять настройку системы (изменение структуры типов, экземпляров, показателей) после начала ведения мониторинга.

В случае использования показателей с ограниченной генеральной совокупностью возможных значений модель расширяется. Каждому показателю данного вида ставится в соответствие набор возможных значений из множества значений, доступных для ввода пользователям систем, что выражается отношением  $R_{ps}$

$$R_{ps} = \{(p_1, X_s) \mid p_1 \subset P \ \& \ X_s \subset 2^{X_s}\}$$

Композиция отношений  $R_{po} = E_{to} \circ R_{tp}$  изменится на  $R_{vpo} = E_{to} \circ R_{tps}$  и составиться с участием отношения  $R_{ps}$  вместо  $P$  в одном из его компонентов. Распишем это подробнее.

$$R_{tps} = \{(R_{ps1}, t_1) \mid R_{ps1} \subset R_{ps} \ \& \ t_1 \in V_t\}$$

$$R_{vpo} = E_{to} \circ R_{tps} = \{(o_1, R_{ps1}) \mid o_1 \in V_o \ \& \ R_{ps1} \subset R_{ps} \quad t \in V_t \quad o_1 E_{to} t \ \& \ t R_{tp} R_{ps1}\}$$

Таким образом, элементом отношения является упорядоченная пара некоторого экземпляра объекта учета  $o_1$  и сопоставленного ему набора показателей, каждый из которых связан с набором возможных значений  $R_{ps1}$ , при условии существования

некоторого типа объекта учета из множества типов, что отношением  $E_{to}$  можно отобразить экземпляр  $o_1$  в тип  $t$  и отношением  $R_{tp}$  можно получить из типа  $t$  сопоставленные с ним показатели со связанными наборами возможных значений.

### ОРГАНИЗАЦИЯ ХРАНЕНИЯ ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

При работе в режиме мониторинга значений показателей происходит сопоставление регистрируемого значения показателя  $v \in V_s$  (где  $V_s$  – множество значений показателей) к элементу интерфейса ( $i$ ). Под моделью элемента интерфейса подразумевается элемент отношения типизированных объектов учета к наборам показателей, по которым решено вести мониторинг. Выразим это отношением:

$$R_{spo} = \{(i, v) \mid (i \in R_{po} \parallel i \in R_{vpo}) \& v \in V_s\},$$

которое назовем регистрацией значений показателей с неограниченной генеральной совокупностью значений.

Данные показателей, по которым осуществляется мониторинг над объектами учета, является ещё одним входным потоком, поступающим в систему мониторинга ( $V_s$ ). Этот вид данных является отражением состояний объектов учета на определенные периоды, называемые учетными периодами. Учетные периоды отнюдь не фиксированные, что позволяет наблюдать отдельные объекты учета в разных временных дискретизациях. Это наиболее часто поступающий в систему вид данных.

Для внесения значений показателей необходимо сгенерировать интерфейс с полями ввода и элементами управления. Одновременно можно работать со всеми показателями определенного объекта учета за любой период учета или за несколько периодов сразу. Для внесения данных другого объекта необходимо сделать переход по иерархии объектов для чего сгенерируется новый интерфейс. Зарегистрированные значения собираемых показателей также направляются в хранилище.

В случае использования показателей с ограниченной генеральной совокупностью возможных значений регистрируемое значение сопоставляется с расширенной моделью элемента интерфейса ( $R_{vpo}$ ). Как было показано, модель интерфейса  $R_{vpo}$  представляет отношение типизированных экземпляров объектов учета с наборами показателей им присущими при условии связи каждого показателя из набора с возможными значениями.

Схематично модель регистрации значения подобного показателя можно представить так.

### ФОРМАЛИЗОВАННАЯ МОДЕЛЬ ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ

Как было сказано выше, объект управления представляет собой сложную структуру элементов. Исходя из приведенного выше формального описания элементов представления информации, данную структуру можно представить в виде взаимосвязанных абстрактных объектов учета и их показателей. Математически связи абстрактных объектов учета, их типов и показателей выражаются отношениями. Графическая схема этих отношений представлена на рисунке 2.

Хранимое отношение родительских связей типов с множеством взаимосвязанных объектов учета, поступающих с интерфейса сбора, образует отношение типизирования объектов. Связав полученное таким образом отношение типизирования объектов с мониторинговыми показателями, получаем хранимую структуру «отношением набора показателей, присущих типу». В ходе самого процесса мониторинга при поступлении изменяющихся значений показателей образуется отношение множества пар (объект учета, показатель) с поставленным в соответствие текущим значением показателя.

Данное соответствие является элементом отношения  $R_{spo}$ .

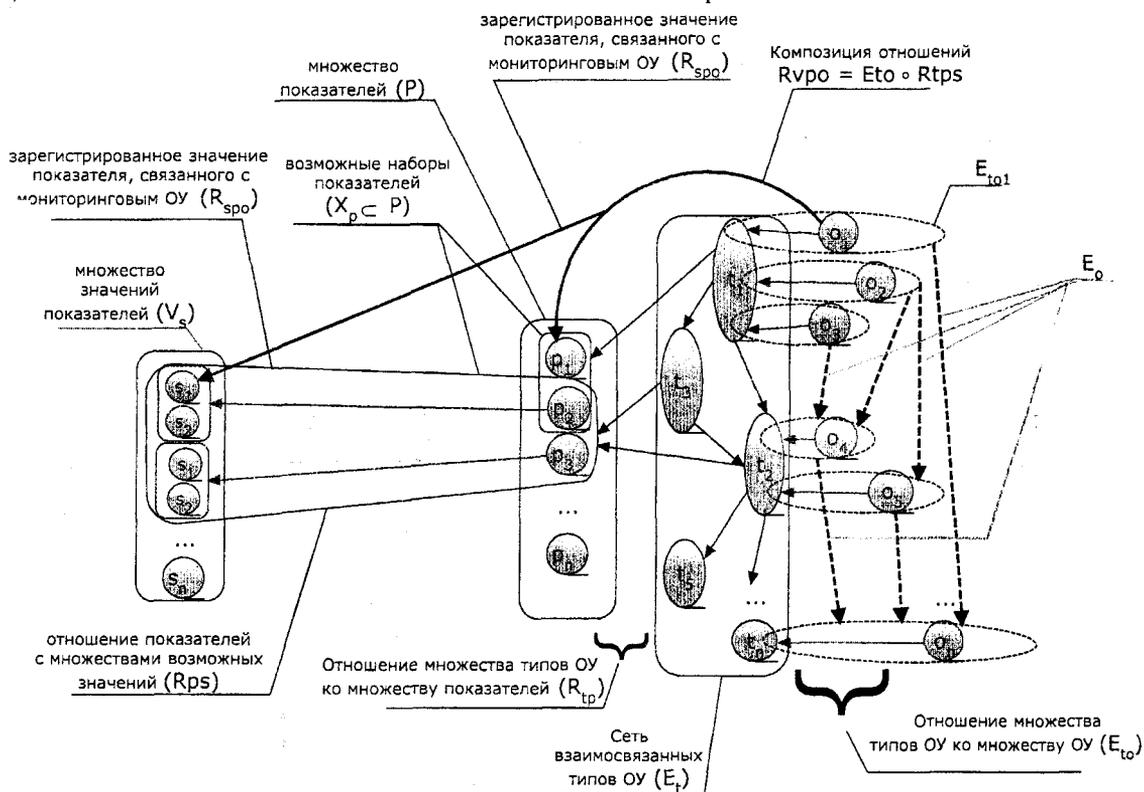


Рисунок 2 – Графическое представление формализованной модели хранения данных

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Адаптивная автоматизированная система административного мониторинга является подсистемой автоматизированной системы управления, обеспечивающей удаленный сбор данных об объекте административного мониторинга, их хранение и обработку. Таким образом, система мониторинга включена в основной контур управления АСУ. Однако, требования адаптации системы мониторинга к изменяющимся задачам приводят к необходимости настройки механизма мониторинга. Это в свою очередь обуславливает создание дополнительного контура управления. Объектом управления в этом контуре являются элементы системы мониторинга, обеспечивающие свойство адаптивности. Субъектом управления в этом случае является лицо, принимающее решение о перенастройке адаптивной системы мониторинга на основании ранее полученных отчетов. Таким образом, необходима детализация и исследование информационных потоков системы мониторинга, как подсистемы АСУ.

При проектировании подсистем адаптивной системы мониторинга ключевую роль играет подсистема хранения, реализация которой определяется моделью хранения данных.

Предложенная формализованная модель хранения данных обеспечивает адаптивное представление объекта мониторинга в виде взаимосвязанных абстрактных объектов учета и их показателей. Введенные формализованные определения элементов модели хранения данных являются формальной основой для создания методик обработки данных и настройки подсистемы сбора и хранения.

Особенности реализации предложенной абстрактной модели хранения данных во

многим определяют эффективность системы мониторинга в целом. Поэтому одним из направлений дальнейших исследований должен стать анализ способов ее физической реализации.

*Примечание:* данные исследования проводятся в рамках НИР «Исследование и разработка теоретических основ построения и функционирования распределенных информационных систем административного мониторинга» ФЦП «Научные и научно-образовательные кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кравцова Н.А., Фролов А.И. Место и функции адаптивной системы мониторинга в автоматизированной системе управления // Информационные технологии в науке, образовании и производстве. ИТНОП-2010. Материалы 4-й научно-технической конференции. Том 2 «Методологические и теоретические аспекты создания и развития информационных технологий», 2010. – 71-75 с.
2. Иващук О.А., Константинов И.С. Теоретические основы построения автоматизированной системы управления экологической безопасностью промышленно-транспортного комплекса; под общ. редакцией И.С. Константинова. – М.:Машиностроение, 2009. – 205 с.
3. Бакланов А.И. Системы наблюдения и мониторинга / А.И. Бакланов.– М.: Бином Лаборатория знаний, 2009. – 234с.
4. Есипов Ю.В. Мониторинг и оценка риска систем «защита – объект – среда» / Ю.В. Есипов, Ф.А. Самсонов, А.И. Черемисин А.И. – М.:ЛКИ, 2008. – 136 с.

#### **Константинов Игорь Сергеевич**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Доктор технических наук, профессор,  
директор учебно-научно-исследовательского института информационных технологий  
Тел.: 8(4862) 40-96-14  
E-mail: konstantinov@ostu.ru

#### **Фролов Алексей Иванович**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент,  
директор ресурсного центра информатизации образования  
Тел.: 8(4862) 43-56-11  
E-mail: aifrolov@ostu.ru

#### **Кравцова Надежда Алексеевна**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Кандидат технических наук, инженер  
Тел.: 8(4862) 40-96-14  
E-mail: x4x@bk.ru

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ ВУЗА НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ СУЩЕСТВУЮЩИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

*Описан подход к автоматизации формирования информационно-аналитических ресурсов высшего учебного заведения. Раскрывается понятие информационно-аналитических ресурсов. Рассматривается система показателей, положенная в основу их формирования. Система информационно-аналитических ресурсов рассматривается, в первую очередь, как инструмент оценки деятельности вуза.*

*Ключевые слова:* информационно-аналитические ресурсы; информационная система; автоматизация управления вузом.

*The authors have observed issues related to the evaluation of integrated educational complexes activity. They have performed a comparative analysis of methods used for evaluation of higher education institutions activity. There have been determined primary and secondary indices, and an approach to their aggregation has been suggested. The authors have examined the formation order of information and analysis resources used for evaluation of an institution activity. An approach to an automation of formation of information and analysis resources has been described.*

*Keywords:* information and analysis resources; information system; automated administration of a higher education institution.

### ВВЕДЕНИЕ

Современный вуз – большая организационно-техническая система, чрезвычайно сложная с точки зрения управления. Многоцелевой характер деятельности влечет за собой множество критериев, которые влияют на принятие управленческих решений и по которым оценивается эффективность этих решений.

Каждое направление деятельности вуза можно характеризовать не одним десятком показателей. При этом управленческое решение руководства может одновременно влиять на несколько направлений деятельности. Таким образом, необходимо наличие методик и инструментов, позволяющих объективно оценивать деятельность вуза. Основой такой оценки является большое количество разнородных данных. Эти данные необходимо преобразовать в информацию, пригодную для анализа и принятия решений.

Такая информация, прошедшая предварительную обработку, и составляет систему информационно-аналитических ресурсов (ИАР), т.е. ИАР должны отражать результаты функционирования вуза, источники их формирования, динамику изменений, наметившиеся тенденции. В современных условиях эффективная реализация ИАР возможна лишь в рамках автоматизированных информационных систем.

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДИК ОЦЕНКИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ВУЗОВ

Довольно сложно найти методику, которая бы в одинаковой степени адекватно отображала все стороны деятельности вуза.

Так, Федеральное агентство по образованию РФ ежегодно собирает сведения о деятельности вузов. Разработана методика [2], позволяющая определить рейтинг вуза в

целом, отдельных специальностей и направлений подготовки, в частности. Данная методика основана на выделении двух основных показателей оценки деятельности вуза:

- потенциал – кадровый, материальный, социально-культурный;
- активность – реализация имеющегося потенциала в различных сферах деятельности.

Методика основывается на анализе 45 показателей, отражающих основные характеристики деятельности вуза: статистические показатели, отражающие состояние в сфере образования, результаты образовательной деятельности, участие студентов и преподавателей в научной деятельности, коммерциализация научной деятельности, характеристика основных фондов и т.д.

Все показатели определенным образом нормируются и сводятся в линейную модель, которая и призвана отразить результаты деятельности вуза за исследуемый период.

Данная методика, которая охватывает различные сферы деятельности вуза и использует, в основном, агрегированные количественные показатели, может быть использована для составления общих рейтингов. Однако она не может дать полной информации о деятельности вуза, его отличительных чертах, успешных и проблемных направлениях, так как использует, по большей части, укрупненные показатели при отсутствии качественного анализа данных.

Такая система оценки эффективности деятельности высших учебных заведений и других научно-образовательных систем основана на сугубо формальных показателях и является чрезмерно жесткой. Однако подобный подход позволяет определить нормативные значения критериев, что позволяет вузам «видеть» ориентиры для дальнейшего развития.

Многоцелевой характер деятельности вузов заставляет использовать специализированные методики, характеризующие отдельные направления деятельности. К ним, например, относится методика оценки инновационной составляющей деятельности вуза, которая включает анализ совокупности показателей (более сорока), характеризующих инновационную деятельность [1,3]. В данном случае показатели не сводятся в линейную модель, а оцениваются в совокупности.

Существуют методы проведения экспертной оценки деятельности (например, научно-исследовательской) вуза, которые используют не только количественные, но и качественные показатели оценки отдельных научных школ и направлений, уровня развития студенческой НИР, развития фундаментальной и прикладной науки и др. Такая методика может дать адекватное представление о соответствующем направлении деятельности [1]. Но, с другой стороны, результаты такой оценки слабо формализуемы, если учесть, что анализу подвергаются кратко- и долгосрочные программы развития, а также структура управления, системы контроля качества и т.п.

Показатели результатов деятельности вузов, представленные в их программных или оперативных документах, можно разделить на показатели конечных и непосредственных результатов.

К непосредственным результатам деятельности вузов относится собственно предоставление образовательных или иных услуг определенного качества и объема. Показатели непосредственных результатов деятельности могут включать: количество студентов, обученных по определенным образовательным программам, процент выпускников, устроившихся по специальности и т.п.

Методики, описанные выше, оценивают именно непосредственные результаты деятельности. Это связано с тем, что непосредственные результаты деятельности вузов

легче поддаются идентификации и оценке. Соответственно, для них возможно разработать нормативные значения, а также проводить сравнение результатов деятельности различных научно-образовательных учреждений.

К конечным результатам относится, прежде всего, социально-экономический эффект от предоставленных услуг для их получателей, например, карьерный рост выпускников по специальности, доходы выпускников, удовлетворенность работодателей качеством подготовки специалистов.

Зарубежные методики оценки деятельности вузов, в целом, основаны на тех же показателях, но имеются и существенные отличия, которые сводятся к следующему [5-6].

1. За рубежом получили гораздо более широкое распространение методики вычисления индекса цитирования научных работ (система Scopus, индекс Хирша). Подобные системы применяются и в России, но развиты намного слабее и в процессе оценки деятельности применяются редко, хотя в последнее время активно внедряются.

2. Западные вузы, по сравнению с российскими, уделяют больше внимания социальным показателям работы, таким, например, как уровень удовлетворенности студентов и преподавателей.

3. Больше внимание к разнообразным рейтингам.

4. Больше внимание к конечным результатам деятельности.

Причины такого различия обусловлены разными механизмами финансирования образовательных и исследовательских программ, более острой конкуренцией среди вузов, а также некоторыми другими факторами [4-6].

Конечные результаты деятельности вузов представляют больший интерес для социальных групп, потребляющих соответствующие услуги, и для общества в целом. При очевидных плюсах использование для оценки этих показателей имеет ряд недостатков.

1. Сложность сбора и анализа данных.

2. Субъективизм в оценке.

3. Сложность сравнения показателей.

4. Невозможность определения базовых (нормативных) значений.

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ И АГРЕГИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ВУЗА**

Рассмотрим показатели, характеризующие непосредственные результаты деятельности вузов. Число таких показателей довольно велико (более 200) и может варьироваться в зависимости от того, какие данные и в каком разрезе необходимо получить. При этом показатели можно разделить на две группы:

1) первичные (около 50) – отражают факты в абсолютных цифрах (количество студентов, преподавателей, суммы финансирования и прочее);

2) вторичные (более 150) – средние и относительные величины (средний возраст, средние оценки, количество научных работ на одного сотрудника, процент аспирантов, защитившихся в первый год после окончания аспирантуры, процент коммерческих исследований и т.п.).

Необходимо отметить, что группировка показателей не является взаимоисключающей (первичные показатели могут прямо или косвенно участвовать в нескольких группах), так как, по сути, это одни и те же данные, представленные в различных разрезах (рис. 1).

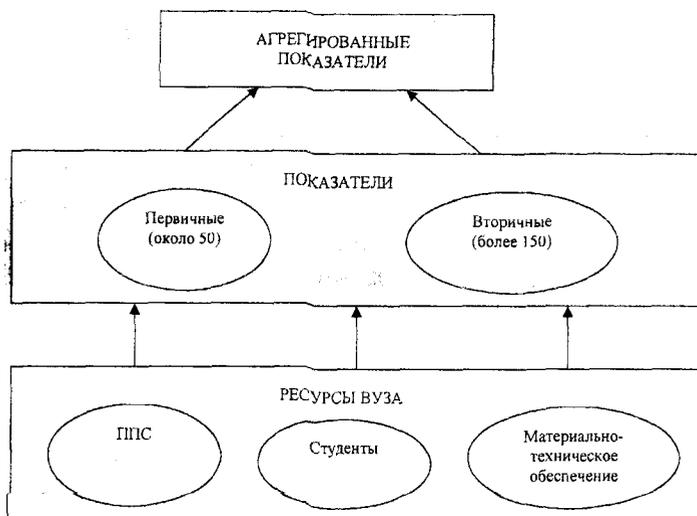


Рисунок 1 – Показатели деятельности ИОК

При столь большом количестве показателей возникает проблема оценки деятельности вуза в целом. Сведение показателей в линейную модель не дает адекватной картины, поэтому имеет смысл группировка показателей по различным основаниям и использование нескольких агрегированных показателей. Это дает возможность, используя формальные показатели, более полно отразить все стороны деятельности научно-образовательного учреждения.

Наиболее очевидным является агрегирование показателей по принципу их принадлежности в той или иной сфере деятельности вуза. Здесь могут быть выделены следующие группы [1,4,7,8]:

- профессорско-преподавательский состав;
- контингент студентов;
- абитуриенты / школьники;
- научно-исследовательская деятельность;
- образовательная деятельность;
- материально-техническая база;
- финансовые ресурсы;
- социальная сфера.

Конкретный перечень групп для выполнения агрегирования показателей, естественно, зависит от специфики научно-образовательного учреждения. Попытка интегрировать отечественные и зарубежные тенденции в оценке деятельности вуза приводит к получению более широкого перечня. На наш взгляд, показатели могут быть сгруппированы следующим образом:

1) статистические показатели, характеризующие состояние и цели в сфере образования (число студентов разных направлений, количество студентов, окончивших курс в установленные сроки, процент преподавателей, имеющих ученые степени, и т.п.);

2) показатели, характеризующие результаты образовательной деятельности (количество выпускников, продолживших образование в магистратуре и аспирантуре; процент устроившихся на работу в течение полугода после выпуска и т.п.);

- 3) показатели удовлетворенности студентов и выпускников уровнем образования (по данным национальных опросов и внутренних опросов вузов);
  - 4) показатели качества научной деятельности (в качестве основного во всех вузах используется показатель объемов внешнего коммерческого и грантового финансирования, а также показатели количества публикаций и индекса цитирования);
  - 5) показатели участия преподавателей и студентов в научной деятельности (в том числе, в грантовых проектах);
  - 6) показатели коммерциализации исследований и разработок (число патентов, доходы от коммерциализации и т.п.);
  - 7) показатели связей с местным сообществом (количество мероприятий, проведенных для местного сообщества, субъективные оценки роли университета в жизни местного сообщества);
  - 8) показатели интернационализации (количество и доля иностранных студентов, число зарубежных преподавателей, число международных исследовательских проектов и международного финансирования, показатели интернациональной мобильности студентов, субъективная оценка вуза международным академическим сообществом);
  - 9) показатели места вузов в национальных и международных рейтингах и ранкингах;
  - 10) показатели связей с выпускниками (количество участников ассоциаций выпускников, благотворительные взносы выпускников и т.п.);
  - 11) показатели обеспеченности ресурсами (обеспеченность компьютерами и доступом в Интернет, оборудование аудиторий и лабораторий, показатели обновления библиотечных фондов, доступ к электронным библиотекам и т.п.);
  - 12) показатели удовлетворенности студентов и преподавателей инфраструктурой и сопутствующими услугами университета;
  - 13) показатели экономической эффективности деятельности (снижение отдельных видов затрат, показатели финансовой устойчивости, диверсификация источников доходов и т.п.);
  - 14) показатели ввода в действие определенных объектов (строительство зданий, открытие исследовательских центров и т.п.);
  - 15) социальные показатели (количество и доля студентов из определенных социальных или национальных групп, доступ к образованию студентов с ограниченными возможностями и т.п.);
  - 16) «процедурные» показатели, характеризующие введение определенных процедур и правил – системы оценки качества управления, внутренних правил и т.п.
- Параметры, характеризующие непосредственные результаты деятельности, хорошо формализуются, что создает предпосылки для создания системы автоматизированной обработки таких показателей. Возникает вопрос: каким образом эти показатели появляются на входе системы?

### **ФОРМИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ СУЩЕСТВУЮЩИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Система управления высшим учебным заведением имеет иерархическую структуру. Характерной особенностью вуза является наличие информационных ресурсов на всех уровнях системы управления. Первичные данные образуются на нижних уровнях и, продвигаясь вверх по системе управления, приобретают новые

формы – агрегаты. Многоцелевой характер деятельности вуза подразумевает наличие направлений, которые имеют различные цели, системы учета результатов, правила документооборота и отчетности, лицензирования и аттестации и др. Причем направления эти (наука, образование, финансы и др.) не изолированы друг от друга, а имеют сложные управленческие взаимосвязи. В силу сказанного, построение единой системы, которая бы учитывала правила функционирования подразделений вуза, является очень трудоемкой задачей [9-10].

Первичная информация образуется в различных подразделениях и, появившись, становится составляющей информационных ресурсов организации. Эти информационные ресурсы содержат (в том числе) и первичные сведения (факты), лежащие в основе применения методик оценки деятельности вуза. На базе первичных показателей путем проведения соответствующей обработки (предполагаемой используемой системой оценки деятельности) получают вторичные показатели. Первичные и вторичные показатели подвергаются анализу, агрегируются с целью оценки деятельности научно-образовательного учреждения по тем или иным направлениям. Полученная в ходе реализации описанной цепочки действий информация (показатели, результаты их систематизации, агрегирования и моделирования) и представляет собой информационно-аналитические ресурсы организации. Это данные, прошедшие необходимую обработку и подготовленные для того, чтобы быть представленными субъекту управления для рассмотрения и выработки требуемых управляющих воздействий. Описанная последовательность преобразования информации, а также место информационно-аналитических ресурсов и системы показателей оценки деятельности в контуре управления вуза, представлены на рисунке 2.

Необходимо отметить, что многие научно-образовательные учреждения в настоящее время испытывают определенные трудности с формированием полноценной системы ИАР. Связано это не только с необходимостью методики формирования непосредственно самих ИАР, но и с технологическими трудностями реализации последовательности, представленной на рисунке 2. Так, например, на сегодняшний день в Орловском государственном техническом университете (ОрелГТУ) составной частью системы информационно-аналитических ресурсов являются автоматизированные системы, работающие в рамках определенного направления деятельности (образовательная деятельность – автоматизированная система «Деканат», научная библиотека – система «LIBER», бухгалтерский учет – система «Парус», система кадрового учета и др.). На технологическом уровне, функционирование этих систем не имеет прямых взаимосвязей, однако зачастую они работают с общими данными (например, данные о студентах в системах «Деканат» и «LIBER»). На текущий момент первичные информационные ресурсы ОрелГТУ представляют собой сочетание данных, представленных на бумажных носителях, и данных, представленных в рамках различных информационных систем.

На основании имеющихся информационных ресурсов возможно построить автоматизированную систему, которая будет аккумулировать в себе данные о деятельности вуза и производить подготовку и анализ данных, используя различные методики оценки деятельности научно-образовательных учреждений, т.е. будет формировать информационно-аналитические ресурсы. Трудность заключается в том, что исходные данные для работы такой системы находятся внутри других систем, причем у каждой свой формат и метод хранения данных. Исходя из этого, при проектировании указанной системы необходимо, с одной стороны, обеспечить

максимальную масштабируемость и гибкость по отношению к формату исходных данных, а, с другой стороны, предусмотреть в системах, аккумулирующих первичную информацию, методы обработки, которые приводят данные в согласованную форму.

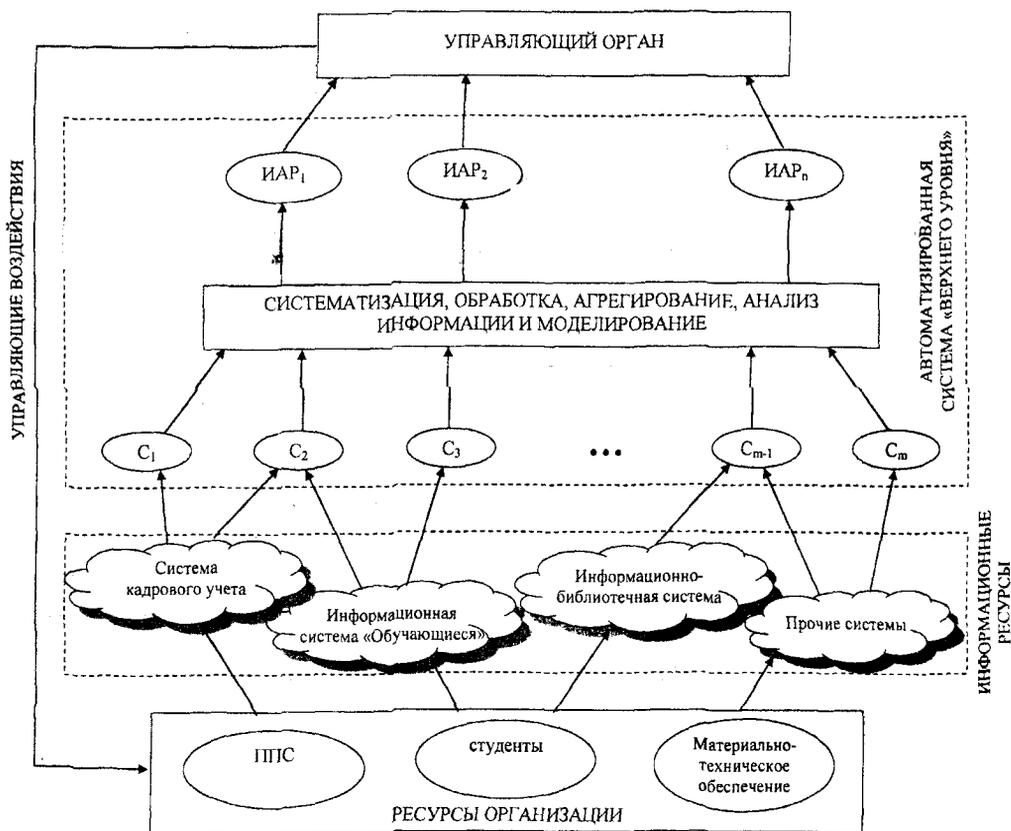


Рисунок 2 – Место информационно-аналитических ресурсов и системы показателей оценки деятельности в контуре управления ИОК

ИАР<sub>1</sub>, ИАР<sub>2</sub>, ..., ИАР<sub>n</sub> – совокупность информационно-аналитических ресурсов; n – количество компонентов данных, входящих в ИАР организации; С<sub>1</sub>, С<sub>2</sub>, ..., С<sub>m</sub> – первичные показатели, характеризующие деятельность вуза; m – количество первичных показателей.

Структурно можно представить, что в новой системе реализованы относительно независимые компоненты, отвечающие за обработку данных, поступающих из разных информационных источников. Исходя из такой компоновки, рационально применить распределенную, предварительную обработку данных, поступающих из разных информационных систем. Основную обработку данных, связанную с применением различных методик оценки, целесообразно выполнять централизованно.

Стоит отметить достаточную сложность согласования разрозненных компонентов, необходимых для формирования ИАР, что требует не только технологических инноваций, но и изменений в процессах управления.

В то же время, большинство вузов на данный момент находятся в аналогичной ситуации, т.е. целостная информационная система, проектировавшаяся с учетом всего комплекса информационных процессов, по сути, отсутствует. Внедрение же подобной системы «с основания» для крупной организации (как правило, с ограниченными финансовыми ресурсами) является чрезвычайно трудоемким. В такой ситуации приемлемым решением является интеграция различных информационных систем,

каждая из которых «поставляет наверх» те сведения, которые требуются для оценки деятельности и выработки управляющих воздействий.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная схема предполагает создание и внедрение системы оценки деятельности вуза на основе уже имеющейся в организации структуры первичных информационных ресурсов. Это позволит формировать информационно-аналитические ресурсы организации, интегрируя данные разнородных информационных систем. Целью использования описанного подхода является получение возможности эффективно отслеживать динамику развития вуза по всем направлениям деятельности, влияние принятых управленческих решений на различные подсистемы научно-образовательного учреждения, прогнозировать последствия управляющих воздействий.

Необходимость в реализации подобной системы особенно явно прослеживается на фоне увеличивающейся конкуренции на рынке образовательных услуг, что делает задачу получения объективных оценок по всем важнейшим направлениям деятельности организации еще более актуальной.

*Примечание:* данные исследования проводятся в рамках НИР «Повышение эффективности управления интегрированными образовательными комплексами на основе информационно-аналитических ресурсов» ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 году

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев В. А. Экспертная оценка проведения, организации и результатов научно-исследовательской деятельности в вузе. Методические рекомендации; под ред. Н.Д. Адамовича. – М.: Национальный институт бизнеса, 2006. – 50 с.
2. О внесении изменений в приказ Минобрнауки России от 26.02.2001 № 631 «О рейтинге высших учебных заведений» [Электронный ресурс]. — Электрон. текстовые, граф. дан. – Министерство образования и науки Российской Федерации – URL: [http://www.edu.ru/db-mon/mo/Data/d\\_03/593.html](http://www.edu.ru/db-mon/mo/Data/d_03/593.html).
3. Инженерное образование: сб. науч. тр. / Ассоциация инженерного образования России. – Выпуск 3 (2005) / – 200 с. – 700 экз. – М.: Ассоциация инженерного образования России – ISSN-1810-2883.
4. Оценка качества образования как инструмент оценки деятельности вузов [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые, граф. дан. – ООО «ЭКОРИС-НЭИ» (в интересах Федерального агентства по образованию Российской Федерации) – URL: [http://www.uisrussia.msu.ru/docs/nov/ecorys/act10\\_6.doc](http://www.uisrussia.msu.ru/docs/nov/ecorys/act10_6.doc).
5. Использование показателей результатов деятельности в стратегическом планировании вузов [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые, граф. дан. - ООО «ЭКОРИС-НЭИ» (в интересах Федерального агентства по образованию Российской Федерации) – URL: [http://www.uisrussia.msu.ru/docs/nov/ecorys/act10\\_7.doc](http://www.uisrussia.msu.ru/docs/nov/ecorys/act10_7.doc).
6. Использование показателей результатов при финансировании вузов: зарубежный опыт [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые, граф. дан. – ООО «ЭКОРИС-НЭИ» (в интересах Федерального агентства по образованию Российской Федерации) – URL: [http://www.uisrussia.msu.ru/docs/nov/ecorys/act10\\_8.doc](http://www.uisrussia.msu.ru/docs/nov/ecorys/act10_8.doc).
7. Среднесрочные программы развития РУДН, факультетов и институтов на 2010-2012 гг. Конференция научно-педагогических работников, представителей других обучающихся РУДН. – М.: РУДН, 2010.
8. Модуль сбора данных для ВУЗов 2009 [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые, граф., зв. дан. и прикладная прогр. (546 Мб). – Национальное

аккредитационное агентство в сфере образования – URL:  
<http://www.nica.ru/software/detail.php?ID=158>.

9. Новиков Д.А., Глотова Н.П. Модели и механизмы управления образовательными сетями и комплексами. – М.: Институт управления образованием РАО, 2004. – 142 с.
10. Коськин А.В. Информационно-аналитические ресурсы для управления организационно-техническими системами: монография; под общ. ред. И.С. Константинова. – М.: Машиностроение-1, 2006. – 220 с.

**Терентьев Сергей Викторович**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Кандидат экономических наук, доцент кафедры «Информационные системы»  
Тел.: 8-910-307-46-53,  
E-mail: terser76@inbox.ru

**Бондарев Владимир Анатольевич**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Аспирант кафедры «Информационные системы»  
Тел.: 8-920-811-26-63,  
E-mail: elsolist@gmail.com

А.Л. ЦАРЕГОРОДЦЕВ

**ПРИМЕНЕНИЕ XML В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ МЕДИЦИНСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ**

*В статье анализируется проблема хранения, обработки и передачи медицинских данных в распределенных медицинских информационных системах. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что медицинские данные следует рассматривать как полуструктурированные, а для их хранения и обработки предлагается использовать XML-контейнеры. Показаны основные преимущества применения данного подхода применительно к различной медицинской информации.*

*Ключевые слова:* медицинские данные; полуструктурированная информация; XML-контейнер; медицинские информационные системы.

*The problem of storage, processing and transfer of medical data in the distributed medical information systems is analyzed in the paper. The obtained results allow concluding that the medical data should be considered as semi-structured and for their storage and processing it is proposed to use XML-containers. The basic advantages of this approach application regarding different medical information are shown.*

*Keywords:* medical data; semi-structured information; XML-container; medical information systems.

В настоящее время существует большое количество крупномасштабных автоматизированных медицинских информационных систем как в России, так и за рубежом. Основные задачи таких медицинских информационных систем – это хранение, обработка и обмен информации о пациенте. В большинстве случаев при решении подобных задач сталкиваются с двумя основными проблемами.

Во-первых, это проблема хранения медицинских данных. В подавляющем большинстве медицинские информационные системы хранят данные о пациентах, используя реляционную модель [1], [2], изобретенную Коддом в 1970 году. Как известно, для представления данных в реляционной базе данных используются понятия множества сущностей и связь. При этом реляционная модель использует только один способ организации данных через отношения, которые реализуют множества сущностей и связи между ними. Этот подход, с одной стороны, позволяет не учитывать особенности данных, хранящихся в реляционной базе данных, с другой предполагает точное знание структуры хранимых данных. При использовании реляционной модели хранения данных все строки в какой-либо таблице всегда имеют одинаковый набор полей, кроме того, все названия столбцов, первичные и внешние ключи в таблицах должны быть определены заранее. При появлении данных с новой структурой, не встречавшейся в реляционной базе данных до этого момента, в схему базы данных необходимо вносить изменения. Порой эти изменения бывают столь существенны, что требуется перестраивать всю структуру базы данных.

Вторая распространенная проблема медицинских информационных систем – это передача медицинской информации между системами. Медицинская информация о пациенте в различных медицинских информационных системах хранится по-разному. Проблема заключается в том, что даже при объединении источников, данные которых хорошо структурированы, не всегда удается создать жесткую структуру для получения суммарных данных.

Таким образом, для организации хранения, обработки и передачи медицинских данных требуется решить две проблемы:

1. Хранение и обработка медицинских данных, имеющих нечеткую, «размытую» структуру;
2. Интеграция медицинских данных из различных информационных систем.

Чтобы решить эти две проблемы, рассмотрим основные особенности медицинских данных:

1. Неправильная структура. В различных источниках данных одни и те же сущности реального мира могут моделироваться с помощью разных структур и типов данных. «Примером полуструктурированных данных может служить запись в медицинской карте. Так, для одного пациента она может содержать перечень прививок, для другого – показатели роста и веса, для третьего - операции, который ему сделали. Другой пример полуструктурированных данных – юридические документы, генеалогические записи.. »[3]. Другим примером могут служить технические характеристики медицинских приборов, которые описываются параметрами, качественно отличающимися у разных моделей. При объединении разнородных источников можно попытаться сконструировать новую структуру, включающую в себя все разнородные данные. Однако при большом количестве источников создание такой единой структуры может натолкнуться на непреодолимые технические трудности, либо эта структура окажется настолько сложной, что ее использование станет неэффективным. Если отказаться от попыток создания общей структуры для всех данных, то интегрированные данные будут иметь неправильную структуру.

2. Неявная структура. Значительное количество медицинских данных и имеет некоторую структуру, но она является неявной. Например, медицинские данные результатов различных анализов включают в себя очень большое число показателей, классификация которых не разработана. Кроме того, медицинские данные иногда имеют неизвестную структуру, примером чего могут служить мультимедийные данные телемедицинских консультаций или документы со структурированным текстом.

3. Частичная структурированность. В ряде случаев большая часть медицинских данных, работу с которыми необходимо автоматизировать, имеют четкую структуру. Для хранения этой части данных используются традиционные системы управления реляционными базами данных и разрабатываются методы связи структурированных данных с оставшимися данными, которые не удалось структурировать и которые приходится хранить не в базе данных, а в других системах, например, в файловой системе.

4. Частое изменение структуры. Структура медицинских данных может подвергаться частому изменению. Примером могут служить медицинские отчеты, в которых каждый год одни показатели добавляются, а другие исчезают.

5. Апостериорная структура медицинских данных. Как известно, реляционные СУБД используют жесткофиксированную структуру данных. В таких СУБД сначала описывается структура хранения данных и только затем база наполняется данными. При работе с медицинскими данными целесообразно применять обратный подход: структура базы данных определяется на этапе заполнения медицинской информацией. Системы, работающие по данному принципу, называют системами с апостериорной схемой. Использование этого подхода дает наибольшую гибкость при формировании базы данных и предоставляет возможность изменять структуру базы данных.

Описанные особенности медицинских данных позволяют сделать вывод о том, что медицинские данные следует рассматривать как полуструктурированные данные, т.е. данные, которые способны динамически изменять свою структуру, свой состав и тип. Полуструктурированные данные сами в себе несут информацию о том, как их

представлять, при этом схема данных может изменяться независимо, учитывая новые требования. «Полуструктурированные данные сложно хранить в реляционной базе данных, поскольку в этом случае у вас либо много различных таблиц (что означает многочисленные соединения и продолжительное время поиска), либо единственная таблица с множеством пустых колонок» [3]. На основании вышесказанного можно заключить, что хранение полуструктурированных данных в реляционной базе данных негативно сказывается на продолжительности времени поиска данных и поддержке их целостности в базе данных.

Полуструктурированные данные можно представить в виде графа с направленными дугами, в котором каждая вершина является элементом данных, а каждая дуга имеет метку. Листья графа или атомарные объекты содержат собственно данные, в то время, как внутренние вершины являются контейнерами или составными объектами, собирающими воедино несколько подобъектов. Дуги, выходящие из составного объекта, указывают на содержащиеся в нем подобъекты. В отличие от реляционной модели, данные здесь самодостаточны, т.к. схема представления данных содержится в самих данных.

Для работы с полуструктурированными данными можно использовать расширяемый язык разметки XML (eXtensible Markup Language). Основными свойствами языка XML являются [4]:

– Независимый формат данных. Если использовать XML как формат входных и выходных данных медицинских информационных систем, данные становятся независимы от самих систем, что повышает уровень взаимодействия;

– Различное представление одних и тех же данных. На основании того, что формат представления данных не зависит от медицинских систем, следует, что одни и те же данные можно отображать разными способами и разными системами;

– Улучшенные возможности поиска данных. Поскольку XML определяет семантическую структуру медицинских данных, это способствует созданию дополнительных возможностей для поиска медицинской информации;

– Облегчение доступа к данным. В настоящее время существует огромное количество различных медицинских информационных систем, хранящих данные о пациентах в разнородных и несовместимых форматах. Перевод такой медицинской информации в XML-формат позволит решить проблему интеграции разнородной медицинской информации из различных источников;

– Более простая разработка приложений. XML делает необязательной реализацию поддержки большого количества бинарных форматов, вследствие чего разработка информационных систем для медицинских нужд становится значительно проще;

– Использование готовых решений. При управлении данными часто возникает необходимость решения множества однотипных задач, например, верификация данных, лексический и синтаксический разбор и т.д. Переход к XML-формату позволит обойти необходимость создания собственных реализаций для решения подобных задач;

– XML файл является обычным текстовым файлом и может быть прочитан человеком;

– XML поддерживается большим количеством стандартов. Эти стандарты предназначены для того, чтобы гарантировать совместимость приложений пользователя и готовых решений.

Технология XML по своей сути является синтаксисом, позволяющим создавать языки разметки, описывающие полуструктурированные данные [1,4]. Для решения

задачи хранения и передачи медицинских данных необходимо определить спецификацию множества возможных XML-представлений медицинской информации, которая будет обрабатываться. Для этого используются словари XML-представлений, по сути являющихся схемами данных, представленных в формате XML. Логическая модель данных XML довольно близка к модели структурированных данных [5]. Схемы XML описывают структурные и семантические ограничения, которые должны выполняться в любой конкретной реализации данных соответствующего XML-представления.

В настоящее время существует множество спецификаций схем данных, поддерживаемых различными организациями (W3C, WSG, ISOC, OASIS и т.д.). Все они предназначены для спецификации структурного и семантического содержания XML. Наиболее популярными языками описания структуры XML являются XML Schema [6], RelaxNG [7], DTD [8], XDR [9]. Несмотря на то, что языки описания схем достаточно сильно различаются, многие принципы построения ограничений схожи. В большей степени это касается структурных ограничений. Поэтому многие свойства структурных ограничений в терминах одного языка имеют свои аналоги для другого языка описания схем. Например, язык DTD является одним из наиболее простых языков описания схем XML. Выразительная мощность этого языка существенно ниже, чем в других [10], однако этот язык имеет одно из главных преимуществ, он является наиболее простым и распространенным. Использование DTD как языка описания XML-контейнеров для медицинской информации является удобным решением.

Для хранения медицинская информация представляется с помощью XML-контейнеров. При этом основная информация может содержаться в обычных реляционных таблицах, а вся медицинская информация в полях таблиц типа XMLTYPE в виде XML-контейнеров. В этом случае при модификации структур данных будут изменяться только представления XML-контейнеров и формат вывода медицинских данных из базы данных в клиентское программное обеспечение, что, как известно, не является трудоемкой задачей.

Использование XML-контейнеров для хранения различной медицинской информации позволит значительно сократить число таблиц базы данных, в свою очередь, уменьшив глубокую иерархию данных. В целом при выполнении запросов над иерархическими данными, в которых соединения требуются только для воссоздания иерархии, хранение данных в XML-контейнерах является эффективнее использования реляционных баз данных.

Кроме хранения данных XML-контейнеры также можно использовать для передачи медицинских данных между различными медицинскими информационными системами. В общем случае медицинская информационная система формирует XML-контейнер с медицинскими данными. Передает его по общедоступным каналам связи, используя протокол SOAP напрямую или через выделенный сервер, в другую медицинскую информационную систему. Выделенный сервер применяется в данном случае для сбора и отправки медицинских данных в XML-формате между различными медицинскими системами.

Как известно, SOAP (Simple Object Access Protocol) – это протокол обмена структурированными сообщениями в распределенных информационных системах. Первоначально SOAP предназначался для реализации удалённого вызова процедур, в настоящее время протокол используется для обмена произвольными сообщениями в XML-формате.

В общем случае XML-контейнер может содержать следующую информацию:

```

<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<root>
/* Данные пациента */
<PATIENTS>
  <ID>Уникальный идентификатор пациента в системе</ID>
  <LNAME>Фамилия пациента</LNAME>
  <FNAME>Имя пациента</FNAME>
  <MNAME>Отчество пациента</MNAME>
  <DATE_B_DAY>Дата рождения пациента</DATE_B_DAY>
  <MALE>Пол пациента</MALE>
  <HISTORY>История болезни пациента</HISTORY>
  <ANALIS>Данные анализов (возможна многоуровневая
вложенность)</ANALIS>
</PATIENTS>
/* Дополнительные данные по истории болезни пациента
<ADD_DATA>
  <ID>Уникальный идентификатор</ID>
  <URL>Имя файла, содержащего дополнительные данные истории болезни
пациента</URL>
  <MIME_TYPE>MIME-тип файла</MIME_TYPE>
  <SIZE>Размер файла</SIZE>
  <SYSTEM>Информационная система, предназначенная для просмотра файлов
данного типа</SYSTEM>
</ADD_DATA>
</root>

```

Использование XML-контейнеров для хранения и передачи медицинских данных позволит качественно улучшить разработанные в настоящее время медицинские информационные системы за счет:

- упрощения структуры хранения данных;
- увеличения скорости доступа к медицинской информации в базе данных;
- уменьшения времени поиска медицинской информации в базе данных за счет отсутствия глубокой иерархии таблиц в базе данных;
- упрощения процедуры занесения медицинской информации в базу данных;
- быстрого изменения структуры хранения медицинской информации в базе данных в случае необходимости;
- упрощения приведения медицинской информации к общей структуре при попытке интеграции этой информации из различных медицинских информационных систем или источников данных.

Таким образом, хотелось бы отметить, что развитие медицинских информационных систем невозможно без использования XML для представления, хранения и передачи медицинских данных.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ullman J. Principles of Database and Knowledgebase Systems, Volumes 1 and 2. Computer Science Press, Rockville, MD., 1989.
2. Ульман Дж. Основы систем баз данных. Финансы и статистика, Москва, 1984.
3. Ronald Bourret, XML and Databases,  
URL:<http://www.rpbourret.com/xml/XMLAndDatabases.htm>.
4. Бумфрей Ф., Диренцо О. И др. XML: Новые перспективы WWW. М.: ДМК, 2000.

5. Suciu, D. Semistructured Data and XML. In Proc. of the Int. Conf. on Foundations of Data Organization, 1998.
6. H. S. Thompson, D. Beech, M. Maloney, and N. Mendelsohn (Eds). XML Schema Part 1: Structures, W3C Recommendation, May 200. URL: <http://www.w3.org/TR/xmlschema-1/>.
7. J. Clark and M. Murata (Eds). «RELAX NG Tutorial». OASIS Working Draft, Jun. 200 <http://www.oasisopen.org/committees/relax-ng/tutorial.html>.
8. Extensible Markup Language (XML) 0 (Second Edition) W3C Recommendation 6 October, 2000. URL: <http://www.w3.org/TR/2000/REC-xml-20001006>.
9. Microsoft. XML Schema Developer's guide Internet document, May 2000 URL: <http://msdn.microsoft.com/xml/XMLGuide/schema-overview.asp>.
10. Dongwon Lee, Wesley W. Chu. Comparative Analysis of Six XML Schema Languages. SIGMOD Record 29(3): 76-87 (2000).

**Царегородцев Александр Леонидович**

Югорский государственный университет, г. Ханты-Манси.....

Кандидат технических наук, доцент кафедры АСОИУ

Тел.: 8 (3467) 359135

E-mail: [alexts@uriit.ru](mailto:alexts@uriit.ru)

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ**

УДК 004.94

А.В. АВЕРЧЕНКОВ, А.Е. СИМУНИ, М.В. ТЕРЕХОВ, В.А. ШКАБЕРИН

**ПОДГОТОВКА УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ  
ДЛЯ СТАНКОВ С ЧПУ В ИНТЕГРИРОВАННОЙ САПР  
PRO/ENGINEER С ПРИМЕНЕНИЕМ ВИРТУАЛЬНЫХ  
МОДЕЛЕЙ ОБОРУДОВАНИЯ, РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА  
И СТАНОЧНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ**

*В статье рассмотрены подходы к разработке и отладке управляющих программ для станков с ЧПУ на основе виртуальных моделей оборудования, режущего инструмента и станочных приспособлений.*

*Ключевые слова:* инструмент; станочное приспособление; режимы резания; САПР; станок с ЧПУ; методика; постпроцессор.

*The article describes the approaches to the development and debugging of control programs for CNC machine tools based on virtual models of equipment, cutting tools and machine tool accessories.*

*Keywords:* tool; machine-tool accessories; cutting; CAD; CNC; methodology; postprocessor.

В настоящее время на развитых промышленных предприятиях значительная доля управляющих программ (УП) для оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ) разрабатывается с использованием САМ-систем, что является наиболее эффективным методом. Использование САМ-систем позволяет существенно сократить время написания управляющих программ для деталей как сложной, так и простой формы. Помимо сокращения времени на создание УП увеличивается и точность обработки, появляется возможность применения современных способов обработки, таких, как высокоскоростное фрезерование, сверление и т.д.

Был проведен анализ производственного опыта использования интегрированной САПР Pro/ENGINEER для конструкторско-технологической подготовки производства изделий разной сложности [1]. Выбор этой САПР обоснован тем, что семейство интегрированных 3D CAD/CAM/CAE-решений Pro/ENGINEER дает существенные преимущества инженерам, так как обладает полной ассоциативностью. Это означает, что любое изменение, вносимое в проект, автоматически отражается во всех зависимых компонентах без необходимости преобразования данных. Благодаря этому разработчики не только экономят время, но и избегают ошибок конструирования, связанных с таким преобразованием. Возможности системы легко расширяются при добавлении пакетов математических расчетов, управления данными, предварительного просмотра и создания технической документации. Разработчики могут без труда получить доступ к данным и связаться с коллегами через веб-интерфейс. Общеизвестно, что никакой другой пакет для разработки продукции не обладает такой функциональностью и таким быстродействием на единой, полностью масштабируемой платформе.

На основе проведенного анализа разработана новая методика технологической подготовки производства изделий на станках с ЧПУ (рис. 1) с использованием виртуальных моделей оборудования, режущего инструмента и станочных приспособлений (виртуальная подготовка производства) [2,3].

В основе методики лежит идея о необходимости полной отработки управляющей программы для оборудования с ЧПУ на компьютере, исключая применение для этого непосредственно станка, необходимости автоматизировать процессы подбора режущих инструментов и назначения режимов резания.

При традиционном широко распространенном на отечественных предприятиях подходе к технологической подготовке производства технолог-программист с использованием САМ-системы формирует траекторию движения режущего инструмента, при этом режимная часть программы назначается исходя из эмпирического опыта инженера. После чего, используя постпроцессор, программист генерирует управляющую программу в G-кодах конкретного станка, причем в большинстве случаев сгенерированный код нуждается в доработке в текстовом виде. Это связано с тем, что используемый постпроцессор является индивидуальным для каждого станка и, как правило, написан сторонними разработчиками. Затем программа передается на станок, где производится ее отработка и оптимизация.

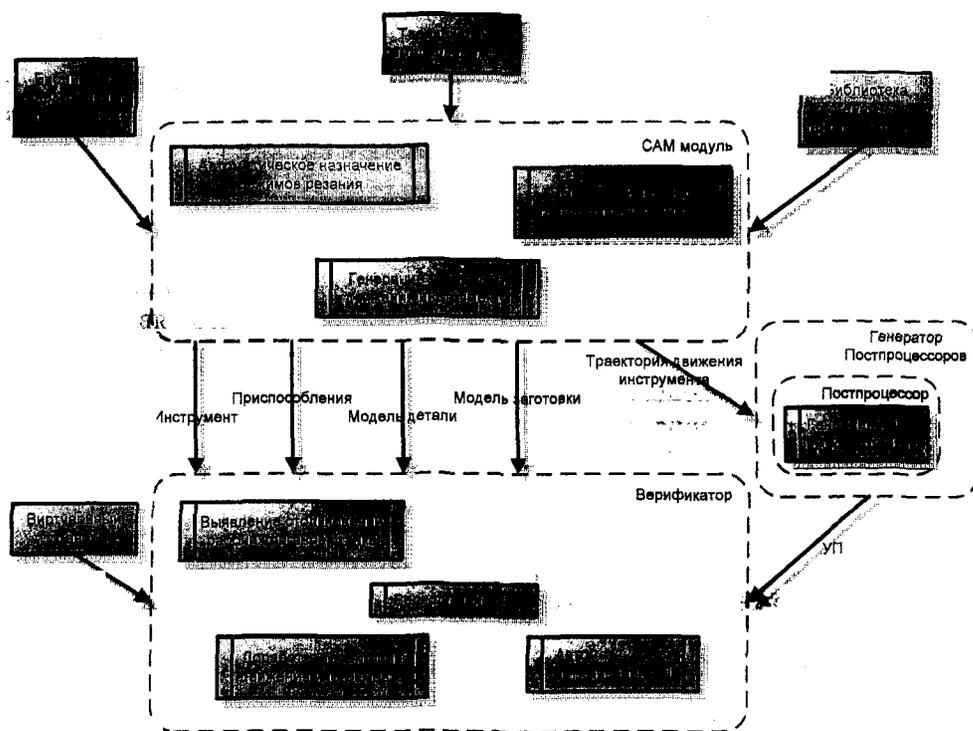


Рисунок 1 – Схема виртуальной технологической подготовки производства изделий на станках с ЧПУ

В соответствии с методикой виртуальной технологической подготовки производства изделий на станках с ЧПУ разработка УП ведется в САМ-системе с использованием данных, получаемых из библиотек режущих инструментов и станочных приспособлений, которые представлены в виде трехмерных твердотельных моделей (рис. 2).

Библиотека инструментов, помимо геометрического описания, содержит данные о режимах резания (данные о подаче, скорости и глубине резания). Режимы назначаются автоматически в зависимости от материала заготовки, инструмента и типа обработки (черновая, чистовая). Назначенные режимы резания автоматически передаются для ЧПУ-перехода в систему Pro/ENGINEER (рис. 3). При помощи библиотеки инструментов можно осуществить выбор оптимального инструмента для

получения требуемой геометрии детали. Трехмерное твердотельное представление режущих инструментов и станочных приспособлений предоставляет возможность контролировать зарезы и столкновения в зоне резания, интерактивно проверить траекторию движения инструмента (рис. 4).

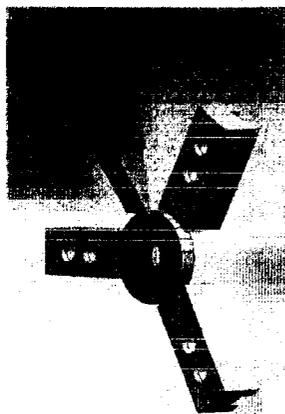


Рисунок 2 –  
Виртуальные  
трехмерные модели  
заготовки,  
приспособления и  
инструмента

Далее осуществляется генерация кода программы посредством постпроцессора. Но в отличие от традиционных подходов постпроцессор разрабатывается самим инженером с учетом его личного стиля программирования.

На данный момент для упрощения создания постпроцессоров в состав развитых технологических систем включаются специальные модули — генераторы постпроцессоров. Так, в состав системы Pro/ENGINEER для разработки постпроцессоров включен модуль G-Post, позволяющий разрабатывать постпроцессоры.

Обобщенно способы разработки постпроцессора методом генератора можно разделить на табличные и языковые.

Табличный способ наиболее простой в применении для неподготовленных пользователей. При разработке конкретного постпроцессора достаточным является заполнение типовых таблиц по инструкциям к станку и его системе управления. При существенной простоте использования возможности получения эффективных постпроцессоров с табличными генераторами значительно ограничены.

Гораздо большую гибкость предоставляет языковой способ генерации постпроцессоров. В этом случае постпроцессор составляется на упрощенном языке программирования с использованием определенного набора специальных технологических операторов.

Наиболее актуальным, рациональным и действенным методом является использование смешанной схемы создания постпроцессора. При данном подходе основные функции постпроцессора создаются заполнением типовых таблиц, а специфические составляются с помощью языкового генератора.

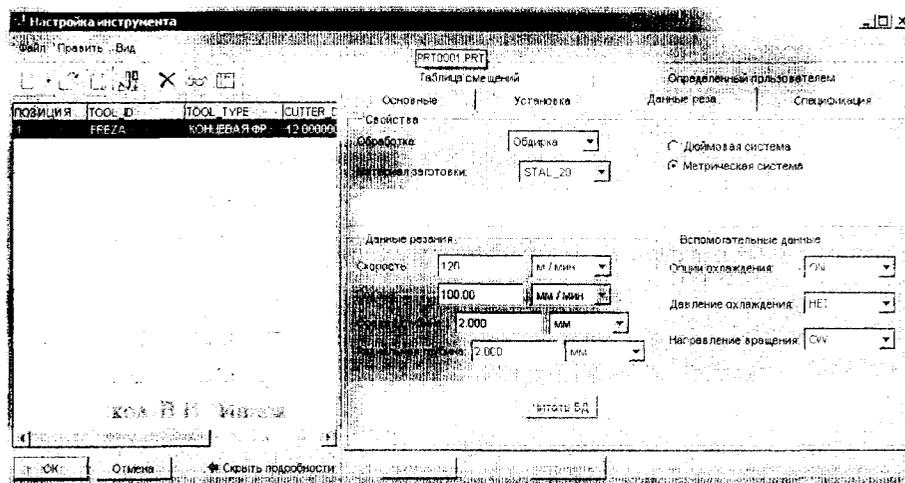


Рисунок 3 – Определение режимов резания для инструмента

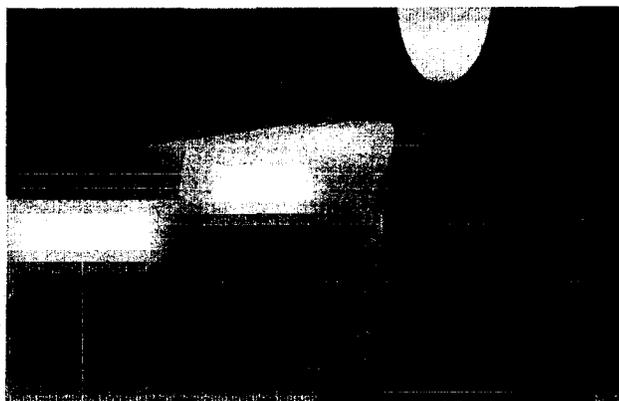


Рисунок 4 – Обнаружение зарезов при выборе режущего инструмента с неподходящей геометрией

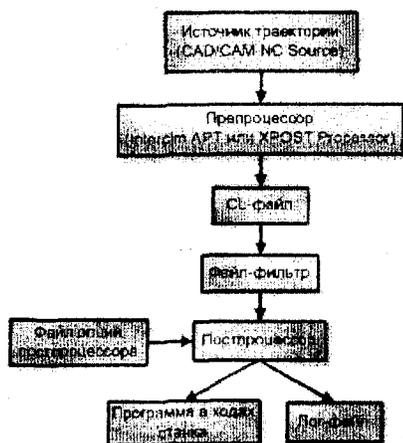


Рисунок 5 – Схема функционирования постпроцессора

При разработке постпроцессора данным методом, технолог или программист должен знать и иметь:

- руководство станка;
- перемещение осей, референтную позицию станка;
- пределы подачи по осям;
- ограничения и диапазоны шпинделя;
- контроллер станка или руководство программиста;
- G и M коды станка;
- регистр адреса, его формат и пределы;
- требования кругового движения;
- макроязык для разработки постпроцессоров.

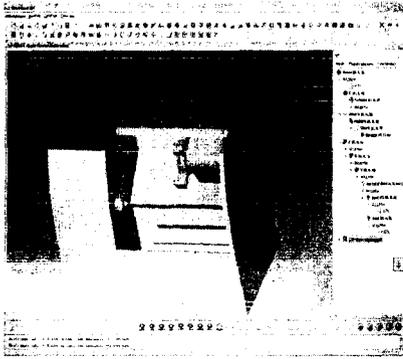
На рисунке 5 представлена схема функционирования постпроцессора разрабатываемого по смешанной схеме.

В САМ системе формируется траектория движения инструмента, которая передается препроцессору, формирующему на ее основе CL-файл. Этот файл обрабатывается фильтром. Этот фильтр служит для корректировки CL-данных и приведения их к виду, корректно обрабатываемому постпроцессором. Кроме того, фильтр содержит в себе специфические команды постпроцессора, которые невозможно задать табличным способом. Фильтр представляет собой файл, написанный на макроязыке. Измененный фильтром, CL-файл передается постпроцессору. Кроме того, к постпроцессору подключается файл опций, конфигурирующий постпроцессор на конкретный станок, но не затрагивающий изменений, сделанных файлом фильтром. Этот файл создается табличным способом. После постпроцессорирования получается программа в кодах конкретного станка и создается лог- файл с описанием ошибок и предупреждений, возникших при генерации программы.

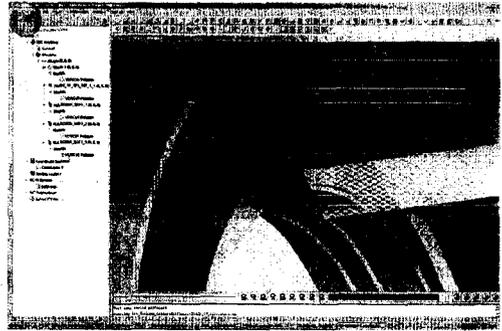
Затем в программу-верификатор передаются модели инструментов, станочных приспособлений, деталей и заготовок, управляющая программа в G-кодах и модель виртуального станка (рис. 6).

Виртуальный станок дает возможность обнаружить и локализовать коллизии между рабочими органами оборудования и приспособлениями при обработке деталей, а также отыскать ошибки в управляющей программе и выполнить оптимизацию кода. Оптимизация выполняется автоматически путем корректировки значений подачи с

учетом условий резания и удаляемого припуска и дает возможность значительно сократить общее время обработки детали.



а)



б)

*Рисунок 6 – Верификация обработки с использованием виртуальной модели станка (а) и имитационное моделирование процесса обработки (б)*

Таким образом, отработка управляющей программы производится полностью на компьютере, исключая использование технологического оборудования для этих целей. Отработка программы непосредственно на станке занимает значительное время, что приводит к нерациональному использованию оборудования, увеличению временных затрат на подготовку производства. Кроме того, при отработке УП на станке есть вероятность повредить оборудование, оснастку и инструмент из-за ошибок в коде программы.

Созданная методика была апробирована на базе Инновационного центра высоких технологий в машиностроении при Брянском государственном техническом университете на современном технологическом оборудовании: токарно-фрезерном обрабатывающем центре Takisawa EX 308 и вертикально-фрезерном обрабатывающем центре QUASER MV154EL, а также на ряде промышленных предприятий Брянской области.

Выполненное научное исследование и апробация его результатов на реальных изделиях показали, что использование разработанной методики позволяет существенно сократить время подготовки производства за счет полного компьютерного моделирования, верификации и оптимизации обработки, автоматического назначения режимов резания.

**Примечание:** научные исследования выполнены в рамках реализации проекта «Разработка математических моделей, информационного и программного обеспечения для поддержки инновационных решений в области высоких технологий наукоёмких производств» ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверченков В.И. Инновационные центры высоких технологий в машиностроении: монография / Аверченков В.И., Аверченков А.В., Шкаберин В.А., Беспалов В.А., Казаков Ю.М., Симуни А.Е., Терехов М.В.; под общ. ред. Аверченкова В.И., Аверченкова А.В – Брянск: БГТУ, 2009. – 190 с.
2. Симуни А.Е., Терехов М.В. Создание управляющих программ для станков с ЧПУ на основе схем технологической подготовки производства // Повышение эффективности

механообработки на основе моделирования физических явлений: Всероссийская научно-техническая конференция. – Рыбинск, 2009. – Ч. 2. – С. 166-169.

3. Симуни А.Е., Терехов М.В. Разработка и использование схем виртуальной подготовки производства высокоточных деталей с использованием современных интегрированных САПР высокого уровня // Наука и производство – 2009: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (19-20 марта 2009 г., г. Брянск): в 2 ч.; под ред. С.П. Сазонова, П.В. Новикова. – Брянск: БГТУ, 2009. – Ч.2. с. 178-179.

**Аверченков Андрей Владимирович**

ГОУ ВПО «Брянский государственный технический университет», г. Брянск  
Кандидат технических наук  
Доцент кафедры «Компьютерные технологии и системы»  
Тел.: 8(4832)56-49-90  
E-mail: mahar@mail.ru

**Терехов Максим Владимирович**

ГОУ ВПО «Брянский государственный технический университет», г. Брянск  
Аспирант кафедры «Компьютерные технологии и системы»  
Тел.: 8(4832)56-49-90  
E-mail: mterekhov@tu-bryansk.ru

**Симуни Антон Евгеньевич**

Институт конструкторско-технологической информатики Российской Академии наук  
г. Москва  
Аспирант  
Тел.: 8(4832)56-49-90  
E-mail: aesimuni@tu-bryansk.ru

**Шкаберин Виталий Александрович**

ГОУ ВПО «Брянский государственный технический университет», г. Брянск  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Компьютерные технологии и системы»  
Заместитель директора Брянского областного центра  
новых информационных технологий  
Тел.: 8(4832)56-49-90  
E-mail: vash@tu-bryansk.ru

УДК 004.8

А.И. ВОВЧЕНКО, В.А. ЛОМАЗОВ

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕСНЫХ ПАР

*В статье рассмотрена необходимость применения автоматизированных систем исследования состояния железнодорожного подвижного состава, выделены основные требования к разрабатываемой АСНИ, предложена схема АСНИ оценки состояния колесных пар.*

*Ключевые слова:* автоматизированная система; АСНИ; иммунные системы; подвижной состав.

*The article discusses the need for automated systems in the study of railway rolling stock, provided the basic requirements for developed ARS, proposed a scheme ARS assessment wheelsets.*

*Keywords:* automated system; ARS; immune system; railway rolling stock.

Применение автоматизированных систем научных исследований (АСНИ) для оценки состояния железнодорожного подвижного состава обусловлено высокими требованиями к достоверности используемой информации и надежности принимаемых на ее основе решений, а также большим объемом данных и сложностью алгоритмов их обработки.

В настоящее время подходы к оценке состояния подвижного состава [1], как правило, носят регламентный характер, или невозможны для повсеместного внедрения в силу своей высокой стоимости. Главным недостатком регламентных работ является отсутствие учета условий эксплуатации (интенсивность эксплуатации, климатические условия, радиус кривизны пути, применение смазок и пр.), которые могут оказать существенное влияние на степень износа. Использование подхода, предполагающего установку датчиков износа на каждую колесную пару с выводом информации на главный диспетчерский пункт, ограничено в силу значительности затрат, связанных с оборудованием и непосредственным проведением такого рода исследований [2].

В качестве одного из возможных вариантов решения данной проблемы предлагается использование автоматизированных систем научных исследований. Разработанная АСНИ «Автоматизированная система исследования состояния подвижного состава» (АСИ ПС) предназначена для построения прогнозов износа колесной пары и поддержки принятия решения по дальнейшему ремонту на основе статистических данных эксплуатации подвижного состава. На этапе проектирования были сформированы [3] следующие требования к АСИ ПС:

- обеспечение поддержки принятия решений по типу проводимых регламентных ремонтных работ на основе результатов исследований по реальным статистическим данным;
- составление прогноза износа и планирование регламентных ремонтных работ;
- проведение модельных вычислительных экспериментов для исследования взаимосвязей между условиями эксплуатации и параметрами износа, а также необходимых регламентных ремонтных работ;
- обеспечение возможности выбора исследователем математической (информационной) модели подвижного состава в соответствии с целью исследования;
- обеспечение возможности выбора исследователем алгоритмов проведения расчетов и принятия решения в соответствии с требуемой точностью результатов;

- наличие инструментария, позволяющего вносить изменения в состав моделей и алгоритмов, используемых при проведении исследований;
- обеспечение защиты данных от случайных несанкционированных действий и возможных сбоев аппаратуры;
- аппаратно-программная независимость (кроссплатформенность);
- обеспечение интуитивно понятного и дружественного интерфейса;
- обеспечение экономичности проводимых исследований.

Структурная схема разработанной системы АСИ ПС, в состав которой входят информационная подсистема, подсистема алгоритмов, интерфейсную подсистему и подсистему визуализации и отображения, приведена на рисунке 1.

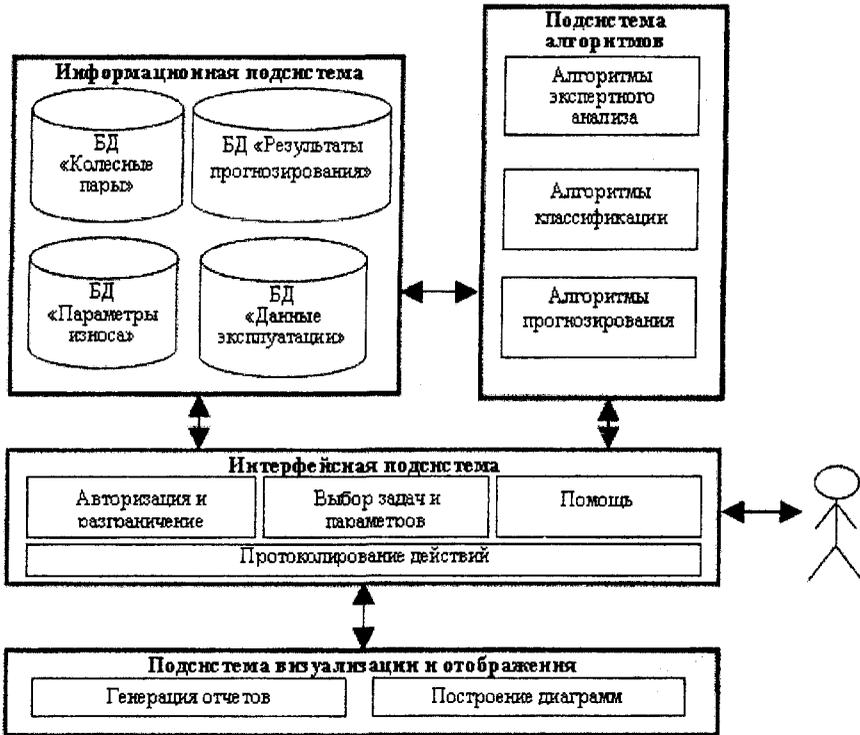


Рисунок 1 – Структурная схема АСИ «Автоматизированная система исследований состояния подвижного состава»

Информационная подсистема содержит данные о подвижном составе, условиях его эксплуатации, методах обработки этих данных, где в качестве основных показателей используются:

- исходные показатели объекта (тип, модификация, завод изготовитель и т.д.);
  - показатели степени износа объекта (количество и размер дефектов на круге катания; увеличение расстояния между внутренними гранями бандажа; ширина и толщина бандажа; появление разности в диаметрах бандажей колесной пары);
  - показатели условий эксплуатации объекта (климатические условия и степень интенсивности эксплуатации, грунт и общее техническое состояние рельсового пути, количество и интенсивность тормозных циклов, радиус кривизны пути и пр.);
- Также данные о предыдущих ремонтах объекта.

База данных «Результаты прогнозирования» содержит историю оценок состояния подвижного состава, а так же историю построения прогнозов. Это позволяет

исследователю сравнивать спрогнозированные и полученные по факту данные, тем самым выбирая подходящие алгоритмы и подходы не прерывая исследования.

Интерфейсная подсистема и подсистема визуализации и отображения, обеспечивают взаимодействие системы со специалистами, ответственными за своевременный ввод текущих данных, экспертами и исследователями. Специфика предметной области разработанной АСНИ обусловила необходимость документирования выходной информации.

Подсистема алгоритмов, предназначенная для решения задач планирования регламентных ремонтных работ, определения степени износа исследуемого объекта, выбора совокупности методов исследования состоит из трех основных модулей:

- модуль «Алгоритмы экспертного анализа»;
- модуль «Алгоритмы классификации»;
- модуль «Алгоритмы прогнозирования».

Модуль «Алгоритмы экспертного анализа» реализуют выбор экспертных технологий (выбор метода распознавания; типа метрики расстояния (близости); метода определения весовых коэффициентов отдельных показателей при обработке экспертных оценок).

Модуль «Алгоритмы классификации» содержит алгоритмы кластеризации и классификации, предназначенные для сокращения числа объектов анализа за счет перехода от рассмотрения отдельных состояний колесных пар к рассмотрению классов состояний.

Модуль «Алгоритмы прогнозирования» содержит программные реализации алгоритмов прогноза степени износа колесных пар и выявления их принадлежности к классам пригодности к эксплуатации (необходимости ремонта) на базе искусственных иммунных систем (Artificial Immune System). Общая схема прогноза состояния колесных пар методом отрицательного отбора (основного из используемых алгоритмов) приведена на рисунке 2.

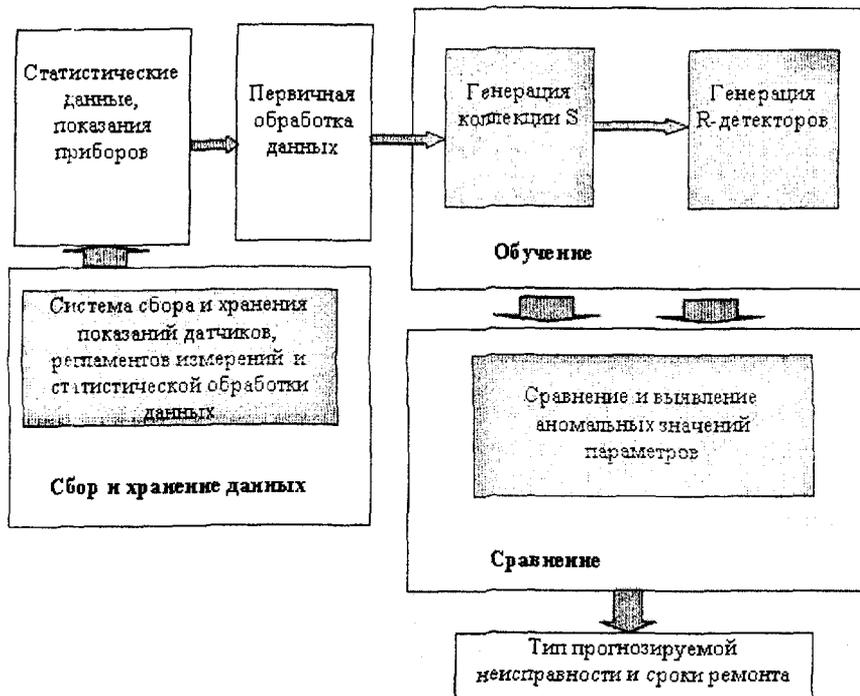


Рисунок 2 – Схема прогноза состояния колесных пар методом отрицательного отбора

Схема прогноза состояния колесных пар включает в себя следующие процедуры:  
 – сбор и хранение текущих показаний датчиков и статистических данных (например: степень износа колёсной пары, степень износа рельс и их радиусы поворота, тип и вес транспортируемого груза и пр.);

– обучение (формирование R-детекторов и конкретной коллекции S для проверяемых данных, а также оценка и дополнение R-детекторов на каждом шаге итерации);

– сравнение (проверка входных данных с сохранёнными R-детекторами и принятие решения о степени прогнозируемой неисправности).

Алгоритм отрицательного отбора искусственной иммунной системы (лежащий в основе процедур обучения и сравнения) предполагает:

– определение коллекции S из множества строк длины конечного алфавита, каждая из которых отражает прогнозируемое нормальное состояние системы (для колесной пары – набор показаний датчиков и параметров, при котором она может быть отнесена к классу годных к эксплуатации в ближайший временной период);

– создание набора детекторов R, каждому из которых не соответствует ни одна последовательность в S;

– постоянный мониторинг коллекции S на изменения и сравнение со всеми детекторами в наборе R (наличие соответствия, означает необходимость ремонта).

Фрагмент схемы играющего ключевую роль подалгоритма формирования набора детекторов приведена на рисунке 3.

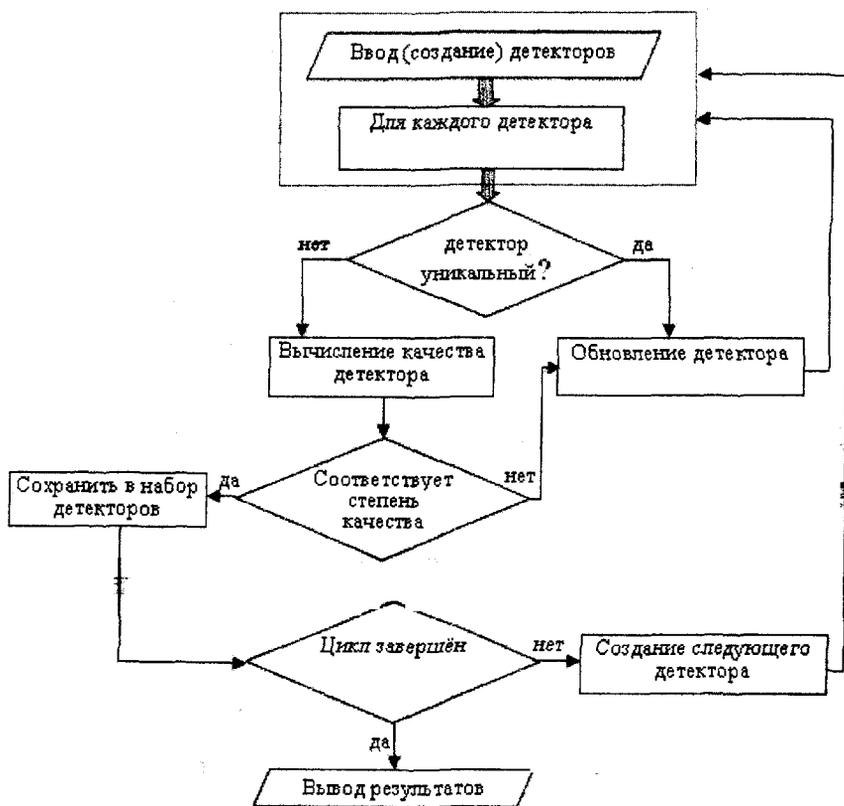


Рисунок 3 – Фрагмент схемы подалгоритма формирования набора R-детекторов

Одним из основных недостатков применяемой случайной генерации вариантов детекторов (в соответствии с [4]), является высокая вычислительная сложность

(количество детекторов растёт экспоненциально по мере увеличения размерности параметров), что может быть частично устранено путем иерархической группировки параметров (значение параметра очередного уровня прогнозируется на основе значений параметров предыдущего уровня и так далее вплоть до параметров прогнозируемых типов и сроков ремонта).

Благодаря модульной структуре разработанной АСНИ «Автоматизированная система исследования состояния подвижного состава» при необходимости дополнительные алгоритмы могут быть включены в соответствующие модули при эксплуатации. Накопление информации о параметрах используемых алгоритмов, типах решаемых при их помощи задач, а также об экспертной оценке качества полученных решений служит основой дальнейшего развития системы.

Гибкость выбора методов и настроечных коэффициентов обеспечивает возможность применения АСНИ «Автоматизированная система исследования состояния подвижного состава» для оценки и прогнозирования состояния не только колесных пар, но и других объектов, что подтверждается результатами опытной эксплуатации отдельных модулей системы на ОАО «Белгородское предприятие промышленного железнодорожного транспорта» (г. Белгород).

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Вовченко А.И. Применение информационных технологий при проведении исследований технического состояния железнодорожного подвижного состава // Известия ОрёлГТУ. Сер. «Информационные системы и технологии». – 2008. – №1-3/269(544). – С.33-36.
2. Ложечкин А.В. Методы и средства интеграции разнородных информационных систем на железнодорожном транспорте: Автореф. дис. канд. тех. наук: 05.13.06. – М., 2003. – 26 с.
3. Ломазов В.А., Вовченко А.И. Автоматизация исследований технического состояния железнодорожного подвижного состава // Материалы VI международной научно-технической конференции. – Сер. «Современные инструментальные средства, информационные технологии и инновации». – Курск. – 2008. – Ч.1.– С.40-44.
4. Araujo M., Aguilar J., Aponte H. Fault detection system in gas lift well based on Artificial Immune System // Proceedings of the International Joint Conference. 2002. – №3. – Pp.1673 -1677.

**Вовченко Александр Иванович**

Белгородская государственная сельскохозяйственная академия, г. Белгород  
Старший преподаватель кафедры информатики и информационных технологий  
E-mail: alexander.vovchenko@gmail.com

**Ломазов Вадим Александрович**

Белгородская государственная сельскохозяйственная академия, г. Белгород  
Доктор физико-математических наук  
Заведующий кафедрой информатики и информационных технологий,  
E-mail: vlomazov@yandex.ru

УДК 681.2.082:615.849.19

А.В. ДУНАЕВ, Е.А. ЖЕРЕБЦОВ, А.И. ЕГОРОВА

## ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАНАЛА ЛАЗЕРНОЙ ДОПЛЕРОВСКОЙ ФЛОУМЕТРИИ В АППАРАТЕ ЛАЗЕРНОЙ ТЕРАПИИ

*В статье предложена структурная схема компьютеризированного аппарата лазерной терапии с адаптивным управлением. В качестве сигнала обратной связи предлагается использовать канал лазерной доплеровской флоуметрии, для которого предложены к применению методики обработки данных. Показана возможность регистрации с помощью метода лазерной доплеровской флоуметрии реакции системы микроциркуляции крови при низкоинтенсивной лазерной терапии.*

**Ключевые слова:** *неинвазивная спектрофотометрия; лазерная доплеровская флоуметрия; низкоинтенсивная лазерная терапия; адаптивное управление.*

*This paper describes the block diagram of a computerized laser physiotherapy apparatus with the function of adaptive control. Laser doppler flowmetry channel is proposed to use as a channel for feedback. Kinds of data processing are selected and proposed to use for this channel. The results of using of the selected methods are presented.*

**Keywords:** *non-invasive spectrophotometry; laser doppler flowmetry; low level laser therapy; adaptive control.*

В современной медицине достаточно широкое распространение получили физиотерапевтические методы светолечения с применением низкоинтенсивного лазерного излучения (НИЛИ). Это обусловлено такими его специфическими свойствами, как монохроматичность и высокая спектральная плотность мощности, когерентность, возможность простой фокусировки (расфокусировки) оптическими линзами и зеркалами, возможность передачи энергии по оптическим волокнам (световодам), прозрачность для излучения верхних слоев кожи и слизистых оболочек органов человека и животных и т.д. В течение нескольких десятилетий был накоплен обширный клинический опыт, демонстрирующий эффективность данного вида терапевтического воздействия при лечении ряда заболеваний и патологий (гнойных ран, язв, ожогов, пародонтоза, панкреатита и др.).

Однако в настоящее время в медицинской среде нет единого мнения о дозировке назначаемых процедур низкоинтенсивной лазерной терапии (НИЛТ). Рекомендуемые значения плотности мощности и энергетической экспозиции («дозы») в разных руководствах по НИЛТ отличаются в сотни и более раз (соответственно от 0,5 до 200 мВт/см<sup>2</sup> и от 0,1 до 120 Дж/см<sup>2</sup>). Общей проблемой современной физиотерапевтической аппаратуры (и особенно отечественного производства) является практически полное отсутствие индивидуализации воздействия. Использование возможностей современных информационных технологий обеспечивает получение качественно нового уровня эффективности лечения [1].

Актуальной задачей является поиск закономерного отклика параметров биообъекта на НИЛИ. Обнаружение зависимостей «доза – эффект (реакция)» позволит ввести адаптивное управление в процедуру НИЛТ, а следовательно оптимизировать параметры воздействия, обеспечивая повышение эффективности и безопасности лечения.

В настоящее время в связи с интенсивным развитием диагностических методов, основанных на неинвазивной медицинской спектрофотометрии (НМС) – фогоплетизмографии (ФПГ), пульсоксиметрии (SaO<sub>2</sub>), оптической тканевой оксиметрии (ОТО), лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ), лазерной флуоресцентной диагностики (ЛФД) и др., всё более актуальным становится вопрос о

возможности их применения в качестве методов контроля эффективности НИЛТ в режиме реального времени. Связано это с тем, что современные приборы НМС достаточно достоверно и легко могут регистрировать изменения в микроциркуляции и оксигенации крови, что в свою очередь является одним из ключевых моментов при оценке лечебного эффекта от НИЛИ, так как в медицинской литературе вопрос о стимуляции периферического кровообращения в тканях при НИЛТ практически уже не вызывает споров [2].

В рамках поставленной задачи необходимо исследовать динамику изменений кровоснабжения периферических тканей под действием НИЛИ. Наиболее чувствительным методом регистрации динамики процессов системы микроциркуляции крови (МЦК) в биотканях на основе технологии НМС в настоящее время является метод ЛДФ, основанный на измерении доплеровского сдвига частоты, возникающего после отражения излучения от ансамбля эритроцитов, движущихся с разными скоростями и по-разному количественно распределенных в артериолах, капиллярах и венах. Результат измерений данным методом – показатель микроциркуляции (ПМ), измеряемый в перфузионных единицах (пф. ед.).

В методе ЛДФ выходной сигнал непрерывно регистрируется в течение времени исследований, и диагностика состояния МЦК основывается на анализе графической записи изменений перфузии – ЛДФ-граммы. Колебания перфузии регистрируются в виде сложного, непериодического процесса. В переменной составляющей содержится ценная информация о модуляции кровотока. Применение алгоритмов обработки сигналов для её расшифровки и анализа позволяют получать информацию о состоянии сосудистого тонуса и параметрах микроциркуляторного русла [3].

Для исследования влияния НИЛИ на динамику параметров системы МЦК проведён ряд тестовых экспериментов с использованием многофункционального диагностического комплекса «ЛАКК-М», реализующего основные методы НМС, в том числе ЛДФ, и аппарата лазерной терапии (АЛТ) «УЛАН-БЛ-20». Получены записи ЛДФ-грамм с участков кожи условно здоровых добровольцев в спокойном состоянии без какого-либо воздействия, а также ЛДФ-граммы, регистрируемые при проведении процедур НИЛТ с различными параметрами (плотность мощности, время экспозиции). Время эксперимента разбивалось на 3 фрагмента: контрольная запись ЛДФ-граммы до воздействия, запись во время воздействия и после него.

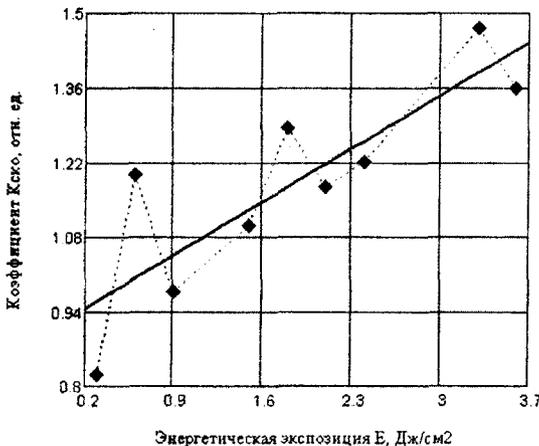


Рисунок 1 – Типичный вид зависимости

коэффициента  $K_{ско}$  от энергетической экспозиции:

$$K_{ско} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}, \text{ где } \sigma_1 \text{ и } \sigma_2 - \text{СКО сигнала до и после процедуры НИЛТ соответственно}$$

При обработке данных все регистрируемые сигналы в 3-х фрагментах обрабатывались отдельно. ЛДФ-сигнал во время процедуры НИЛТ не анализировался из-за влияния импульсного режима излучения АЛТ на доплеровский канал «ЛАКК-М».

На первой стадии обработки сигнала для оценки реакции системы МЦК на процедуру НИЛТ получены оценки результатов измерений для каждого фрагмента

записи. Обнаружено увеличение СКО сигнала ЛДФ, в первом приближении пропорциональное энергетической экспозиции процедуры НИЛТ. На рисунке 1 представлен типичный вид графика зависимости отношений СКО ПМ после и до процедуры от энергетической экспозиции НИЛТ. Изменение математического ожидания находится в диапазоне естественных флуктуаций.

Для определения частотного диапазона изменения ритмов МЦК проведен частотно-временной анализ полученных записей. Наиболее типичный вид графиков частотно-временного спектра приведен на рисунке 2. Наибольшее увеличение амплитуд колебаний наблюдается в диапазоне частот, соответствующих пульсовым колебаниям и колебаниям в нейрогенном диапазоне. Увеличение амплитуд нейрогенных колебаний является индикатором снижения сопротивления и возможного усиления кровотока по артериовенулярному шунту. Увеличение амплитуды пульсовой волны означает увеличение притока в микроциркуляторное русло артериальной крови, что является благоприятным фактором при лечении ряда патологий и может свидетельствовать о стимулирующем эффекте при НИЛТ.

Физиологические сигналы, к которым относится и ЛДФ-грамма, отличаются нестационарным поведением со сложной иерархией ритмов. Данное обстоятельство делает классические методы их исследования недостаточными для полного и достоверного описания. Для решения подобного класса задач удобны методы, применяемые при описании динамических систем. Например, при анализе электрокардиограмм весьма плодотворным оказался метод символической динамики, который может оказаться информативным и при обработке регистрируемого сигнала ПМ при проведении процедур НИЛТ [4, 5].

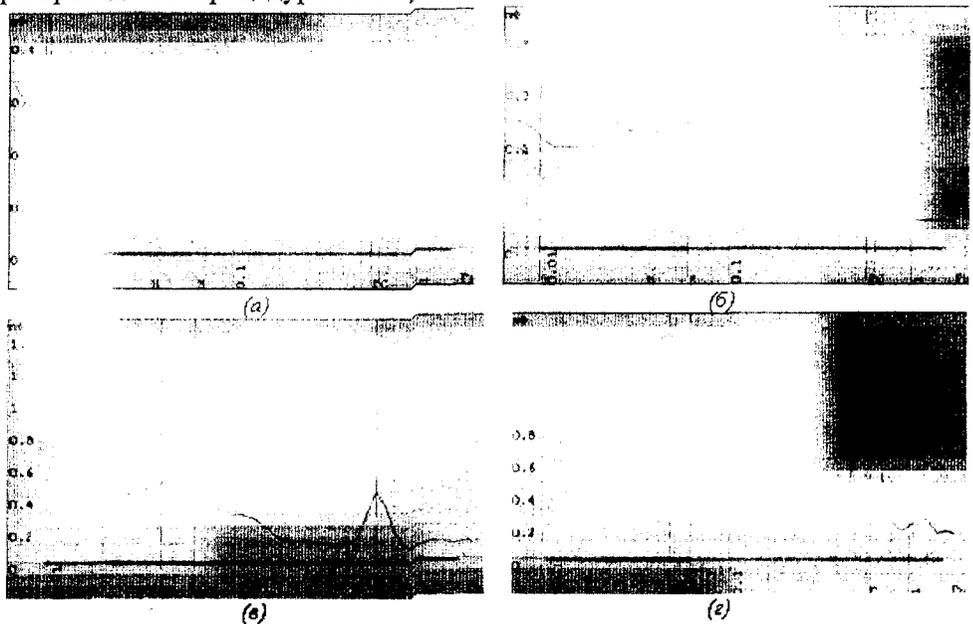


Рисунок 2 – Типичный вид графиков амплитудно-частотного анализа ЛДФ-грамм контрольной группы (а – первая половина сигнала, б – вторая половина сигнала) процедура НИЛТ (в – до воздействия, г – после воздействия)

В данной работе произведена попытка применить данный математический аппарат для анализа полученных ЛДФ-грамм. Для записей каждого фрагмента сигнала строилась скаттерограмма интервалов роста или спада. Каждому облаку локализации точек на скаттерограмме приписывался определенный символ. Затем символ

записывались в символическую строку в том порядке, в котором точки посещают облака скаттерограммы. Пример полученной скаттерограммы представлен на рисунке 3.

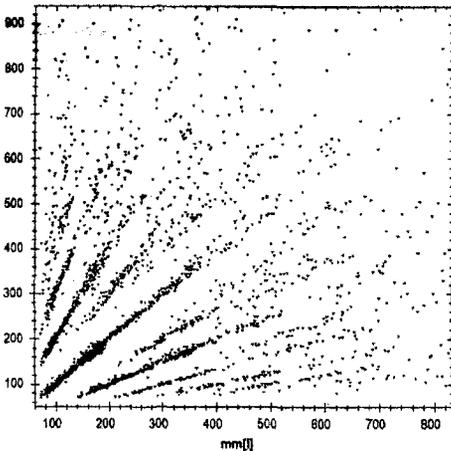
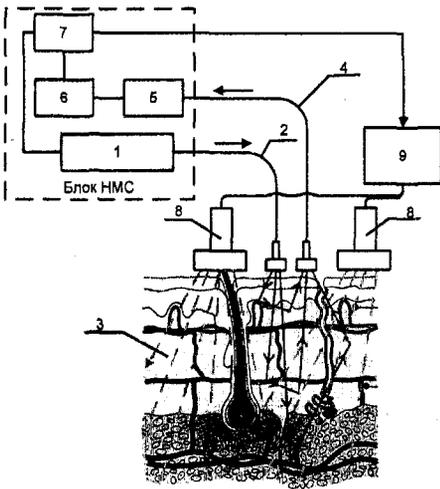


Рисунок 3 – Пример скаттерограммы интервалов роста и спада сигнала ПМ

Следуя общепринятой терминологии, словом называется последовательность символов, которая может встретиться в символической строке, запрещенными словами для какой-то символической строки – те слова, которые могут существовать в рамках введенной символической динамики, но не реализуются в ней. Множество слов, которые могут встретиться в определенной символической строке, называется словарем, а рангом слова называется его порядковый номер в словаре, где слова упорядочены по частоте появления в символической строке. Кроме того, вычислялся коэффициент подобия, показывающий фрактальные свойства обрабатываемого сигнала.

В большинстве записей для ПМ объёмы словарей до и после воздействия несущественно изменялись в размере. Практически во всех экспериментах с НИЛТ коэффициент подобия изменял свое значение после проведения процедуры НИЛТ. Однако длина выборок и количество экспериментов были недостаточно велики, для того чтобы при данном виде обработки можно было делать статистически значимые выводы. Применение символической динамики как инструмента для анализа ритмов модуляции кровотока является перспективным и будет более подробно исследовано в последующих работах.

На основании приведённых методик обработки регистрируемых сигналов при НИЛТ предлагается компьютеризированный аппарат лазерной терапии с адаптивным управлением, структурная схема которого представлена на рисунке 4. В общепринятую структуру АЛТ, согласно модульному принципу построения современной физиотерапевтической аппаратуры, для адаптивного управления вводится канал обратной связи, основанный на методе ЛДФ. Наличие зависимостей между параметрами НИЛИ и качественными характеристиками вызываемых им эффектов в системе МЦК, которые можно регистрировать с помощью ЛДФ, позволяет связать аппараты НИЛТ и НМС в едином приборном варианте для повышения адекватности физиолечения.



1 – лазер малой мощности; 2 – передающее оптоволокно; 3 – биообъект; 4 – приёмное оптоволокно; 5 – фотоприёмник; 6 – блок электронной обработки; 7 – вычислительный блок (ПК); 8 – излучающий терминал; 9 – базовый блок АЛТ

Рисунок 4 – Структурная схема компьютеризированного аппарата лазерной терапии с адаптивным управлением

Вычислительный блок 7, реализуемый как на базе ПК, так и в виде отдельного микропроцессорного управляющего устройства, управляет базовым блоком АЛТ 9 (например, по USB-порту) и задаёт параметры его работы, согласно выбранной

программе процедуры НИЛТ. Одновременно с основным излучающим терминалом 8 включается лазер малой мощности 1 для зондирования облучаемого при НИЛТ объема биоткани, излучение от которого передается по передающему оптоволокну 2 к диагностируемой биоткани. Данное излучение рассеивается на движущихся форменных частицах крови и благодаря эффекту Доплера приобретает составляющую с длиной волны, отличную от первоначальной. Отраженное рассеянное излучение подается по приемному оптоволокну на фотоприемник 5, который в данном случае работает в режиме квадратичного смесителя, в результате чего формируемый им фототок имеет переменную составляющую, получаемую как разность длин волн имеющихся в обратнорассеянном излучении. Таким образом, частота доплеровского сдвига переносится в низкочастотную область. Далее электрический сигнал подается в блок электронной обработки 6, где фильтруется и усиливается, после чего поступает для обработки в вычислительный блок 7. На основании полученных данных с использованием предложенных выше методик обработки сигнала, вырабатывается управляющее решение о корректировке параметров воздействия или о прекращении процедуры.

Таким образом, в предлагаемой структурной схеме компьютеризированного аппарата лазерной терапии с адаптивным управлением в качестве канала обратной связи используется метод ЛДФ, для результатов которого предложены к применению методики обработки данных, показывающие возможность регистрации реакции системы МЦК при НИЛТ. Применение современных информационных технологий при разработке лазерных диагностико-терапевтических аппаратов позволяет индивидуализировать процесс физиотерапевтического лечения, а значит, повысить уровень здоровья населения.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Дунаев А.В., Рогаткин Д.А. К вопросу о возможности использования методов неинвазивной спектрофотометрии для контроля эффективности низкоинтенсивной лазерной терапии // Известия ОрёлГТУ. Серия «Фундаментальные проблемы техники и технологии». – 2009. – №3/275 (561). – С.110-115.
2. Жеребцов Е.А., Дунаев А.В. Методы оценки эффективности низкоинтенсивной лазерной терапии на основе неинвазивной спектрофотометрии // Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы: материалы конференции. РГРТУ. – Рязань, 2009. – С. 78-81.  
Лазерная доплеровская флоуметрия микроциркуляции крови; под ред. А.И. Крупаткина, В.В. Сидорова: руководство для врачей. – М.: Медицина, 2005. – 256 с.  
Каток А.Б., Хасселблат Б. Введение в современную теорию динамических систем с обзором последних достижений: пер. с англ. под ред. А.С. Городецкого. – М.: МЦНМО, 2005. – 464 с.  
Загускина С.С. Необходимость учета окологосударственных ритмов при оценке вариабельности ритма сердца / С.С. Загускина, С.Л. Загускин, Ю.В. Гуров // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. – 2008. – Т.137, №8. – С. 161-165.

#### **Дунаев Андрей Валерьевич**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Кандидат технических наук, докторант, доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация», исполнительный директор научно-образовательного центра «Биомедицинская инженерия»  
Тел.: 89192619906  
E-mail: [dunaev@ostu.ru](mailto:dunaev@ostu.ru)

#### **Жеребцов Евгений Андреевич**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Студент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»  
Тел.: 89536151192  
E-mail: [zherebzow@gmail.com](mailto:zherebzow@gmail.com)

#### **Егорова Ангелина Ивановна**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Студентка кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»  
Тел.: 89155091484  
E-mail: [angelok1100@rambler.ru](mailto:angelok1100@rambler.ru)

УДК 61:658.011.56

А.В. КОНИЩЕВ

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПРОИЗВОДСТВА РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

*В статье показана необходимость автоматизированного управления качеством, предложена методика подготовки неопределенных факторов производства, описана и предложена модель программной системы, автоматизирующей процессы управления качеством производства радиоэлектронного предприятия.*

**Ключевые слова:** управление качеством; радиоэлектронное предприятие.

*In this article the necessity of automatic quality control and technique of indefinite production factors preparing is proposed. In this article also described model of software system, that allow to automate quality control of radio electronics company manufacture.*

**Keywords:** quality control; radio electronics company.

### ВВЕДЕНИЕ

Внедрение систем управления (СУ) качеством в инженерную практику, кроме достижения основной цели, значительного повышения качества выпускаемой продукции, позволяет также реорганизовать управление предприятиями в целом, повысить эффективность производства, служит основой автоматизации управления.

Практическая реализация СУ качеством вызвала необходимость перестройки организационной структуры радиоэлектронных предприятий. Начали создаваться специальные подразделения для координации работ по управлению качеством в масштабах предприятия. Основные задачи, возлагаемые на эти подразделения, сводятся к разработке показателей, определяющих оптимальный уровень качества на основе анализа требований потребителя и возможностей производства; созданию системы управления качеством и контролю над ее работой.

Качество производства по своей сущности является объектом неустойчивым, стремящимся отклониться от заданного уровня контролируемых параметров. Следовательно, оно (качество производства) полностью отвечает первым двум условиям теории управления и потому может служить объектом управления.

Основой управления качеством производства является решение [1]. От того, каково это решение, насколько верно оно соответствует обстановке, зависит его эффективность. Качество решения в сложных ситуациях определяется знаниями, а также искусством, опытом и умением руководителя. Традиционно считалось, что управление – это не наука, а искусство и опыт. В какой-то мере управление остается искусством и сегодня, но теперь все чаще управленец вынужден обращаться к научной теории. Попыток решить проблему автоматизации управления качеством производства на основе лингвистического прогнозирования с использованием причинной модели пока немного [2].

Обстоятельства, связанные с быстрой сменой номенклатуры изделий РЭП, определяют жесткие требования к анализу и контролю качества технологических процессов производства радиоэлектронных средств. В основе деятельности, направленной на обеспечение качества производства, лежит информационный процесс – сбор, передача, обработка (преобразование), хранение и использование информации [4]. При такой трактовке обеспечение качества следует представлять в виде множества управленческих решений, направленных на достижение главной цели функционирования предприятия [5]. Выработка каждого из этих решений должна быть

информационно обеспечена. Решением задачи автоматизации сбора и обработки информации на предприятии занимается АСОИУ.

### СИСТЕМА СБОРА И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Актуальной задачей при построении АСОИУ является перенос функций диспетчера по анализу данных и прогнозированию ситуаций на компоненты интеллектуальной системы поддержки принятия и исполнения решений. Концепция такой системы включает целый ряд средств, объединенных общей целью – способствовать принятию и реализации рациональных и эффективных управленческих решений. Система должна организовать удобный диалог с пользователем, «вести» его по этапам анализа информации, распознавания и прогнозирования ситуаций, анализировать параметры технологического процесса, помогать выбрать наилучшие решения в зависимости от возникшей ситуации, реализовать их путем выдачи управляющих воздействий, корректируя тем самым ход технологического процесса и оптимизируя его параметры по заданному критерию.

Основными структурными составляющими такой системы являются база знаний и механизм логического вывода. База знаний будет хранить совокупность фактов, закономерностей, отношений (знаний), описывающих проблемную область, и правил, описывающих целесообразные формы структурирования, формализации и преобразования знаний в этой области.

Механизм логического вывода, используя текущие или промежуточные исходные данные (факты) и знания из базы знаний, будет формировать последовательность правил, которые, будучи применены к исходным данным (фактам), полученным в результате контроля состояния технологического процесса, приведут к решению конкретной задачи диагностики, прогнозирования и регулирования параметров технологического процесса.

Подобная гибкая открытая структура позволяет расширять функциональные возможности системы и круг задач, решаемых в процессе ее эксплуатации, а также постоянно повышает точность анализа, прогнозирования, планирования, организации, координации и контроля принимаемых решений за счет использования накапливаемого в базе знаний опыта.

Наличие достаточно полных моделей знаний в конкретной предметной области и постоянный контроль тенденции изменения параметров объекта управления обеспечивает диагностику и прогноз его поведения с высокой степенью достоверности и заданной точности. Существенным отличием предлагаемого подхода является то, что программная система способна настраиваться на любые исходные данные без изменения ядра.

Необходимое условие качественного решения задачи автоматического управления качеством – получение информации о состоянии процессов с требуемой оперативностью и точностью. Однако существующие в настоящее время описания технологических процессов на предприятии имеют качественный характер и позволяют лишь приблизительно оценить необходимую частоту опроса необходимых параметров. На данном этапе целесообразно рассматривать период опроса параметров как технологическую константу, конкретное значение которой для определенных условий устанавливается экспериментальным путем по соответствующим методикам. Вектор значимых факторов может быть разделен на две группы: детерминированные (ДПФ) и неопределенные факторы (НПФ).

Пополнение базы знаний для детерминированных факторов [3] предлагается проводить раз в году. Каждому фактору в соответствие ставится название и значение,

которые вносятся посредством пользовательского интерфейса программной части АСУ в базу знаний для дальнейшего использования.

Одним из наиболее сложных моментов в процессе сбора данных является формализация НПФ и их подготовка к обработке. Нами предложена методика подготовки и обработки НПФ, состоящая из нескольких шагов (рис. 1).

Рассмотрим каждый этап сбора НПФ и его реализацию в системе сбора и обработке информации.

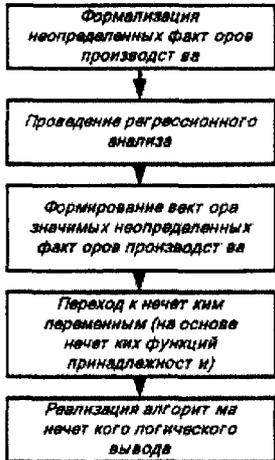


Рисунок 1 – Методика подготовки и обработки НПФ

**Формализация.** Выбранный метод формализации – групповое ранжирование. На данном этапе оператору ЭВМ, используемой в АСУ предоставляются следующие возможности:

- задание параметров управления технологическими процессами ПС, управления средствами труда, организационно-экономического управления с определением класса принадлежности;
- задание ДФП;
- ввод данных НПФ;
- указание параметров прогнозирования и вывод графика прогноза.

После внесения всех необходимых параметров происходит внесение их в базу знаний и запуск процедуры, выполняющей следующие операции:

- формирование матриц принадлежности;
- нормирование частных показателей;

– устранение ошибок методом робастного оценивания.

**Регрессионный анализ.** После проведения процедуры формализации НПФ, необходимо определить наиболее значимые факторы из всех используемых. Реализация процедуры регрессионного анализа должна позволить решить следующие задачи:

- проверка выполнения ряда условий для вычисления регрессионных коэффициентов;
- вычисление коэффициентов регрессии с помощью МНК;
- проверка адекватности аппроксимации данных по критерию Фишера.

**Фазификация.** Будем понимать функцию принадлежности как некоторое субъективное измерение нечеткой принадлежности элемента заданному множеству. Под субъективной мерой будем понимать степень принадлежности элемента нечеткому множеству, определенную опросом одного или нескольких экспертов. Вероятностная мера, по закону больших чисел, подразумевает знание аналитических зависимостей этой принадлежности. Значение функции принадлежит замкнутому интервалу  $[0;1]$ . Для каждого конкретного элемента  $u \in U$  величина  $\mu_x(u)$  принимает конкретное значение на этом интервале. На этапе фазификации необходимо: рассчитывать скалярные значения для каждой ПС; формировать базу правил; формировать входные и выходные функции принадлежности методами, основанными на косвенном задании функций.

Рассмотрим схему нечеткого вывода.

**Нечёткость (введение нечёткости, фаззификация).** Функции принадлежности, определённые на входных переменных, применяются к их фактическим значениям для определения степени истинности каждой предпосылки каждого правила.

*Логический вывод.* Вычисленное значение истинности для предпосылок каждого правила применяется к заключениям каждого правила. Это приводит к одному нечёткому подмножеству, которое будет назначено каждой переменной вывода для каждого правила. В качестве правил логического вывода обычно используются только операции *min* (минимум) или *prod* (умножение). В логическом выводе *prod* функция принадлежности вывода отсекается по высоте, соответствующей вычисленной степени истинности предпосылки правила (нечёткая логика "И"). В логическом выводе *prod* функция принадлежности вывода масштабируется при помощи вычислений степени истинности предпосылки правила.

*Композиция.* Нечёткие подмножества, назначенные для каждой переменной вывода (во всех правилах) объединяются вместе, чтобы сформировать одно нечёткое подмножество для каждой переменной вывода. При подобном объединении обычно используется *max* (максимум) или *sum* (сумма). При композиции *max* комбинированный вывод нечёткого подмножества конструируется как поточечный максимум по всем нечётким подмножествам (нечёткая логика "ИЛИ"). При композиции *sum* комбинированный вывод нечёткого подмножества конструируется как поточечная сумма по всем нечётким подмножествам, назначенным переменной вывода правилами логического вывода.

*База знаний.* Под базой знаний принято понимать совокупность знаний о предметной области, используемых для построения систем интеллектуального управления объектами. Используемый в различного рода экспертных системах механизм нечётких выводов имеет в своей основе базу знаний, формируемую специалистами предметной области в виде совокупности нечётких предикатных правил. Также к базе знаний принято относить и функции принадлежности входных и выходных переменных.

*Нечеткий вывод.* Воспользуемся нечетким выводом по Мамдани.

Данный алгоритм может быть описан следующим образом:

1. Нечеткость: находятся степени истинности для предпосылок каждого правила:  $A_1(x_0), A_2(x_0), B_1(x_0), B_2(x_0)$ .

2. Нечеткий вывод: находятся уровни отсечения для предпосылок каждого из правил (с использованием операции минимума):  $\alpha_1 = A_1(x_0) \wedge B_1(y_0), \alpha_2 = A_2(x_0) \wedge B_2(y_0)$ , где через  $\wedge$  обозначается операция логического минимума. Затем находятся усеченные функции принадлежности:

$$C'_1(z) = (\alpha_1 \wedge C_1(z)), C'_2(z) = (\alpha_2 \wedge C_2(z)).$$

3. Композиция: с использованием операции *max* (обозначенной как «v») производится объединение найденных усеченных функций, что приводит к получению итогового нечеткого подмножества для переменной выхода с функцией принадлежности.

4. Приведение к четкости (для нахождения  $z_0$ ) производится, например, центроидным методом (как центр тяжести для кривой  $\mu_z(z)$ ):

$$z_0 = \frac{\int_{\Omega} z \mu_z(z) dz}{\int_{\Omega} \mu_z(z) dz}.$$

После формирования векторов значимых факторов сделаем прогноз на шаг  $t+1$  по следующему алгоритму (рис. 2).

## РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ

В случае, когда ряд градации уровня качества содержит данные с пропусками, для получения недостающих значений необходимо использовать анализ данных с

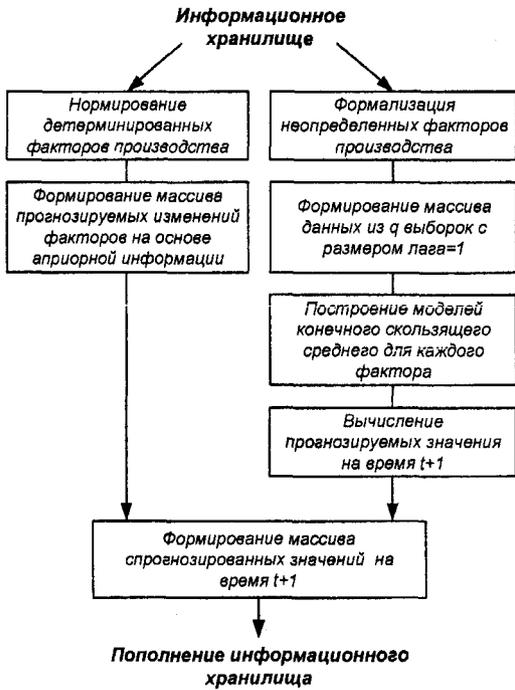


Рисунок 2 – Алгоритм прогнозирования на время  $t+1$

пропусками. Стандартными методами заполнения пропусков являются: заполнение пропусков средним значением; интерполяция по соседним точкам; заполнение пропусков прогнозами линейной регрессии и другие.

На рисунке 4 представлен случай, когда суммарно описанный период работы предприятия составляет 20 месяцев и известны производственные ситуации с различными временными промежутками. При сравнении методов заполнения было выявлено, что модель скользящего среднего дает наиболее приемлемый результат, поскольку вероятностные траектории ряда с пропусками укладываются в 90%-ный доверительный интервал модели. Эвентуальная прогнозирующая функция модели для ряда градации уровня качества показывает, что модель вычисляет точно только первые два прогнозных значения, далее прогнозы будут следовать прямой линии, параллельной временной оси. Графическая верификация показывает, что долгосрочные точечные

прогнозы модели для ряда градации вполне состоятельны.

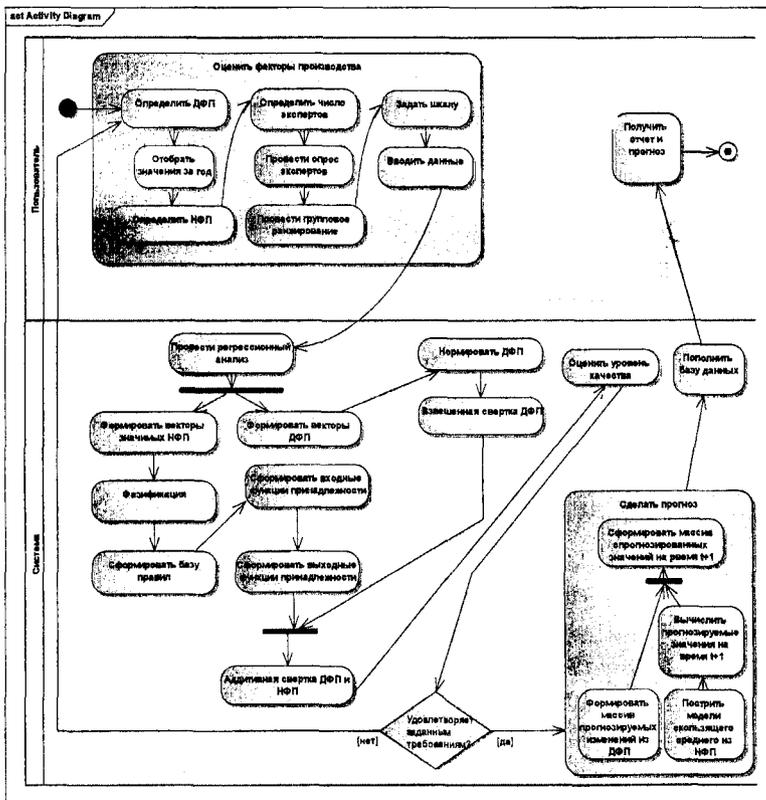


Рисунок 3 – Диаграмма активности системы

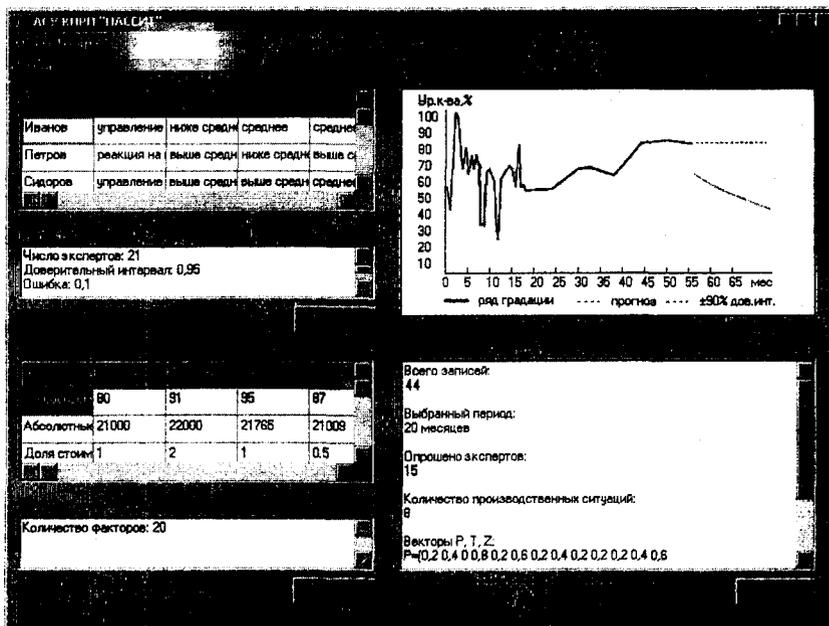


Рисунок 4 – Прогнозирование скользящим средним при сглаживании скользящим средним

Сравнение с экспериментальными данными показывает, что пересечение доверительным интервалом границы уровня качества, фиксируемое как неприемлемое, показывает, что степень доверия к точечным прогнозам упала до некоего критического уровня, а долгосрочные точечные прогнозы не могут быть признаны состоятельными. По уравнению линейной регрессии неприемлемое качество не фиксируется.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

При практическом применении предложенной методики на ряде радиопромышленных предприятий были оценены результаты использования разработанных научных положений. Результаты сравнительного анализа представлены в таблице:

Таблица 1 – Сравнительный анализ результатов внедрения реализованной методики

Квартал	Цех1		Цех2		Цех3*	
	$P_{пр}$	$P_E$	$P_{пр}$	$P_E$	$P_{пр}$	$P_E$
1	0,9	0,89	1	0,93	1	1
2	0,91	0,89	0,96	0,95	1	0,96
3	0,91	0,89	0,92	0,88	0,96	0,97

\* – предприятие, на котором реализована методика управления качеством производственных процессов.

В заключение можно отметить, что АСУ КПП «ПАССИТ» является системой, взаимодействующей с человеком и пополняемой информацией человеком. Исходя из особенностей функционирования АСУ КПП, вытекает необходимость проработки интерфейсов пользователя как для взаимодействия с оператором технологического процесса, так и для человека, знающего производство и ответственного за наполнение базы знаний, а предложенные реализации интерфейсов взаимодействия с пользователем позволяют, в дальнейшем, снизить затраты на доработку и внесение изменений.

Предложенная и разработанная АСУ КППП позволила более эффективно управлять процессами производства – повысить качество выходной продукции, анализировать происходящие процессы управления качеством и снизить производственные затраты.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арсеньев Ю.Н. Шелобаев С.И., Давыдова Т.Ю. *Принятие решений. Интегрированные интеллектуальные системы: учеб. пособие для студентов вузов.* – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. – 269 с.
2. Константинов И.С. *Проектирование автоматизированных систем управления радиомашиностроительных предприятий на основе системных моделей с нечеткой логикой* / И.С. Константинов, А.Н. Конищев, А.В. Артемов, С.В. Терентьев // *Известия Тульского государственного университета. Серия «Технологическая системотехника».* Выпуск 12 – Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. – С.34-40.
3. Конищев А.Н., Озаренко О.В. *Функциональная модель процесса управления основным и вспомогательным производством радиоэлектронных предприятий*// *Известия Тульского государственного университета. Серия «Технологическая системотехника».* Выпуск 9.- Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. – С. 79-84.
4. *Методы и модели оптимизации ресурсов в интеллектуальных системах принятия решений в экономике, технике, финансах и образовании: сб. науч. ст.; под ред. Ю.Н. Арсеньева* – М.: Б.и., 2000. – 214 с.
5. Миронов А.С. *Введение в искусственный интеллект: учеб. пособие.* – М.: МГАПИ, 1995. – 42 с.

**Конищев Анатолий Николаевич**

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Соискатель кафедры «Информационные системы»

Тел.:8(495) 132-94-20

E-mail: pasit@itmvvt.ru

УДК 658.512+658.012

В.В. СОТНИКОВ, Д.А. СИБАРОВ, А.П. ГРИГОРЬЕВ,  
П.И. КОМАРОВ, А.П. ДЕМИДОВ

## СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ИЗОМЕРИЗАЦИИ

*Целью статьи является создание алгоритма системы управления процессом изомеризации. Особенностью предлагаемой системы управления является использование в ней математической модели, позволяющей более точно поддерживать в регламентных пределах параметры, определяющие выход и октановое число изомеризата. Алгоритм предусматривает коррекцию температурного режима процесса с учетом содержания бензола в смеси.*

**Ключевые слова:** алгоритм; изомеризация; система управления; углеводород.

*The purpose of article is to create an algorithm of management of the isomerization. The peculiarity of the proposed control system is to use it in a mathematical model to more accurately maintain a routine within the parameters determining the yield and octane number isomer. The algorithm provides a correction of the temperature regime of the process, taking into account the content of benzene in the mixture.*

**Keywords:** algorithm; isomerization; control system; hydrocarbon.

За последние 10 лет процесс изомеризации стал одним из рентабельных способов получения высокооктановых и экологически чистых компонентов бензина. В ходе процесса изомеризации происходит превращение низкооктановых легких прямогонных компонентов в высокооктановые изомеры, которые добавляются к бензину риформинга для повышения его октанового числа (ОЧ) до требуемого значения.

Наибольшее распространение получил процесс среднетемпературной изомеризации, который иногда осуществляется в трех последовательно расположенных реакторах, заполненных катализатором. Исходная смесь, состоящая из низкооктановых парафиновых углеводородов и водородосодержащего газа, предварительно подогретая до заданной температуры, подается на вход первого реактора и, далее, проходя первый, второй и третий реакторы, подвергается процессу изомеризации.

Система управления процессом изомеризации осуществляет регулирование подачи сырья и поддержание температурного режима в соответствии с технологическим регламентом.

Конечный продукт – изомеризат – должен иметь октановое число не ниже допустимого. Октановое число изомеризата в зависимости от катализатора и технологических параметров меняется в пределах 80-83 пунктов по исследовательному методу. В заводских условиях октановое число определяется лабораторным анализом один раз в смену. Это обстоятельство может существенно влиять на качество изомеризата, получаемого за смену. Для устранения этого недостатка нами предложена структура системы управления, которая, наряду с вышеуказанными функциями, на основе математической модели процесса изомеризации, осуществляет расчет октанового числа в непрерывно-дискретном режиме, обусловленного необходимостью восстановления технологического режима при его отклонении от заданного.

Особенностью предлагаемой системы управления является использование в ней математической модели, представляющей собой совокупность материального, теплового и кинетического балансов, позволяющей более точно поддерживать в регламентных пределах параметры, определяющие выход и октановое число изомеризата.

Схема системы управления приведена на рисунке 1.

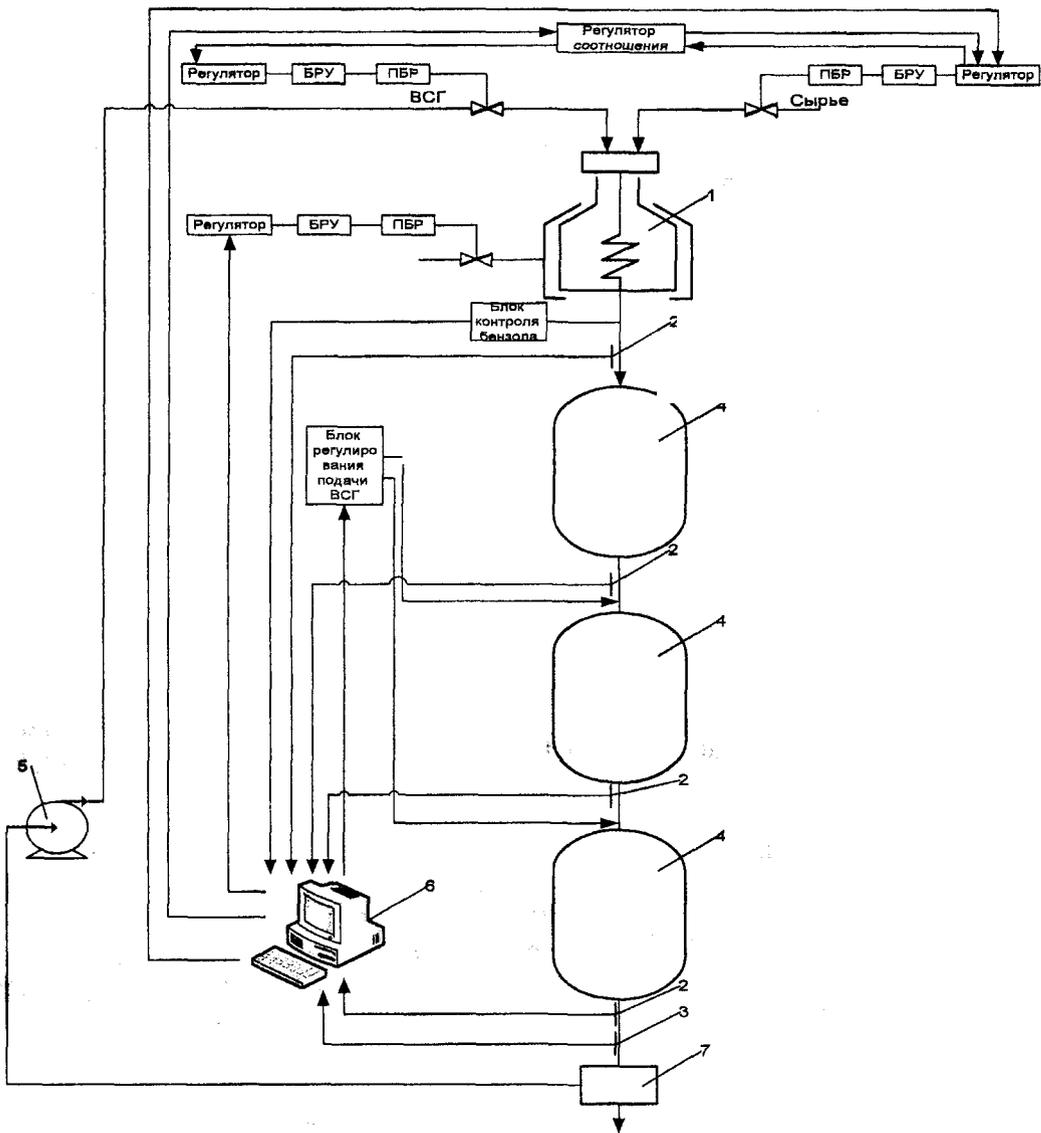


Рисунок 1 – Схема процесса изомеризации

1 – Печь, 2 – Датчик температуры, 3 – Датчик давления, 4 – Реактор, 5 – Насос, 6 – ЭВМ

Ниже приводятся условные обозначения, используемые при описании алгоритма управления.

$T_{вх}$  – входная температура первого реактора,

$T_{max}$  – максимальная входная температура первого реактора,

$T_{min}$  – минимальная входная температура первого реактора,

$T_{вых}^1$  – температура на выходе из первого реактора,

$T_{вых}^{изм}$  – измеренная температура на выходе из первого реактора,

$T_{вых}^{расч}$  – температура на выходе из первого реактора, рассчитанная по математической модели,

$T_{вых}^{1max}$  – максимальная допустимая температура на выходе из первого реактора,

$T_{вх}^2$  – температура на входе во второй реактор,

$T_{вых}^2$  – температура на выходе из второго реактора,

$T_{вых}^{2изм}$  – измеренная температура на выходе из второго реактора,

$T_{вых}^{2расч}$  – температура на выходе из второго реактора, рассчитанная по математической модели,

$T_{вых}^{2max}$  – максимальная допустимая температура на выходе из второго реактора,

$T_{вх}^3$  – температура на входе в третий реактор,

$T_{вых}^3$  – температура на выходе из третьего реактора,

$T_{вых}^{3изм}$  – измеренная температура на выходе из третьего реактора,

$T_{вых}^{3расч}$  – температура на выходе из третьего реактора, рассчитанная по математической модели,

$T_{вых}^{3max}$  – максимальная допустимая температура на выходе из третьего реактора.

$n$  – количество измерений,

$G_{вх}$  – расход сырья на входе в первый реактор,

$P_{вх}$  – давление на входе в первый реактор,

$P_{вых}$  – давление на выходе из третьего реактора,

$C_{Авх}$  – концентрация  $n$ -пентана на входе в первый реактор,

$C_{Ввх}$  – концентрация изо-пентана на входе в первый реактор,

$C_{Свх}$  – концентрация  $n$ -гексана на входе в первый реактор,

$C_{Dвх}$  – концентрация 2-метилпентана на входе в первый реактор,

$C_{Евх}$  – концентрация 3-метилпентана на входе в первый реактор,

$C_{Fвх}$  – концентрация 2,3-диметилпентана на входе в первый реактор,

$C_{Gвх}$  – концентрация 2,2-диметилбутана на входе в первый реактор,

$C_{A1вых}, C_{B1вых}, C_{C1вых}, C_{D1вых}, C_{E1вых}, C_{F1вых}, C_{G1вых}$  – концентрации веществ на выходе из первого реактора,

$C_{A2вых}, C_{B2вых}, C_{C2вых}, C_{D2вых}, C_{E2вых}, C_{F2вых}, C_{G2вых}$  – концентрации вышеуказанных веществ на входе во второй реактор,

$C_{A2вых}, C_{B2вых}, C_{C2вых}, C_{D2вых}, C_{E2вых}, C_{F2вых}, C_{G2вых}$  – концентрации вышеуказанных веществ на выходе из второго реактора,

$C_{A3вых}, C_{B3вых}, C_{C3вых}, C_{D3вых}, C_{E3вых}, C_{F3вых}, C_{G3вых}$  – концентрации вышеуказанных веществ на входе в третий реактор,

$C_{A3вых}, C_{B3вых}, C_{C3вых}, C_{D3вых}, C_{E3вых}, C_{F3вых}, C_{G3вых}$  – концентрации вышеуказанных веществ на выходе из третьего реактора,

$G_{вых}$  – выход целевого продукта,

$t$  – время протекания процесса,

$t_k$  – время измерения октанового числа лабораторным путем,

$N$  – октановое число (ОЧ) изомеризата.

Ниже представлено описание алгоритма системы управления процессом изомеризации.

Шаг 1. Ввести начальные данные: температуру на входе в первый реактор, давление, расход сырья, начальные концентрации углеводородов, содержание бензола.

Шаг 2. Если  $C_{бен} > C_{бен}^{доп}$ , рассчитать расходы ВСГ для подачи в 1 и 2 реактор.

Шаг 3. Если  $G_{вх} < G_{рег}$ , оператору изменить установки регулятора до  $G_{вх} = G_{рег}$ .

Шаг 4. Если  $G_{вх} > G_{рег}$ , оператору изменить установки регулятора до  $G_{вх} = G_{рег}$ .

Шаг 5. Если  $P_{вх} < P_{рег}$ , оператору изменить установки регулятора до  $P_{вх} = P_{рег}$ .

Шаг 6. Если  $P_{вх} > P_{рег}$ , оператору изменить установки регулятора до  $P_{вх} = P_{рег}$ .

Шаг 7. Если  $T_{вх} < T_{рег}$ , оператору изменить установки регулятора до  $T_{вх} = T_{рег}$ .

Шаг 8. Если  $T_{вх} > T_{рег}$ , оператору изменить установки регулятора до  $T_{вх} = T_{рег}$ .

Шаг 9. Измерить  $T_{вых}^{изм}$ .

Шаг 10. Если  $T_{вых1(изм)} > T_{вых1max}$  подать ВСГ на вход первого реактора и произвести повторный расчет параметров по ММ для первого реактора до установления  $T_{вых1(изм)} \leq T_{вых1max}$ .

Шаг 11. Рассчитать параметры (температуры и концентраций) по математической модели (ММ) на выходе из первого реактора.

Шаг 12. Если  $T_{\text{вых1(расч)}} - T_{\text{вых1(изм)}} > 5^\circ\text{C}$ , ММ автоматически корректируется.

Шаг 13. Подать выходные данные с первого реактора на вход второго.

Шаг 14. Измерить  $T_{\text{вых2(изм)}}$ .

Шаг 15. Если  $T_{\text{вых2(изм)}} > T_{\text{вых2max}}$  подать ВСГ на вход второго реактора, и произвести повторный расчет параметров по ММ для первого реактора до установления  $T_{\text{вых2(изм)}} \leq T_{\text{вых2max}}$ .

Шаг 16. Рассчитать выходные параметры по ММ на выходе из второго реактора.

Шаг 17. Если  $T_{\text{вых2(расч)}} - T_{\text{вых2(изм)}} > 5^\circ\text{C}$ , ММ автоматически корректируется.

Шаг 18. Подать выходные данные из второго реактора на вход третьего.

Шаг 19. Измерить  $T_{\text{вых3(изм)}}$ .

Шаг 20. Если  $T_{\text{вых3(изм)}} > T_{\text{вых3max}}$  подать квенч на вход третьего реактора и произвести повторный расчет параметров по ММ для первого реактора.

Шаг 21. Рассчитать выходные параметры на выходе из третьего реактора: температуру, концентрации (по ММ), а также расход и давление. Зафиксировать выходные значения.

Шаг 22. Если  $T_{\text{вых3(расч)}} - T_{\text{вых3(изм)}} > 5^\circ\text{C}$ , ММ автоматически корректируется.

Шаг 23. Если  $t < t_k$ , рассчитать ОЧ по выходным параметрам ММ, иначе значение ОЧ принять равным значению, полученному лабораторным методом.

Шаг 24. Если ОЧ не меньше 83 пунктов, то процесс продолжается.

Если ОЧ меньше 83 пунктов, перейти к следующему шагу.

Шаг 25. Выбрать, какой из параметров ( $T_{\text{вх}}$  или  $G_{\text{вх}}$ ) изменить для получения заданного ОЧ. Если выбрано изменение  $G_{\text{вх}}$ , то автоматически рассчитывается новое значение расхода. Перейти к шагу 1.

Если выбрано изменение  $T_{\text{вх}}$ , перейти к следующему шагу.

Шаг 26. Если  $T_{\text{вх}} > 170^\circ\text{C}$ , оператору выдается сообщение о необходимости проверить катализатор.

Шаг 27. Рассчитать новые уставки для температуры. Перейти к шагу 1.

В системе ведется контроль за давлением в третьем реакторе, которое отражает степень старения катализатора, если оно уменьшается, то выдается сообщение оператору, о принятии необходимых мер для устранения причины. Процесс старения катализатора происходит длительное время, около полутора лет, что дает основания считать, что исследуемый процесс в течение длительного времени считается стационарным.

Алгоритм предусматривает коррекцию температурного режима процесса с учетом содержания бензола в смеси.

Предлагаемая структура автоматизированной системы управления процессом изомеризации на основе математической модели позволяет повысить качество продукта за счет контроля октанового числа и его коррекции в ходе технологического процесса.

Блок-схема алгоритма управления предлагаемой системы представлена на рисунке 2.

## ВЫВОДЫ

В статье представлен алгоритм управления процессом изомеризации, в основу которого входит динамическая математическая модель процесса изомеризации. Она позволяет осуществлять расчет концентрации основных компонентов сырья при его движении по реакторам и определять октановое число в ходе технологического процесса, что в существующих системах в настоящее время отсутствует. Использование такого рода алгоритма управления процессом изомеризации позволяет повысить качественные характеристики целевого продукта (октановое число) за счет контроля октанового числа в процессе функционирования установки.

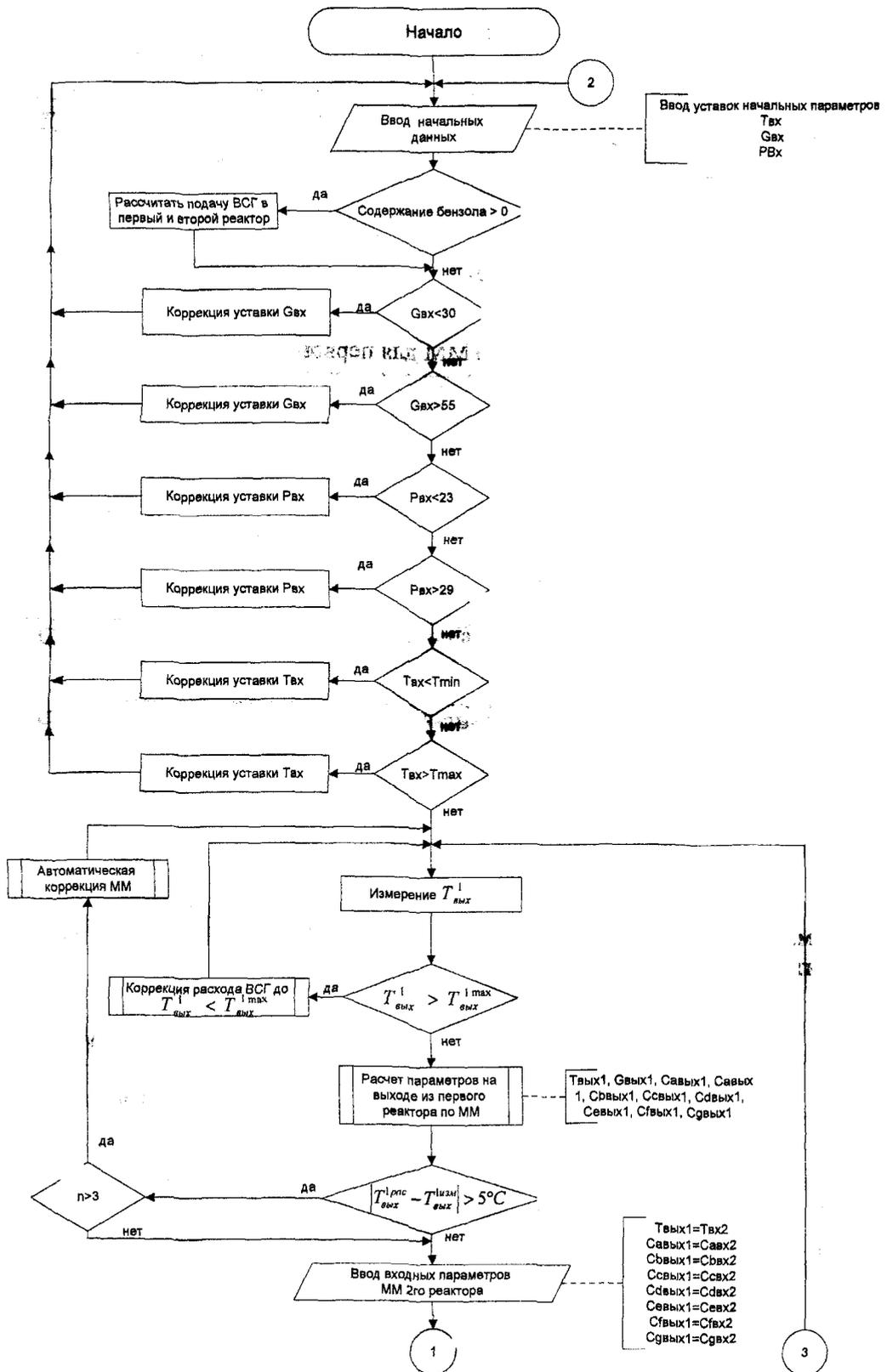


Рисунок 2, лист 1 – Блок-схема алгоритма системы управления процессом изомеризации

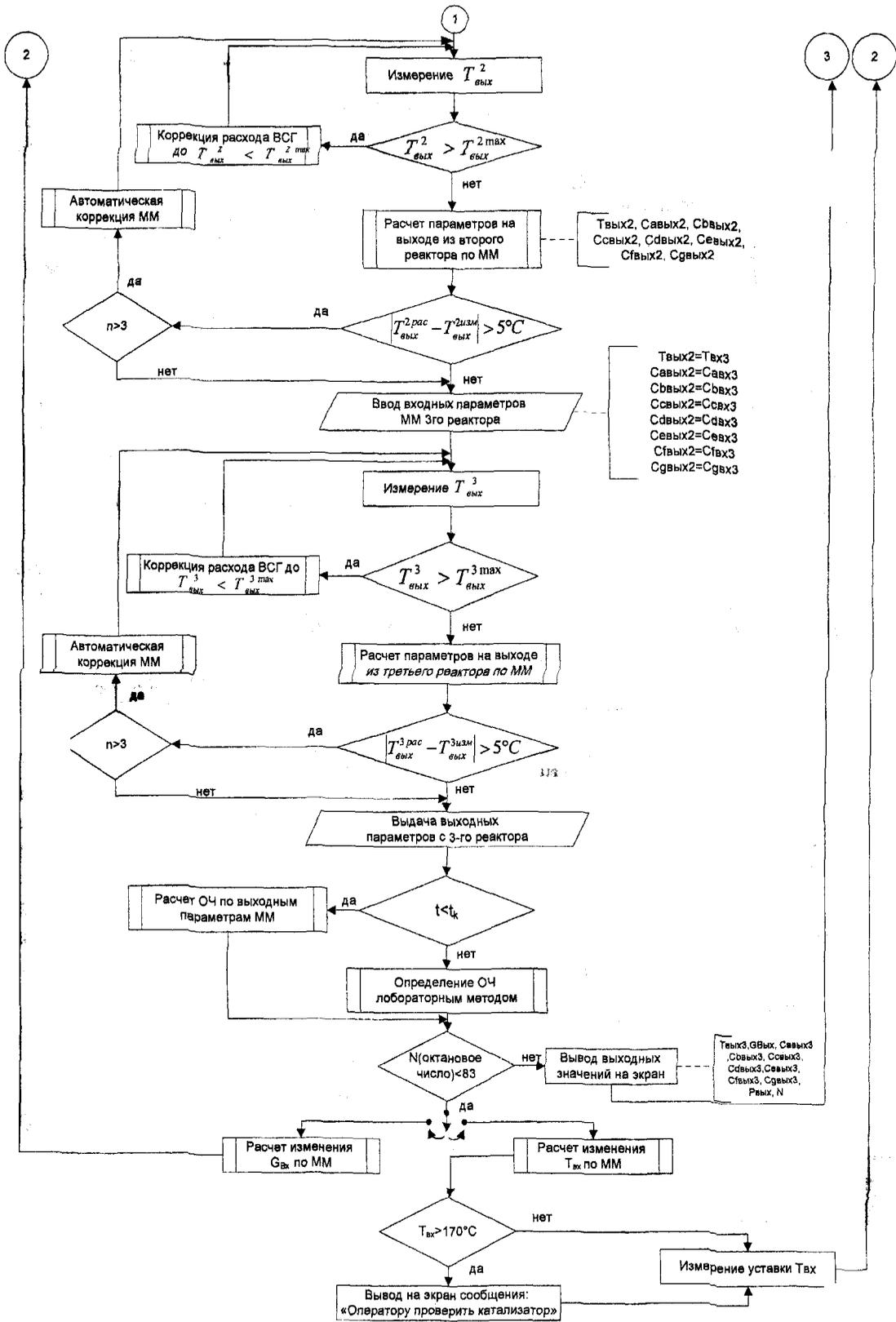


Рисунок 2, лист 2 – Блок-схема алгоритма системы управления процессом изомеризации

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жоров Ю.М. Моделирование физико-химических процессов нефтепереработки и нефтехимии: – М.: Химия, 1978. – 376 с.
2. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии: учебн. для вузов. – 4-е изд., перераб., доп. – М.: Химия, 1985. – 448 с.
3. Бурсиан Н.Р. и др. Изомеризация парафиновых углеводородов. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1979. – 71с.
4. Дельмон Б. Кинетика гетерогенных реакций. – М., 1972. – 235с.

**Сотников Владимир Васильевич**

Санкт-Петербургский государственный технологический институт  
(технический университет), г. Санкт-Петербург  
Доктор технических наук, профессор кафедры САПРиУ  
Тел.: 8(812)348-43-85  
E-mail: wwc@gambler.ru

**Сибаров Дмитрий Андреевич**

Санкт-Петербургский государственный технологический институт  
(технический университет), г. Санкт-Петербург  
Кандидат химических наук, доцент кафедры химической технологии нефтехимических и  
углехимических производств  
Тел.: 8(812)774-37-24

**Григорьев Александр Павлович**

Санкт-Петербургский государственный технологический институт,  
(технический университет), г. Санкт-Петербург  
Аспирант кафедры САПРиУ  
Тел.: 8(950)023-51-49  
E-mail: legend01@mail.ru

**Комаров Петр Иванович**

Санкт-Петербургский государственный технологический институт  
(технический университет), г. Санкт-Петербург  
Доцент кафедры САПРиУ  
Тел.: 8(812)598-05-38

**Демидов Антон Павлович**

Санкт-Петербургский государственный технологический институт  
(технический университет), г. Санкт-Петербург  
Студент кафедры САПРиУ  
Тел.: +7(951)648-63-37

## ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И КОМПЬЮТЕРНЫЕ СЕТИ

УДК 004.75

Н.В. ДОРОФЕЕВ, О.Р. КУЗИЧКИН, А.А. ОРЕХОВ

**ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ  
В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СЕТЯХ РЕГИСТРАЦИИ  
ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ**

*Рассматривается выбор алгоритма фильтрации информативных сигналов геомагнитного поля для снижения загруженности каналов связи распределенной сети в системе магнитотеллурического зондирования.*

*Ключевые слова:* фильтрация сигналов геомагнитного поля; распределенная сеть; система магнитотеллурического зондирования.

*The choice of algorithm of a filtration of informative signals of a geomagnetic field for decrease in congestion of communication channels of the allocate network in system magnetotelluric sounding is considered.*

*Keywords:* filtration of signals of a geomagnetic field; allocate network; system magnetotelluric sounding.

**ВВЕДЕНИЕ**

Системы магнитотеллурического зондирования (МТЗ), использующие в качестве зондирующих сигналов естественные возмущения геомагнитного поля Земли, строятся на обработке сигналов геомагнитного поля, регистрируемых на распределенной сети станций наблюдения. При этом регистрация геомагнитного поля на всех измерительных станциях осуществляется непрерывно, включая и неинформативные интервалы времени, во всем ультранизкочастотном диапазоне геомагнитных сигналов. При прямом информационном обмене данными между станциями, в рамках применяемых алгоритмов МТЗ, необоснованно возрастает объем передаваемых геомагнитных данных вследствие регистрации геомагнитного поля в магнитоспокойные интервалы. Одним из методов оптимизации трафика в подобных системах является организация предварительная обработки данных непосредственно на измерительных станциях. При этом необходимо обеспечить отбор информативных участков данных для передачи центру обработки в реальном масштабе времени с использованием определенных процедур, учитывающих как структуру поступающих потоков данных, так и целей мониторинга [1].

Целью настоящей работы является анализ и обоснование применения алгоритма фильтрации на этапе предварительной обработки и выделения информативных геомагнитных сигналов.

**СПЕКТРАЛЬНО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ**

Основным методом предварительной обработки геомагнитных сигналов является спектрально-временной анализ (СВАН), который позволяет выделить основные частотные составляющие сигнала на распределенной системе наблюдений. Он состоит в синхронном пропускании входного сигнала через систему узкополосных фильтров и анализе амплитудных значений огибающих и их фаз на выходе фильтров [2].

СВАН можно представить в виде следующего векторно-матричного выражения:

$$s_{x,y}(t, n) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \dot{S}_{x,y}(\omega) \cdot \dot{K}_n(\omega, \omega_n) \cdot e^{j\omega t} d\omega,$$

где  $s_{x,y}(t, n)$  – результат фильтрации частоты  $n$ , принадлежащей иррегулярным пульсациям, по двум горизонтальным компонентам геомагнитного поля;

$\dot{S}_{x,y}(\omega)$  – результат прямого преобразования Фурье исходного сигнала;

$\dot{K}(\omega, \omega_n)$  – передаточная характеристика фильтра для частоты  $\omega_n$  (2).

$$\dot{K}(\omega, \omega_n) = \exp\left(-\frac{B_\phi (\omega - \omega_n)^2}{\omega_n^2}\right), \quad (7)$$

где  $\dot{K}(\omega, \omega_n)$  – передаточная характеристика фильтра для частоты  $\omega_n$ ;

$B_\phi$  – параметр, характеризующий ширину полосы пропускания фильтра;

$\omega$  – круговая частота;

$\omega_n$  – центральная частота фильтра.

Для реализации такой процедуры традиционным способом нужно, во-первых, иметь накопленный в памяти массив, во-вторых, провести три комплексных преобразования Фурье. Необходимость накопления массива перед обработкой уже ограничивает применение этого способа в задачах реального времени.

Накопление большого массива данных приводит к тому, что традиционный СВАН даже в квазиреальном времени становится нереализуемым [3].

При обработке геомагнитных сигналов для их последующего применения в области магнитотеллурического зондирования и геофизики очень важно не исказить форму сигналов при фильтрации. При определении степени искажения необходимо сравнить сигналы, поступающие на вход СВАН фильтра, с сигналами на выходе этого фильтра.

Для корреляционного анализа было отобрано тысяча случаев появления Pi-2 сигналов. В результате анализа получено: максимальное значение ВКФ составляет 0,83 при сдвиге сигнала, прошедшего через фильтр, на 59 секунд относительно сигнала на входе СВАН фильтра; среднее значение ВКФ составляет 0,72 при сдвиге на 4 секунды.

Результаты корреляционного анализа показывают, что СВАН фильтр искажает Pi-2 сигнал примерно на 1/3, а с учетом присутствующих помех искажения СВАН фильтра могут существенно сказаться на дальнейшем обнаружении Pi-2 сигналов и определении эпицентра их образования. Кроме этого, после прохождения СВАН фильтра происходит временная задержка сигнала, что тоже существенно влияет на определение эпицентра образования Pi-2 сигналов

### ВЕЙВЛЕТ-ФИЛЬТРАЦИЯ

Для построения алгоритмов предварительной селекции геомагнитных сигналов с использованием вейвлетов необходимо выбрать базисную вейвлет функцию. Базисная функция для проведения вейвлет-анализа выбиралась из следующих вейвлетов: Хаара, Мейера, Добеши с 1 по 10 порядок, Симлета с 1 по 8 порядок, Койфлеты с 1 по 5 порядок.

Для практического применения вейвлетов в спектральном анализе сигналов устанавливают соответствие между масштабом вейвлета и его частотными характеристиками. Однако при вейвлет-анализе ультранизкочастотных сигналов появляются погрешности в определении спектральных компонент [4]. Возникающую при дискретном вейвлет преобразовании погрешность определения значения масштабов с максимальными коэффициентами частично можно решить правильным выбором материнского вейвлета. Отклонение масштаба в процентах показано на рисунке 1.

Из рисунка 1 видно, что минимальное отклонение масштаба, а значит и минимальная погрешность при определении частоты после вейвлет преобразования соответствует вейвлету Добеши 3 порядка и Симлета 3 порядка и составляет примерно

1,8% от реальной частоты. При этом среднее значение отклонения составляет примерно 0,27% для Добеши и примерно 0,29% для Симлета. Из койфлетов следует отметить койфлет первого порядка, максимальная погрешность при определении частоты для которого составляет примерно 5,45%, а среднее значение 2,5%. Таким образом, наиболее подходящими вейвлетами для проведения фильтрации в распределенной геофизической системе являются Добеши 3 порядка, Симлет 3 порядка и Койфлет 1



Рисунок 1 – Отклонение масштаба в процентах

По результатам эксперимента было установлено, что для фильтрации Рi-2 сигналов и проведения спектрально-временного анализа наиболее подходящими материнскими вейвлетами являются: Симлета 3, Добеши 2, Койфлета 1.

Для корреляционного анализа были использованы те же случаи появления Рi-2 сигналов, что и для фильтрации по алгоритму СВАН. Результаты анализа сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты корреляционного анализа

Параметр	Материнский вейвлет		
	Симлета 3	Добеши 3	Койфлета 1
Максимальное значение ВКФ	0.9962	0.9962	0.9986
Сдвиг при максимуме ВКФ, сек.	3	3	5
Среднее значение ВКФ	0.9114	0.9114	0.9355
Средний сдвиг, сек.	2	2	4

Из приведенных в таблице 2.1 данных следует, что все три тестируемых материнских вейвлета вносят примерно одинаковые искажения исходного сигнала.

### ВЫВОДЫ

Результаты корреляционного анализа показывают, что вейвлет фильтр практически не искажает Рi-2, что увеличивает точность работы блока определения параметров Рi-2 сигналов, и как следствие, повышается точность определения эпицентра возникновения Рi-2 сигналов.

По результатам видно, что вейвлет-фильтр по сравнению со СВАН-фильтром дает лучший результат по сохранению формы исходного сигнала, а также вейвлет-фильтр по сравнению со СВАН-фильтром задерживает исходный сигнал на гораздо меньшее время. Это означает, что для уменьшения трафика в распределенной сети регистрации геомагнитного поля СВАН фильтрацию в МТЗ системе можно заменить на вейвлет-фильтрацию.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- F. Glangeard. Signal processing for magnetic pulsation // J.of Atm. And Terr. Phys. – № 9.–1981. – С. 981-998;  
М. Бат. Спектральный анализ в геофизике. – М.: Недра, 1980.  
А.П. Иванов. Компьютерный экспресс-анализ геофизической информации / А.П. Иванов, В.В. Лысенко, А.Н. Осьмаков и др. – М.: ИФЗ АН СССР, 1989.  
Н.В. Дорофеев, Кузичкин О.Р. Алгоритмы обнаружения и выделения Рi-2 сигналов в системах геодинамического контроля на основе вейвлет-анализа // Методы и устройства формирования и обработки сигналов в связи и локации / Радиосис – №5. – 2009.

**Дорофеев Николай Викторович**

Муромский институт (филиал) ГОУ ВПО «Владимирский государственный университет»,  
г. Муром  
Старший преподаватель  
Тел.: 8 (49234) 77-121  
E-mail: [itpu@mivlgu.ru](mailto:itpu@mivlgu.ru)

**Кузичкин Олег Рудольфович**

Муромский институт (филиал) ГОУ ВПО «Владимирский государственный университет»,  
г. Муром  
Доктор технических наук, доцент, первый зам. директора МИВЛГУ  
Зав. кафедрой «Информационные технологии в проектировании и управлении»  
Тел.: 8 (49234) 77-121  
E-mail: [itpu@mivlgu.ru](mailto:itpu@mivlgu.ru)

**Орехов Александр Александрович**

Муромский институт (филиал) ГОУ ВПО «Владимирский государственный университет»,  
г. Муром  
Преподаватель  
Тел.: 8 (49234) 77-121  
E-mail: [itpu@mivlgu.ru](mailto:itpu@mivlgu.ru)

УДК 004.7, 004.272.44

С.А. ЛАЗАРЕВ, А.В. ДЕМИДОВ

## ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫМ ОБМЕНОМ СЕТИ КОРПОРАТИВНЫХ ПОРТАЛОВ

*В данной статье рассматривается концепция создания программно-технического комплекса, обеспечивающего построение распределенной приватной сети порталов образовательных учреждений и эффективное управление информационным обменом в ней через публичные каналы Интернет. Данный комплекс реализует возможность авторизованного доступа к закрытым разделам порталов, содержащих информацию, являющуюся объектом интеллектуального права, при обеспечении независимости от аппаратно-программной платформы построения и функционирования порталов.*

*Ключевые слова:* распределенная сеть; управление доступом к информации; авторизация пользователей; информационный обмен; образовательный портал.

*This article explores the concept of software-technical complex, which supports the construction of distributed private network portals of educational institutions and the effective management of information sharing in it through public channels Internet. This complex enables to authorize access to the closed sections of portals containing information protected according a copyright law, while ensuring the independence of hardware and software platform for constructing and operation of portals.*

*Keywords:* distributed network; management access to information; user authorization; information exchange; educational portal.

### АКТУАЛЬНОСТЬ РЕШАЕМОЙ ЗАДАЧИ

Современное состояние информационных технологий в сфере образования характеризуется широким развитием форм и способов представления информации различного содержания в сети Интернет. Вместе с тем, в образовательных учреждениях существует потребность в ограничении для внутренних и внешних пользователей доступа к определенным ресурсам (электронные учебно-методические комплексы, отчеты по НИР и др.), которые являются интеллектуальной собственностью образовательного учреждения или его работников. С другой стороны, с целью эффективного развития и обмена опытом, назрела острая необходимость обмена информацией между образовательными учреждениями и предоставления доступа к объектам своей интеллектуальной собственности на договорной основе через свои Web-порталы и публичные каналы Интернет, обеспечивая при этом надежную защиту информации от несанкционированного доступа. Однако порталы учебных заведений имеют различную структуру и реализованы на разных аппаратно-программных платформах с помощью различных, иногда несовместимых технологий. Унификация схемы представления, хранения информации и системы доступа к ней является крайне трудоемким и дорогостоящим способом решения проблемы. Это обуславливает актуальность темы исследования и определяет необходимость построения системы управления информационным обменом сети образовательных порталов, способной обеспечить единообразное и эффективное управление доступом к защищаемым ресурсам независимо от технологий разработки порталов и аппаратных решений различных производителей.

### НАЗНАЧЕНИЕ И ВОЗМОЖНОСТИ СИСТЕМЫ

Система управления информационным обменом представляет собой программно-технический комплекс на платформе свободно распространяемого ПО,

обеспечивающий построение распределенной приватной сети порталов образовательных учреждений и эффективное управление информационным обменом в ней через публичные каналы Интернет. Она реализует возможность авторизованного доступа к закрытым разделам порталов, содержащих информацию, являющуюся объектом интеллектуального права, при обеспечении независимости от аппаратно-программной платформы построения и функционирования порталов.

К основным функциональным задачам, решаемым системой, относятся:

1. Управление сетью порталов посредством создания доменных групп пользователей, установление разрешения доступа между доменными группами и формирование уровня привилегий доступа.
2. Управление доступом к разделам портала различными пользователями посредством назначения тех или иных ресурсов открытыми или закрытыми, и определения привилегий доступа к закрытым ресурсам.
3. Управление учетными записями пользователей.
4. Контроль за функционирование сети и информационным обменом между серверами доступа.
5. Предоставление неавторизованного доступа к открытым разделам портала.
6. Предоставление авторизованного доступа к закрытым разделам порталов для соответствующих групп пользователей.

Последние две функциональные возможности по предоставлению доступа более детально представлены на рисунке 1.

К дополнительным функциональным возможностям аппаратно-программной платформы, не связанным непосредственно с функционалом системы, можно отнести задачи реализации функций:

1. Пакетной фильтрации трафика и брандмауэра к защищаемому portalу.
2. Сервера AAA для формирования профиля пользователей на Web-портале.



Рисунок 1 – Модель функциональных возможностей предоставления доступа

Необходимо также отметить, что нефункциональной особенностью системы является использование в качестве аппаратной платформы серверов на базе процессоров x86, а в качестве программной платформы ОС Linux.

## ПОЛЬЗОВАТЕЛИ СИСТЕМЫ

В структуре системы выделяются пользовательские домены. Под пользовательским доменом подразумевается уникально именованная группа пользователей, которая связана с одним образовательным учреждением и с одним или несколькими порталами, функционирует на одной аппаратно-программной платформе, имеет своего администратора, может иметь привилегированный доступ к ресурсам порталов, связанных с соответствующим сервером доступа.

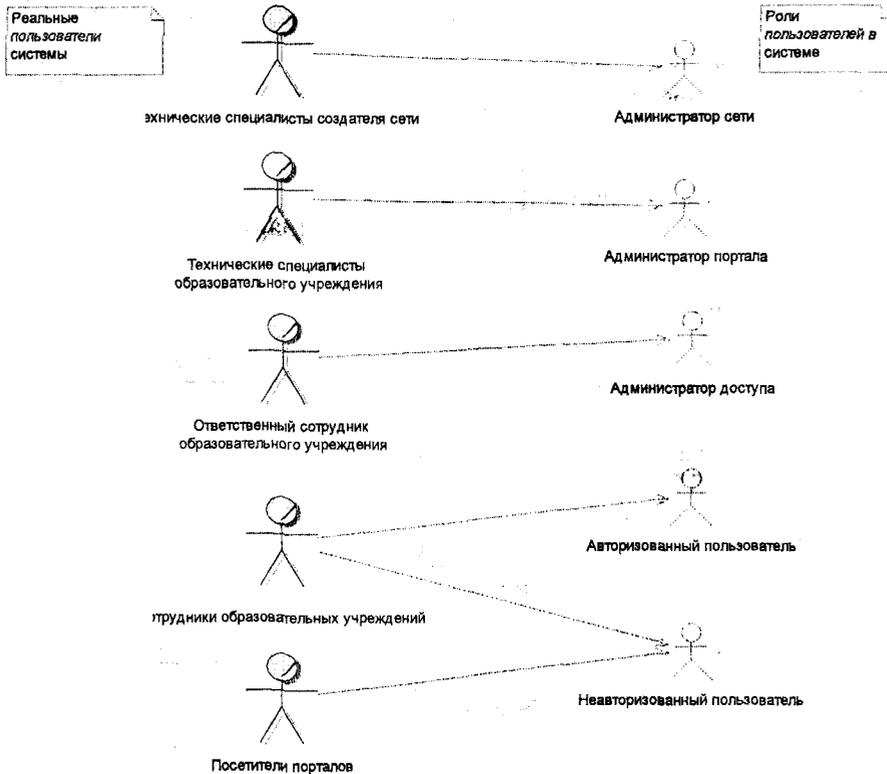


Рисунок 2 – Основные роли пользователей в системе и их взаимосвязь с реальными пользователями

На рисунке 2 представлены основные роли пользователей в системе и их взаимосвязь с реальными пользователями. В системе управления выделяются пять ключевых ролей пользователей:

1. Неавторизованные пользователи – могут получить доступ к открытым разделам портала.

2. Авторизованные пользователи – могут получить доступ к закрытым разделам порта в зависимости от того, к какой группе уровня привилегий доступа они относятся. Пользователи могут принадлежать только одной группе привилегий доступа. Группы привилегий доступа имеют строгую иерархию подчиненности и вложения, поэтому пользователи, принадлежащие к группе с высоким приоритетом, будут иметь доступ ко всем закрытым разделам с меньшим уровнем приоритета доступа.

3. Администраторы доступа – определяющие, какие из разделов портала являются открытыми, а какие закрытыми и устанавливающие уровни привилегий доступа к закрытым разделам.

4. Администраторы домена – формируют структуру порталов данного сервера доступа. Они могут создавать, удалять, изменять учетные записи пользователей и

перемещать их между группами уровней доступа. Они также осуществляет контроль за функционированием системы доступа и обращениями к связанным порталам.

5. Администратор сети – создает и удаляет доменные группы, связывает доменные группы с порталами, назначает администратора домена, разрешает доступ пользователям одной доменной группы к другим порталам (является необходимым, но недостаточным условием доступа). Он также осуществляет контроль функционирования сети в целом и репликацией данных.

### СОСТАВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ СИСТЕМЫ ДОСТУПА

Реализация функциональных возможностей системы связана с решением в системе задач двух основных задач:

1. Построение сервера AAA (аутентификации, авторизации, аккаунтинга), реализующего создание распределенной структуры пользовательских доменов и объединение пользователей в группы уровней доступа.

2. Построение древовидной структуры порталов, назначение прав доступа к разделам портала и реализация механизма их наследования.

Взаимосвязь основных сущностей исследуемой предметной области представлена в форме диаграммы классов на рисунке 3.

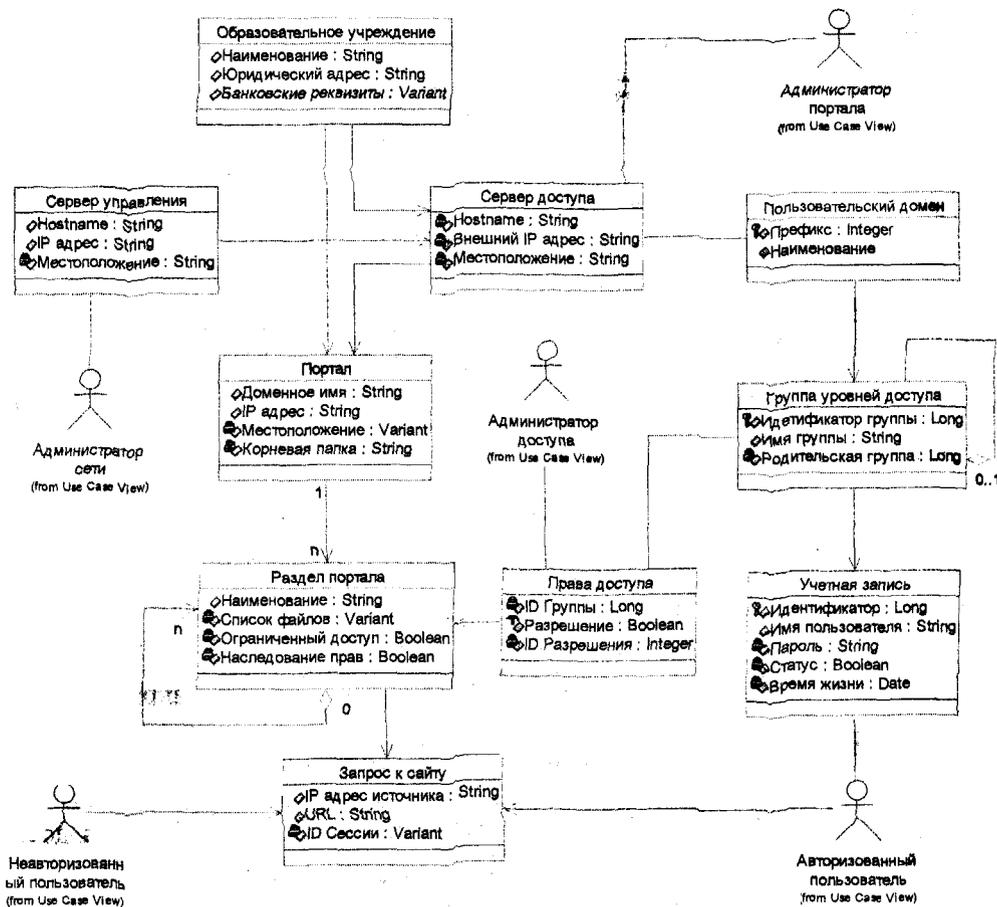


Рисунок 3 – Классы предметной области системы информационного обмена

Также реализация функциональных ролей пользователей подразумевает создание набора графических пользовательских интерфейсов, реализующих соответствующий функционал. Основными из них являются следующие интерфейсы:

1. Аутентификации пользователей при обращении к закрытым ресурсам порталов.
2. Управления учетными записями пользователей.
3. Формирования древовидной структуры портала.
4. Назначения прав доступа на основе наглядного представления дерева портала.
5. Управления доменными группами и междоменным доступом.

Задача реализации функциональных возможностей системы управления информационным обменом в целом, хранения данных и построения пользовательских интерфейсов, в частности, определила множество необходимых компонентов, обеспечивающих функционирование систем. Их взаимосвязь в подсистеме обеспечения доступа представлена на рисунке 4

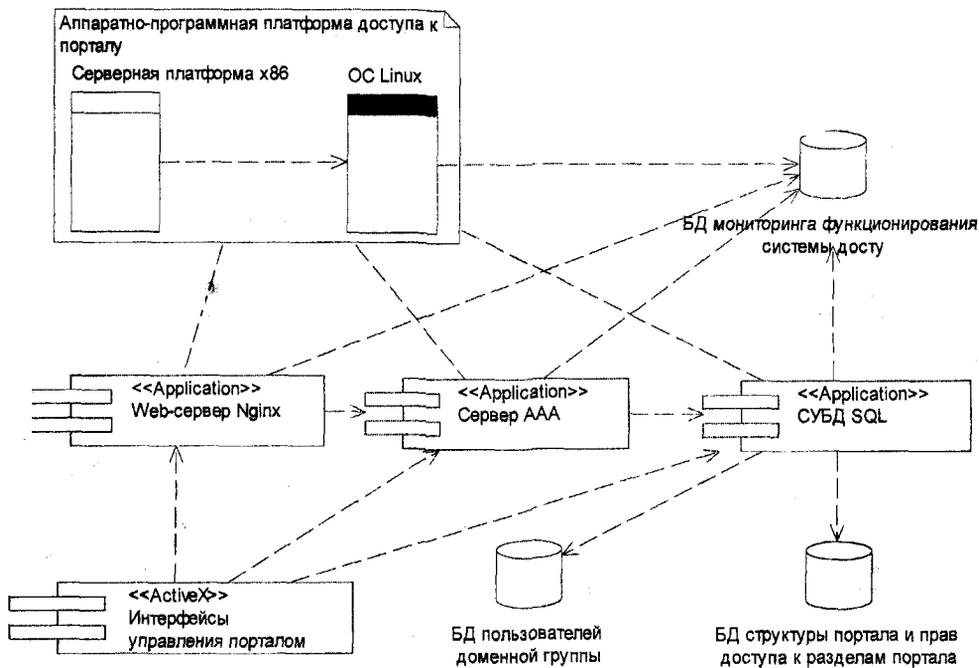


Рисунок 4 – Компоненты подсистемы контроля доступа

## ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ

На рисунке 5 представлена диаграмма развертывания системы управления информационными сетями образовательных порталов. К отличительным особенностям построения и функционирования системы можно отнести следующие аспекты:

1. Компоненты подсистемы доступа функционируют на серверах доступа, отвечающих за отдельный пользовательский домен и ассоциированные с ними порталы. Серверы доступа, в свою очередь, связаны с центральным сервером управления сети. Каждый отдельный сервер доступа устанавливается в разрыв подключения web-сервера к корпоративной сети и сети Интернет. Он выполняет функции маршрутизатора и брандмауэра и, соответственно, является для web-сервера внешним шлюзом. Один сервер доступа может обеспечивать защищенный доступ к одному или группе порталов, работающих на одном или нескольких серверах, которые

можно на логическом или физическом уровне отделить с помощью сервера доступа от других фрагментов сети. Обязательным условием функционирования системы является принадлежность IP-адресов доменных имен защищаемых порталов подсетям на локальных интерфейсах сервера доступа. В случае невозможности организации подключения сервера доступа в «разрыв», по причине территориальной удаленности web-серверов или наличия нескольких территориальной удаленных точек подключения к сети Интернет необходима установка нескольких серверов доступа для каждой территориально удаленной группы порталов в одном образовательном учреждении.

2. С целью обеспечения безопасного информационного обмена внутри сети и репликации данных предполагается установка между сервером управления сети и серверами доступа виртуальных зашифрованных туннелей. Для обеспечения безопасности просмотра защищенного контента порталов предполагается переключение пользователя после авторизации на работу по протоколу HTTPS.

3. Реализация данной схемы ограничения доступа к порталам предполагает ряд ограничений. Прежде всего, система предполагает четкую иерархию ограничений прав доступа, которая заключается в том, что уровни привилегий для всех дочерних разделов не могут быть ниже уровня привилегий родительского раздела, но могут иметь более жесткие ограничения. В связи с этим необходимо упорядочивание структуры разделов порталов с целью обеспечения эффективного управления доступом. Также целесообразно помещать в отдельные разделы страницы и исполняемым на сервере кодом и устанавливать соответствующие привилегии доступа к данным разделам, поскольку в исполняемом коде может осуществляться доступ к защищаемым разделам портала.

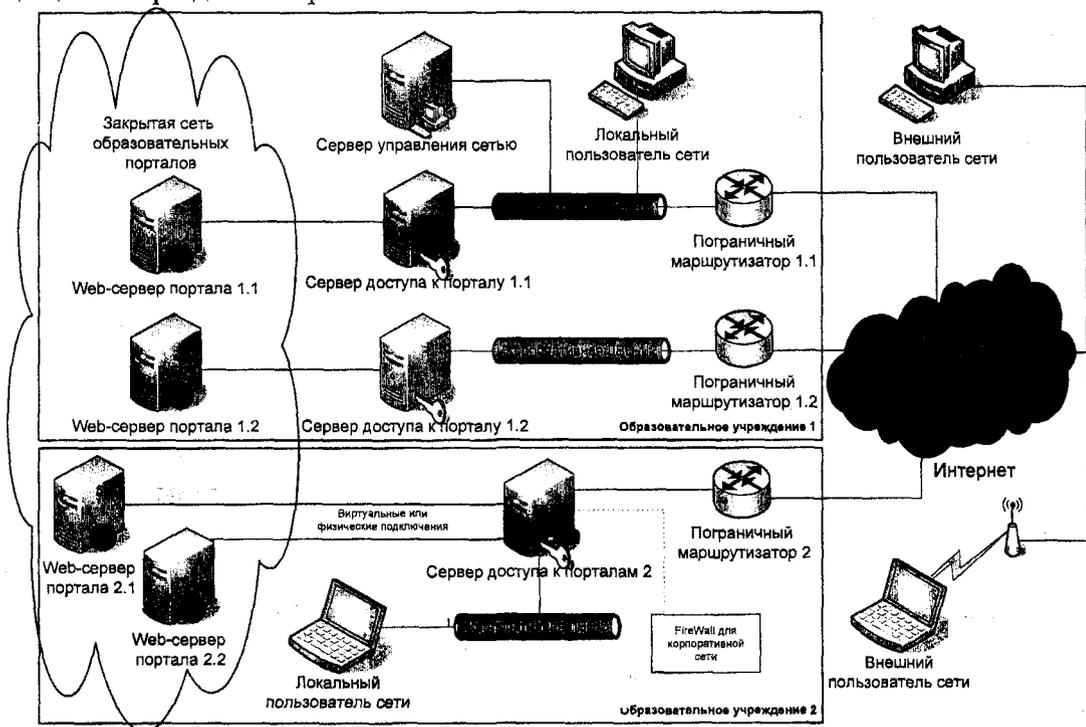


Рисунок 5 – Схема развёртывания элементов системы

В заключение следует отметить, что основными результатами исследования являются обоснование принципов создания систем управления информационным обменом сети образовательных порталов и построение прототипа программно-

технического комплекса, реализующего разработанные принципы. На основе этого в дальнейшем планируется реализация проекта действующей сети образовательных порталов региональных ВУЗов.

В перспективе, исходя из полученных результатов, предполагается:

- проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию и использованию технических средств идентификации пользователей в разрабатываемой системе посредством электронной цифровой подписи;
- выполнение опытно-конструкторских работ по созданию специализированной аппаратно-программной платформы на базе открытого программного обеспечения, которая будет представлять собой новое законченное технологическое решение для построения защищенных частных сетей порталов, способное конкурировать с некоторыми решениями зарубежных производителей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галатенко В.А. Основы информационной безопасности. – Интернет-университет информационных технологий. – М.: ИНТУИТ.ру, 2008. – 208 с.
2. Берлин А.Н. Телекоммуникационные сети и устройства. – Интернет-университет информационных технологий. – М.: ИНТУИТ.ру, БИНОМ, 2008. – 319 с.
3. Cisco System Inc. Описание технологии аутентификации TACACS+/Cisco System Inc., 2003. [Электронный ресурс] – URL: [http://www.cisco.com/russian\\_win/warp/public/3/ru/solutions/sec/mer\\_tech\\_ident-tacacs.html](http://www.cisco.com/russian_win/warp/public/3/ru/solutions/sec/mer_tech_ident-tacacs.html).
4. Cisco System Inc. CiscoSecure Access Control Server: Primer Introduction / Cisco System Inc., 2005. [Электронный ресурс] – URL: [http://www.cisco.com/application/pdf/en/us/guest/products/ps2086/c1161/cdcont\\_0900aecd8040daa7.pdf](http://www.cisco.com/application/pdf/en/us/guest/products/ps2086/c1161/cdcont_0900aecd8040daa7.pdf).
5. Cisco System Inc. Authentication Protocols: TACACS+ & RADIUS comparison / Cisco System Inc., 2006. – [Электронный ресурс] – URL: [http://www.cisco.com/en/US/tech/tk59/technologies\\_tech\\_note09186a0080094e99.shtml](http://www.cisco.com/en/US/tech/tk59/technologies_tech_note09186a0080094e99.shtml).
6. Backman D. Guarding The Flank With RADIUS & TACACS+ / Dan Backman, 2001. – [Электронный ресурс] – URL: <http://www.networkcomputing.com/902/902ws1.html>.
7. Пинженин В., Мокроусов М. Протоколы RADIUS и TACACS+: сравнение и принципы функционирования. – Сетевые решения, 2003. – [Электронный ресурс] – URL: [http://www.opennet.ru/base/cisco/radius\\_tacacs.txt.htm](http://www.opennet.ru/base/cisco/radius_tacacs.txt.htm)

**Лазарев Сергей Александрович**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Кандидат экономических наук, начальник технического отдела  
Тел.: 8(4862) 43-26-19  
E-mail: lsa@ostu.ru

**Демидов Александр Владимирович**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Аспирант кафедры «Электроника, вычислительная техника  
и информационная безопасность»  
Тел.: 8(4862) 40-96-14  
E-mail: alexander.v.demidov@gmail.com

С.М. ПЛАТУНОВА

## МОДЕЛЬ КОРПОРАТИВНОЙ СЕТИ ПРИ НАСТРОЙКЕ IP-ДОМЕНОВ

*Работа содержит элементы теории массового обслуживания. В качестве коммутационного оборудования рассматриваются управляемые коммутаторы 2-го и 3-го уровня. Целью работы является определение параметров и характеристик структуры сети. Предложенная методология позволяет оперативно оценить показатели производительности системы на ранних стадиях проектирования сети, оценить стоимость оборудования, рассчитать топологию сети, определить сценарий ее развертывания.*

**Ключевые слова:** модель; очереди; система массового обслуживания; коммутаторы 2-го и 3-го уровня.

*This work contains Queuing System Theory elements. 2d and 3d level controlled switches are studied. The aim of this work is to define characteristics of structure of the network, preset for the corporate network- IP-domain installation. The procedure, proposed in this work, enables to estimate performance measures of the system on early stages of its design efficiently, measure equipment costs, design the network and figure out mission scenario.*

**Keywords:** model; queuing; queuing system service; 2d and 3d level switches.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методология анализа задержек базируется на определении временных задержек, что обеспечивает расчет, оценку и выбор параметров, определяющих производительность корпоративной сети. Основной характеристикой, определяющей фактическую скорость обслуживания и показатели производительности, является величина средней задержки прохождения через сеть. Основным параметром обслуживания и производительности сети в целом являются временные составляющие общей задержки, которые определяют фактическую скорость обработки. Ограничением при анализе производительности корпоративной сети является стоимость системы. В работе требуется рассмотреть модель структуры для функции корпоративной сети и проанализировать ее характеристики. Анализ характеристик сети с использованием разработанной модели заключается в выявлении ее свойств[1].

### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Структура сети задается в зависимости от решаемых задач корпорации. Узлы коммутации сети в виде коммутаторов в корпоративной сети могут решать функцию настройки IP -доменов. Структура сети показана на рисунке 1.

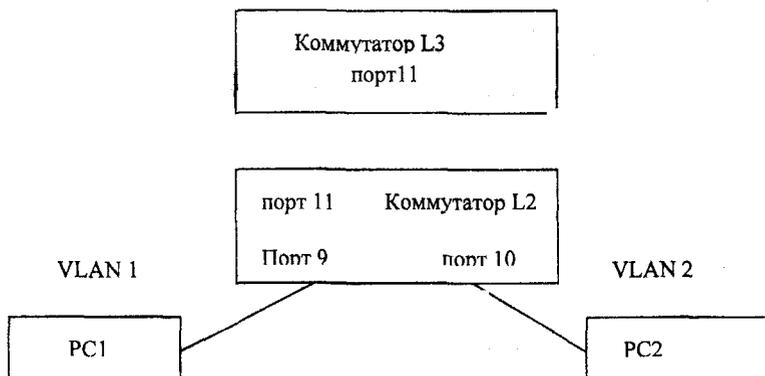


Рисунок 1 – Структура корпоративной сети при настройке IP -доменов

При моделировании структуры сети применена базовая модель в виде системы массового обслуживания (СМО) М/М/1, описанная Л. Клейнроком в трудах «Вычислительные системы с очередями» и «теория массового обслуживания».

В связи с изменениями скорости аппаратного состава современных корпоративных компьютерных сетей, рационально провести моделирование на базе современных сетевых элементов.[2]. К современным сетевым элементам относятся управляемые коммутаторы производителя Zyxel 2-го уровня ES-3124 и 3-го уровня GS-4012F. Обслуживающим прибором в СМО предлагается считать структуру из двух коммутаторов. Предлагается время обслуживания в СМО считать равным сумме времен обслуживания в коммутаторах между конкретными портами. Скорость связи между коммутаторами равна 1 Гбит/с и не влияет на время обслуживания.

При рассмотрении СМО используются следующие предположения:

1. Заявка, поступившая в систему, мгновенно попадает на обслуживание, если прибор свободен.

2. В приборе на обслуживании в каждый момент времени может находиться только одна заявка.

3. После завершения обслуживания какой-либо заявки в приборе очередная заявка выбирается на обслуживание из очереди мгновенно, то есть, другими словами прибор не простаивает, если в очереди есть хотя бы одна заявка.

4. Поступление заявок в СМО и длительность их обслуживания не зависят от того, сколько заявок уже находится в системе или от каких-либо других факторов.

5. Длительность обслуживания заявок не зависит от скорости (интенсивности) поступления заявок в систему.

Для описания СМО использованы параметры: количество обслуживающих приборов, равное 1, количество поступающих в систему классов заявок, равное 1 для СМО с однородным потоком заявок, экспоненциальный закон распределения длительности обслуживания заявок, экспоненциальный поток поступления заявок в систему.

Одноканальная экспоненциальная СМО М/М/1 является наиболее простой в точки зрения аналитического расчета. В качестве основных характеристик СМО с однородным потоком заявок используются: нагрузка системы, загрузка системы, среднее время ожидания заявок в очереди, среднее время пребывания заявок в системе, средняя длина очереди заявок, среднее число заявок в системе. Параметрами являются:  $b$  – время обслуживания,  $\lambda$  – интенсивность входного потока заявок.

1. Нагрузка системы: (1)

$$y = b\lambda$$

2. Загрузка системы:

$$\rho = \lambda b < 1$$

3. Среднее время ожидания заявок в очереди:

$$w = \frac{\rho b}{1 - \rho}$$

4. Среднее время пребывания заявок в системе:

$$u = w + b = \frac{b}{1 - \rho}$$

5. Средняя длина очереди заявок:

$$l = \lambda' w$$

6. Среднее число заявок в системе:

$$m = \lambda' u$$

$\lambda'$  – производительность системы, представляющая собой интенсивность потока обслуженных заявок, выходящих из системы; для СМО с накопителем неограниченной

ёмкости при условии отсутствия перегрузок, вероятность потери заявок равна нулю, следовательно, производительность системы совпадает с интенсивностью поступления заявок в систему.

### РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК

Структура сети, заданная для функции настройки IP-доменов, представлена графом трехфазной СМО, показанным на рисунке 2.

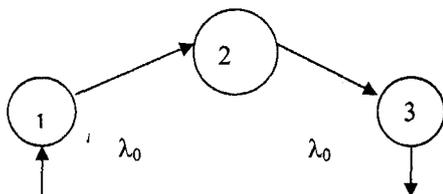


Рисунок 2 – Граф СМО

Время обслуживания в СМО равно сумме времен обслуживания в трех фазах:

1 фаза – между 9 и 11 портом коммутатора второго уровня;

2 фаза – 11 порт коммутатора третьего уровня;

3 фаза – между 11 и 10 портом коммутатора второго уровня;

Применяются коммутаторы второго уровня ES-3124 и третьего уровня GS-4012F с пропускной способностью по данным производителя 12,8 Гбит/с и 24 Гбит/с.

Интенсивность входного потока в СМО равна 0,1 Гбит/с, времена обслуживания 1,875 и 0,500 с<sup>-1</sup>.

Значения характеристик СМО, рассчитанные с использованием выражения (1) для среднего времени ожидания заявок в очереди СМО типа М/М/1 и фундаментальных соотношений, представленных выше, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения характеристик СМО

Характеристики СМО	Значения характеристик
Интенсивность заявок, с <sup>-1</sup>	0,100
Время обслуживания, в первой фазе, с	1,875
Время обслуживания, во второй фазе, с	0,500
Время обслуживания, в третьей фазе	1,875
Время обслуживания, суммарное, с	4,250
Нагрузка	0,425
Загрузка	0,425
Коэфф-т простоя	0,575
Время ожидания, с	3,141
Время пребывания, с	7,391
Длина очереди	0,314
Число заявок в узле	0,739

Рассчитаем характеристики СМО, работающей в области загрузок, близких к 1, для этого будем считать, что интенсивность потока поступающих в сеть заявок равна  $\lambda_0 = 0,22 \text{ с}^{-1}$ .

Значения характеристик СМО, работающей в области загрузок, близких к 1, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики СМО работающей в области загрузок, близких к 1

Характеристики СМО	Значения характеристик
Интенсивность заявок, $c^{-1}$	0,220
Время обслуживания в первой фазе, с	1,875
Время обслуживания, во второй фазе, с	0,500
Время обслуживания, в третьей фазе, с	1,875
Время обслуживания, с	4,250
Нагрузка	0,935
Загрузка	0,935
Коефф-т простоя	0,065
Время ожидания, с	61,135
Время пребывания, с	65,385
Длина очереди	13,450
Число заявок в очереди	14,385

Анализ представленных результатов показывает, что увеличение интенсивности поступления заявок в СМО до значения  $\lambda_0 = 0,22 c^{-1}$  привело к резкому росту значений сетевых характеристик. В частности, среднее время пребывания заявок в сети выросло в 8,8 раз, а число заявок, находящихся в очередях, выросло в 42,8 раза. СМО будет работать в области больших загрузок, при увеличении нагрузки до 0.935 и приведет к существенному изменению характеристик обслуживания заявок.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена модель структуры корпоративной сети. Анализ результата исследования структуры сети, заданной для функции настройки IP-доменов, показывает, что увеличение интенсивности поступления заявок в СМО привело к резкому росту значений сетевых характеристик. СМО будет работать в области больших загрузок при увеличении нагрузки более 0.9 и приведет к существенному изменению характеристик обслуживания заявок. Определены границы интенсивности входного потока для структуры с коммутаторами ES-3124 и GS-4012F в структуре сети. Предложенная методология позволяет администраторам оперативно оценить показатели производительности системы на ранних стадиях проектирования сети, оценить стоимость оборудования, рассчитать топологию сети, определить сценарий ее развертывания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алиев Т.И. Основы моделирования дискретных систем. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. – 373 с.
2. Платунова С. М. Влияние ошибок и коллизий на производительность сетевых приложений – СПб: Научно-технический вестник СПб ГУ ИТМО, 2008, С. 211–217.

Платунова Светлана Михайловна

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, г. Санкт-Петербург

Старший преподаватель кафедры

«Аппаратно-программные комплексы вычислительной техники»

Тел.: (812)342-3555, 89046070502, (812)373-5282

E-mail: vt@limtu.ru, platunowasweta@gmail.com

А.П. ФИСУН, В.Е. ФИСЕНКО

## НОВЫЕ ПОДХОДЫ К СНИЖЕНИЮ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЛОЖНОСТИ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ЧАСТИЧНО КОММУТИРУЕМЫХ ИТКС

*В статье предлагается новый метод оценки надежности элементов больших информационно-телекоммуникационных систем (ИТКС), основанный на концепции размена вычислительной сложности на точность измерений. Данный метод позволяет определять надежность информационных направлений (ИН) ИТКС как надежность параллельно-последовательных систем, состоящих из приоритетных путей этих ИН, что ведет к существенному снижению вычислительной сложности задач оценки надежности элементов ИТКС.*

**Ключевые слова:** информационно-телекоммуникационная система; информационное направление; надежность; параллельно-последовательная система.

*In given clause the new method of an estimation of reliability of elements of greater information-telecommunication systems (ITCS), based on the concept of exchange of computing complexity on accuracy of measurements is offered. The given method allows to define reliability of information directions (ID) ITCS, as reliability of the parallel-serial systems consisting of priority ways of this ID, that conducts to essential decrease in computing complexity of problems of an estimation of reliability of elements of ITCS.*

**Keywords:** information-telecommunication system; an information direction; reliability; parallel-serial system.

Необходимость стратегической и оперативной оценки социально-экономических процессов и явлений, происходящих в стране и в отдельных ее регионах, а также эффективного управления социотехническими системами существующих сфер общества и государства, их структурными и функциональными звеньями обуславливает необходимость решения проблемы повышения эффективности информационного обеспечения высших органов государственной власти и управления на основе регулярного развития информационно-телекоммуникационных систем различных классов, обеспечивающих высокое качество сбора, обработки и передачи информации ИТКС [1-3].

Обеспечение надежности искомым систем является первоочередной задачей при их проектировании и эксплуатации. Недостаточная надежность ИТКС как в целом, так и отдельных ее компонентов снижает и показатели качества обрабатываемой в ней информации, в том числе, ее физическую целостность, достоверность, полноту, безопасность, что обуславливает угрозы принятия неэффективных решений должностными лицами органов управления. Таким образом, обеспечение требуемой надежности ИТКС и ее компонентов является одним из важных направлений повышения эффективности функционирования как первичной сети связи, так и всей ИТКС.

Эффективность использования первичной сети связи существенно зависит от выбранного плана распределения каналов и трактов в сети. От того, насколько рационально составлен данный план, зависит не только величина требуемого канального ресурса, необходимого для удовлетворения требований информационных направлений в каналах, но и надежность каждого из направлений и всей сети в целом.

Однако в силу значительной вычислительной сложности существующих оптимизационных алгоритмов и вследствие этого невозможности использования их для реальных сетей связи, при дефиците времени, а также разнородности известных методов решения задач анализа и синтеза первичных сетей связи [2-3], вопросы

создания и рационального использования в системе управления универсального программно-алгоритмического обеспечения в настоящее время не являются достаточно проработанными.

Этот факт и определяет проблему оперативного управления первичной сетью связи, заключающуюся в нахождении за приемлемое время такого варианта плана распределения каналов, при котором обеспечивается передача заданного объема информационных потоков при выполнении требований по надежности как отдельных ИН, так и сети в целом, при минимальных затратах канального ресурса. Решение этой проблемы не представляется возможным без создания нового экономного метода оценки структурной надежности элементов информационных систем за приемлемое время.

В качестве такого экономного метода представляется возможным использовать предлагаемый ниже адаптивный метод приоритетных путей оценки структурной надежности элементов частично коммутируемой ИТКС, который создан благодаря разработке новой концепции оценки надежности больших ИТКС. Данная концепция основана [1,4,5] на способе размена вычислительной сложности на точность измерений. Такой подход позволяет за счет снижения точности результатов расчета показателей надежности информационных направлений уменьшать количество элементов ИТКС, по которым производится расчет, что в свою очередь ведет к снижению вычислительной сложности этих задач. Пути, обеспечивающие расчет надежности ИН с точностью не ниже требуемой, будем называть приоритетными.

Основным объектом при расчетах надежности (в смысле структурной надежности) является последовательная система, состоящая из  $n$  независимых (в смысле надежности) подсистем. Численное значение показателя надежности зависит от того, какое число элементов имеется в данной подсистеме, от надежности этих элементов и схемы их соединения, т.е. показатель надежности подсистемы есть функция, зависящая от числа и схемы соединения элементов в подсистеме и их показателей надежности. При увеличении размерности ИТКС количество этих элементов резко возрастает, что в конечном итоге и не позволяет использовать известные методы расчета для оценки структурной надежности ИТКС в реальном масштабе времени.

Разработка метода приоритетных путей основывается на выдвинутой гипотезе «О возможности оценки надежности ИН частично коммутируемых ИТКС с требуемой точностью по их приоритетным путям». На основе гипотезы сформулирована следующая теорема.

**Теорема.** Если ИН являются элементами частично коммутируемых ИТКС, то оценка их надежности с требуемой точностью возможна по их приоритетным путям.

Для доказательства теоремы было проведено исследование зависимости надежности ИН от структуры и количества путей их составляющих [3]. В работе различают следующие пути: независимые (не имеющие общих ребер); зависимые (имеющие более одного общего ребра); минимально зависимые (имеющие одно общее ребро).

Исследование показало, что требуемая надежность ИН, равная  $P_{E_w} = 0,96$ , при надежности входящих в него независимых путей  $H_z$  равной  $P_{E_w H_z} = 0,9$  достигается уже при наличии в ИН всего двух независимых путей ( $P_{E_w} = 0,99$ ). Третий независимый путь повышает надежность ИН только на 0,9% ( $P_{E_w} = 0,999$ ), четвертый – на 0,09%

( $P_{E_w} = 0,9999$ ). Видно, что начиная с третьего пути прирост надежности (в случае зависимых путей будет еще меньше) каждого последующего пути становится соизмерим с ошибками при определении надежности путей передачи информации, на основании этого их можно исключить из дальнейшего расчета. Выше сказанное остается справедливым и для ИН при надежности входящих в них независимых путей, равной  $P_{E_w H_z} = 0,8$ .

Результаты расчетов надежности ИН, включающих в себя различное количество независимых и минимально зависимых, показали, что количество минимально зависимых путей, оказывающих заметное влияние на надежность ИН при наличии в нем только одного независимого пути, не превышает двух-трех. При наличии в данном ИН двух независимых путей равно 0 при  $P_{E_w H_z} = 0,9$  и не превышает одного при  $P_{E_w H_z} = 0,8$  и двух при  $P_{E_w H_z} = 0,7$ . При наличии в ИН трех независимых путей – количество минимально зависимых путей, оказывающих заметное влияние на надежность ИН, не превышает одного в наихудшем случае (при  $P_{E_w H_z} = 0,7$ ). Вклад зависимых путей в повышение надежности ИН при наличии в данном ИН двух – трех независимых путей минимален и не превышает одного в наихудшем случае (при  $P_{E_w H_z} = 0,7$ ). Такие случаи на сетях связи, когда вероятность  $P_{E_w H_z}$  всех входящих в него каналов равна 0,7, на практике не имеют место (наличие путей с  $P_{E_w H_z} = 0,7$  на сетях связи является единичным исключением), что позволяет исключить при расчетах надежности ИН зависимые пути. Очевидно, что максимальный вклад в надежность ИН будут вносить независимые и минимально зависимые пути, которые в общем случае составляют незначительную часть из массива всех путей, образующих данное ИН. Отсюда следует, что только независимые и минимально зависимые пути будут являться приоритетными путями, используемыми при расчетах надежности ИН.

Проведенное исследование зависимости надежности ИН от структуры путей их составляющих [2,3] выявило между надежностью ИТКС, ее пропускной способностью и задействованным для обеспечения информационного обмена каналным ресурсом, следующие закономерности:

- количество приоритетных путей в ИН частично коммутируемой ИТКС ограничено;

- количество приоритетных путей в ИН частично коммутируемой ИТКС зависит от надежности этих путей и требований, предъявляемых к точности получаемых результатов.

Проведенная количественная оценка путей с различной структурой в ИН [3,4] позволила сделать следующие выводы:

- структура частично коммутируемой ИТКС обеспечивает не менее 4 независимых и минимально зависимых путей в каждом ИН;

- высокая надежность путей в частично коммутируемой ИТКС и требуемая точность результатов измерений обеспечивают количество приоритетных путей (2-4) в ИН, достаточное для использования их при расчете надежности ИН с требуемой точностью;

- структура частично коммутируемой ИТКС обеспечивает необходимое для расчета с требуемой точностью надежности ИН количество приоритетных путей;

- задача нахождения надежности ИН частично коммутируемой ИТКС может быть сведена к решению задачи определения надежности параллельно-последовательной системы, являющейся множеством приоритетных путей этого ИН;

- сведение задачи нахождения надежности ИН частично коммутлируемой ИТКС к решению задачи определения надежности параллельно-последовательной системы, являющейся множеством приоритетных путей этого ИН, снижает ее вычислительную сложность.

Таким образом, на основе сформулированной гипотезы и доказанной теоремы предложен [4] новый метод оценки надежности ИН с уменьшенной вычислительной сложностью – метод приоритетных путей, включающий в себя два этапа.

**Первый этап.** Выделение из массива путей, составляющих данное ИН, параллельно-последовательной системы, состоящей из приоритетных путей данного ИН.

**Второй этап.** Определение надежности ИН как надежности параллельно-последовательной системы, состоящей из приоритетных путей данного ИН.

**Заключение.** Предложенный метод на основе использования приоритетных путей существенно снижает объем вычислений при расчете надежности ИН ИТКС, что позволяет повысить оперативность работы должностных лиц на этапе оценки информации и принятия решений по управлению функционированием ИТКС, что, в свою очередь, позволяет управлять реконфигурацией структуры ИТКС в реальном масштабе времени. Кроме того, предложенный метод приоритетных путей позволяет методологически обосновано формировать критерии выбора показателей надежности частично коммутлируемых и некоммутируемых ИТКС.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Фисун А.П., Фисенко В.Е., Митяев В.В. Оценка надежности информационно-телекоммуникационных систем в реальном масштабе времени на основе приоритетных методов: монография. – Орел: ОГУ, 2007. – 191 с.
2. Фисун А.П., Фисенко В.Е. и др. Развитие методологических основ информатики и информационной безопасности систем: монография; под ред. А.П. Фисуна. – Орел: ОГУ, 2004. – 252 с. – деп. в винити 07.07.04, № 1165-в2004.
3. Фисун А.П., Фисенко В.Е. и др. Актуальные проблемы теории и практики информационной науки: монография; под ред. А.П. Фисуна. – Орел: ОГУ, 2003. – 115 с. – Деп. в ВИНТИ 19.02.03, № 2210-В2003.
4. Фисенко В.Е. Новая концепция оценки надежности больших информационно-телекоммуникационных систем // Изв. Тул. гос. ун-та. – Сер. Вычисл. техника. – Тула, 2006. – Вып. 1. – С.161-165.
5. Фисенко В.Е. Математические аспекты снижения вычислительной сложности оценки надежности информационно-телекоммуникационных систем // Социально-экономические и технические системы [Электронный ресурс], 2008. – т.47. – № 4. – URL: <http://sets.ru/index2.php?main.php>.

**Фисун Александр Павлович**

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Доктор технических наук, профессор кафедры «Электроника, вычислительная техника, информационная безопасность»

Тел.: 8(4862) 42-15-56

E-mail: [fisun@orel.ru](mailto:fisun@orel.ru)

**Фисенко Виктор Евгеньевич**

Орловская региональная академия государственной службы, г. Орел

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Информатика и информационные технологии в менеджменте»

Тел.: 8(4862) 36-47-36

E-mail: [fisenko\\_v@mail.ru](mailto:fisenko_v@mail.ru)

УДК 681.3

И.А. КАЛМЫКОВ, А.В. БАРИЛЬСКАЯ, О.А. КИХТЕНКО

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ  
КРИПТОГРАФИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ,  
ФУНКЦИОНИРУЮЩЕЙ В ПОЛИНОМИАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ  
КЛАССОВ ВЫЧЕТОВ**

*Рассмотрен алгоритм нелинейного шифрования потока данных с операцией возведения в степень элементов расширенных полей Галуа  $GF(p^V)$ . Представлена структура устройства для вычисления индекса элемента поля Галуа.*

*Ключевые слова:* нелинейное шифрование; расширенные поля Галуа; элементы полей Галуа; полиномиальная система классов вычетов; индекс.

*Algorithm for non-linear encryption of a data flow with elements of extended Galois  $GF(p^V)$  fields involution operation. Device structure for Galois field element index calculation is offered.*

*Keywords:* non-linear encryption; extended Galois  $GF(q^V)$ ; elements of extended Galois  $GF(q^V)$  polynomial system of residue classes; index.

Сегодня Россия стоит перед исторической необходимостью перехода от индустриального общества на принципиально новый уровень общественного и экономического развития, определяемого жесткими требованиями современной научно-технической революции. Речь идет о формировании информационного общества, информационной экономики, которые в передовых странах уже получили определенное развитие.

В информационном обществе, материальной базой которого является информационная экономика, акцент значимости смещается на информационный ресурс. В этом случае информационные ресурсы рассматриваются как стратегические ресурсы страны, которые требуют постоянной защиты от НСД других пользователей. Однако задача защиты конфиденциальной информации от НСД является одной из самых древних и полностью не решенных до настоящего времени проблем.

К сожалению, существующие системы криптографической защиты информации не позволяют в полной мере решить данную проблему, то есть обеспечить требуемый уровень криптографической защиты информации в современных информационных технологиях, которые характеризуются высокоскоростной обработкой и передачей больших объемов данных. Так известные методы поблочного шифрования, обеспечивая требуемый уровень защиты информации от НСД, обладают низкой скоростью зашифрования из-за многократно выполняемых однотипных итераций. Асимметричные системы шифрования также не позволяют обеспечить реальный масштаб времени обработки данных. Несмотря на то, что системы побитового шифрования потока данных обеспечивают высокую скорость зашифрования и расшифрования, такие системы криптографической защиты уязвимы к атакам на основе исходных и подобранных текстов из-за того, что при побитовом шифровании операция суммирования по модулю 2 является единственным способом построения обратимой функции шифрования [1,2].

Решить данные проблемы можно за счет применения нетрадиционных арифметических систем счисления, обладающих свойством кольца и поля. Среди таких систем особое место занимает полиномиальная система классов вычетов (ПСКВ).

Рассмотрим вопросы разработки систем криптографической защиты информации, функционирующей в ПСПВ, уделив особое внимание организации безопасной связи внутри групп абонентов с динамически меняющимся составом участников.

Известно, что данная задача является актуальной, так как позволяет получить секретный ключ в незащищенной среде [1]. В этом случае для предотвращения несанкционированного доступа со стороны лиц, не входящих в группу, необходимо вычисление некоторого общего секретного ключа, который может быть определен только участниками группы. При этом каждый абонент группы должен участвовать в генерации секретного ключа. Простейшей схемой получения общего ключа для группы абонентов является схема с доверенным сервером, в котором один из пользователей посылает ему запрос на связь с абонентами, а сервер рассылает каждому абоненту общий ключ для связи внутри группы и список участников группы в зашифрованном виде. Но при такой схеме возникают сложности при высокой динамичности группы [1]. Поэтому для обеспечения доступа к конфиденциальному ресурсу в многопользовательской информационной среде используются криптографические протоколы разделения секретов.

Существует несколько алгоритмов разделения секретного ключа на секретные доли. Но все они предполагают, что ни один абонент группы не сможет вычислить пароль без помощи других абонентов. При этом любая схема разделения секрета состоит из двух взаимосвязанных протоколов: протокола формирования и распределения долей секрета между абонентами и протокола восстановления секрета группой пользователей с помощью их секретных долей. Первый протокол описывает последовательность действий системы и пользователей, в результате которых каждый авторизованный абонент получает свою долю секретного ключа. Второй протокол предназначен для того, чтобы законные пользователи, собравшись вместе и объединив свои секретные доли, могли восстановить секретный ключ.

В данной работе рассматривается пороговая схема  $(m, n)$  разделения секрета с использованием полиномиальной системы классов вычетов.

В данной схеме используются неприводимые полиномы  $p_i(z)$ . Для реализации  $(m, n)$ -пороговой схемы разделения секрета выбирается полином  $p_i(z)$ , степень которого превышает полиномиальную форму секрета  $M(z)$ , т.е.

$$\text{ord } p_i(z) > \text{ord } M(z), \quad (1)$$

где  $M$  – секрет.

Затем выбираются неприводимые полиномы  $p_i(z)$ , удовлетворяющие условию

$$\text{ord } p_i(z) \leq \text{ord } p_j(z), \quad (2)$$

где  $i=1, 2, \dots, n$ .

При этом степени полиномов должны быть упорядочены по возрастанию:

$$\text{ord } p_1(z) < \text{ord } p_2(z) \leq \text{ord } p_3(z) \dots \leq \text{ord } p_n(z). \quad (3)$$

Для создания  $(m, n)$  схемы проверяется выполнение условия

$$\text{ord}(p_1(z) \cdot p_2(z) \cdot \dots \cdot p_m(z)) > \text{ord}(p_1(z) \cdot p_{n-m+2}(z) \cdot p_{n-m+3}(z) \cdot \dots \cdot p_n(z)). \quad (4)$$

Чтобы определить доли секрета и распределить их между абонентами группы, выбирается полином  $r(z)$  и вычисляется значение

$$M^*(z) = M(z) + r(z) \cdot p_i(z). \quad (5)$$

В качестве долей для каждого пользователя выступают остатки:

$$M_i^*(z) \equiv M(z) \bmod p_i(z). \quad (6)$$

Используя китайскую теорему об остатках,  $m$  пользователей способны восстановить значение  $M^*(z)$ , а затем, зная  $r(z)$  и  $p_i(z)$ , определить секрет  $M(z)$ . При этом группа из  $m-1$  абонентов не способна будет получить значение  $M(z)$ . Для эффективной работы  $(m, n)$  схемы разделения секрета в ПСКВ необходимо определить предельное значение полинома  $r(z)$ , которое позволило бы при меньших временных затратах определить  $M^*(z)$ , а также выполнить обратное преобразование (6).

**ТЕОРЕМА**

Если в  $(m, n)$  модулярной полиномиальной пороговой схеме, в которой справедливо

$$\text{ord } p_1(z) \leq \text{ord } p_2(z) \leq \dots \leq \text{ord } p_n(z),$$

имеет место соотношение

$$\text{ord } r(z) < \text{ord}(P(z)/p_1(z)), \tag{7}$$

где  $P(z) = \prod_{i=1}^n p_i(z)$  – полный диапазон, то такая пороговая схема обеспечивает восстановление секрета  $M(z)$  для любого набора  $m$  пользователей группы, состоящей из  $n$  абонентов.

**ДОКАЗАТЕЛЬСТВО**

Известно, что для получения долей в полиномиальной модулярной  $(m, n)$  пороговой схеме производится вычисление полинома-образа

$$M^*(z) = M(z) + r(z) \cdot p_1(z), \tag{8}$$

где  $M(z)$  – секрет;  $p_1(z)$  – неприводимый полином.

При этом необходимо

$$\text{ord } M(z) < \text{ord } p_1(z). \tag{9}$$

Так, система неприводимых полиномов  $p_i(z)$ ,  $i=1, 2, \dots, n$  упорядочена по степеням, что для однозначного восстановления секрета  $M(z)$  необходимо обеспечить

$$\text{ord } M(z) < \text{ord } P_m(z), \tag{10}$$

где  $P_m(z) = \prod_{i=1}^m p_i(z)$  – произведение наименьших выбранных неприводимых полиномов.

При этом очевидно, что справедливо неравенство

$$\text{ord } M^*(z) < \text{ord } P(z), \tag{11}$$

где  $P(z) = \prod_{i=1}^n p_i(z)$  – полный диапазон.

Разделим обе стороны выражения (8) на значение  $p_1(z)$ :

$$\left[ \frac{M^*(z)}{p_1(z)} \right] = \left[ \frac{M(z) + r(z)p_1(z)}{p_1(z)} \right], \tag{12}$$

где  $[ ]$  – наименьшее целое.

Проведя преобразование выражения (12), получаем

$$\left[ \frac{M^*(z)}{p_1(z)} \right] = \left[ \frac{M(z)}{p_1(z)} \right] + \left[ \frac{r(z)p_1(z)}{p_1(z)} \right]. \tag{13}$$

Но согласно неравенства (10)

$$\left[ \frac{M(z)}{p_1(z)} \right] = 0.$$

Тогда

$$\left[ \frac{M^*(z)}{p_l(z)} \right] = r(z). \quad (14)$$

Используя условие (11), получаем:

$$\text{ord} \left( \frac{P(z)}{p_l(z)} \right) > \text{ord} r(z).$$

Теорема доказана.

Рассмотрим пример. Пусть в качестве исходного полинома выбрали  $p_l(z) = z^4 + z + 1$ . Значение секрета равно  $M(z) = z^3$ . Необходимо построить (3,4) пороговую схему, функционирующую в полиномиальной системе классов вычетов. Выбираем неприводимые полиномы  $p_1(z) = z + 1$ ;  $p_2(z) = z^2 + z + 1$ ;  $p_3(z) = z^4 + z^3 + z^2 + z + 1$ ;  $p_4(z) = z^4 + z^3 + 1$ . Данный набор многочленов определяет полный диапазон

$$P(z) = \prod_{i=1}^4 p_i(z) = z^{11} + z^8 + z^7 + z^5 + z^3 + z^2 + z + 1.$$

$$\text{Определим значение диапазона } P_m(z) = \prod_{i=1}^3 p_i(z) = z^7 + z^6 + z^5 + z^2 + z + 1.$$

Согласно условию (5) имеем

$$\text{ord} r(z) < \text{ord} \left( \frac{P(z)}{p_l(z)} \right) = 7.$$

Пусть  $r(z) = z^6$ .

Для определения образа  $M^*(z)$  воспользуемся выражением (8). Имеем

$$M^*(z) = (z^3 + z^6 \cdot (z^4 + z + 1)) \bmod P_m(z) = z^6 + z^5 + z^3 + z^2.$$

Определим доли секретов секрета  $M(z)$

$$M_1^*(z) = M^* \bmod p_1(z) = 0,$$

$$M_2^*(z) = M^* \bmod z^2 + z + 1 = 0,$$

$$M_3^*(z) = M^* \bmod z^4 + z^3 + z^2 + z + 1 = z^3 + z^2 + z + 1,$$

$$M_4^*(z) = M^* \bmod z^4 + z^3 + 1 = z^3.$$

Пусть в восстановлении секрета  $M(z)$  будут участвовать первый, третий и четвертый пользователи. Они обмениваются значениями  $M_1^*(z)$ ,  $p_1^*(z)$ ,  $M_3^*(z)$ ,  $p_3^*(z)$ ,  $M_4^*(z)$ ,  $p_4^*(z)$  и вычисляют ортогональные базисы

$$B_1 = z^8 + z^4 + z^2 + z + 1.$$

$$B_3 = z^6 + z^5 + z^4 + z^3 + z^2 + 1.$$

$$B_4 = z^8 + z^6 + z^5 + z^3 + z + 1.$$

Затем, определив свое значение

$$P_3(z) = p_1(z) \cdot p_3(z) \cdot p_4(z) = z^9 + z^8 + z^5 + z^4 + z^3 + 1,$$

используют китайскую теорему об остатках (КТО) для восстановления образа  $M^*(z)$

$$\begin{aligned} M^*(z) &= (M_1^*(z) \cdot B_1(z) + M_3^*(z) \cdot B_3(z) + M_4^*(z) \cdot B_4(z)) \bmod P_3(z) = \\ &= (z^{11} + z^8 + z^7 + z^6 + z + 1) \bmod z^9 + z^8 + z^5 + z^4 + z^3 + 1 = z^6 + z^5 + z^3 + z^2 \end{aligned}$$

Зная значение  $r(z) = z^6$  и используя выражение

$$M(z) = M^*(z) + r(z)p_1(z),$$

данные абоненты восстанавливают секрет  $M(z) = z^3$ .

Полученный результат свидетельствует о целесообразности применения полиномиальной системы классов вычетов в системах разделения секрета. Кроме того, доказанная теорема позволяет сократить временные затраты, необходимые на вычисления секретного ключа для группы пользователей, что является базой для построения высокоскоростных систем нелинейного шифрования.

Применение непозиционной полиномиальной системы позволяет не только создавать системы разделения секрета, но и разрабатывать криптографические процедуры защиты информации. Такие системы будут обладать всеми достоинствами систем нелинейного шифрования, обеспечивая реальный масштаб времени закрытия информации и операций на основе операций сложений, умножений и возведения в степень элементов расширенных полей Галуа  $GF(q^v)$ . Кроме того, различные комбинации этих операций позволяют существенно улучшить обеспечение конфиденциальности и целостности информации.

Рассмотрим реализацию нелинейного шифрования потока данных с операцией умножения символов конечного поля  $GF(q^v)$ . В этом случае поток данных разбивается на блоки, длиной  $v$  разрядов. При этом полученный блок представляется как полином степени, не выше  $l$ . Для шифрования символов открытого текста будет применяться ключевая последовательность, полученная с помощью генератора псевдослучайной последовательности конечного поля. При этом используется целое число  $l$ , где  $l = 1, 2, \dots, 2^v - 2$ , которое выбирается заранее и может быть использовано постоянно на каждом такте работы регистра сдвига или меняться по случайному или квазислучайному закону. В этом случае нелинейное шифрование блока открытых данных будет определяться выражением

$$x(z) \cdot y(z)^l \equiv \beta(z) \pmod{q(z)}, \quad (15)$$

где  $y(z)$  — полиномиальная форма представления псевдослучайной последовательности элементов поля  $GF(q^v)$ ;  $\text{ord } y(z) \leq v$ .

Псевдослучайные последовательности элементов расширенных полей Галуа  $GF(q^v)$  могут сниматься с различных ячеек (линий задержек) регистра сдвига и в различной последовательности. При этом будут создаваться различные псевдослучайные последовательности символов конечных полей, причем каждая из них не будет циклически сдвинутой относительно другой ПСП. Это позволяет за счет применения порождающих алгоритмов создавать адаптивные криптографические системы высокой стойкости путем задания неопределенности хода шифрования.

Как показано в ряде работ [3-5], для сокращения выполнения мультипликативных операций по модулю целесообразно использовать индексы элементов полей Галуа  $GF(q^v)$ , порожденных неприводимым полиномом  $p(z)$ . На рисунке 1 приведена структура устройства нелинейного шифрования в полиномиальной системе классов вычетов, реализующего алгоритм (15).

Устройство работает следующим образом. С генератора ПСП на входы устройств выбора  $l$  и выбора  $y(z)$  подаются биты, снятые с ячеек регистров сдвига. Под действием управляющего сигнала определяется последовательность элементов поля  $GF(q^v)$ , т.е. значения  $l$  и  $y(z)$ . Последнее поступает на блок определения индекса элемента, с выхода которого двоичный код поступает на первый вход множителя по

модулю  $M = q^v - 1$ , на второй вход которого подается значение  $l$ , представленное в двоичном коде. С выхода модулярного умножителя снимается результат:

$$\gamma = l \cdot m \bmod q^v - 1, \quad (16)$$

где  $m$  – это индекс элемента  $y(z)$  в расширенном поле Галуа  $GF(q^v)$ .

Параллельно с этим открытый текст в виде двоичного кода степени меньше  $v$  записывается в регистр для временного хранения. С выхода регистра двоичный параллельный код подается на блок определения индекса элемента поля  $GF(q^v)$ . Вычисленное значение индекса

$$\varphi = \sum_{j=0}^{v-1} 2^j \cdot \varphi_j \quad (17)$$

поступает на второй вход сумматора по модулю  $q^v - 1$ , который реализует алгоритм

$$U = \varphi + \gamma \bmod q^v - 1 = \varphi + (l \cdot m \bmod q^v - 1) \bmod q^v - 1. \quad (18)$$

Полученный результат в двоичном коде подается на преобразователи индекс-элемент поля Галуа, благодаря которому справедливо сравнение

$$\beta(z) = g^u \bmod p(z), \quad (19)$$

где  $g$  – первообразный элемент мультипликативной группы.

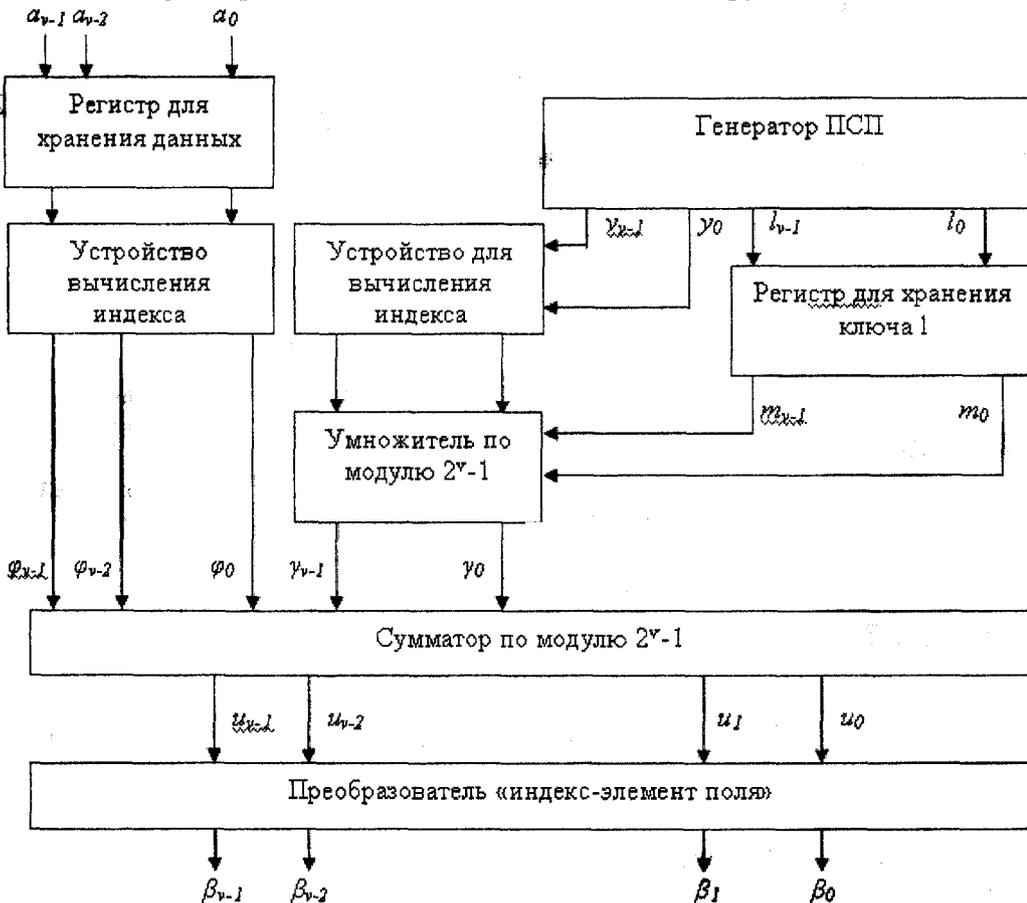


Рисунок 1 – Структура шифратора

В ходе исследований была проведена сравнительная оценка выполнения нелинейного шифрования в ПСКВ с использованием индексного представления и без него. Известно, что для вычисления степени  $a^n$ , где  $a$  – элемент некоторого кольца,

достаточно выполнить  $2 \lceil \log_2 n \rceil$  умножений. Тогда время реализации выражения (15) без индексного представления будет определяться

$$T_1 = T_{умн} + 2 \cdot \lceil \log_2 n \rceil T_{умн} = (2 \lceil \log_2 n \rceil + 1) \cdot T_{умн},$$

где  $T_{умн}$  – время выполнения операции умножения. Если использовать комбинационные умножители, которые характеризуются минимальными временными задержками, и положить, что сумматор содержит три логических ступени, то

$$T_1 = 3a \cdot t_{зд.р.} (2 \lceil \log_2 n \rceil + 1), \quad (20)$$

где  $t_{зд.р.}$  – время задержки распространения сигналов.

Проведя анализ структуры разработанного шифратора, очевидно, что время на выполнение операции нелинейного шифрования

$$T_2 = T_{уст.выб.} + T_{эл-индекс} + T_{мод.умн.} + T_{мод.сум.} + T_{индекс-эл}. \quad (21)$$

В работах [4-7] представлены устройства реализации операции преобразования элемент-индекс и обратно. Проведенные исследования показали, что

$$T_{эл-индекс} = T_{индекс-эл} = T_{НЕ} + T_{И} + T_{CD} = t_{зд.р.} + t_{зд.р.} + 3t_{зд.р.} = 5t_{зд.р.}, \quad (22)$$

где  $T_{НЕ}$ ,  $T_{И}$  – время срабатывания элементов И, НЕ;

$T_{CD}$  – время отклика шифратора.

Проведя анализ известных схемных решений модульных умножителей и сумматор, было определено, что если положить, что  $T_{мод.умн.} = T_{мод.сум.} = T_{умн.}$ , то имеем

$$T_2 = 15t_{зд.р.} + 6at_{зд.р.} = (15 + 6a)t_{зд.р.} \quad (23)$$

Сравнительная характеристика временных затрат на выполнение нелинейного шифрования с использованием индексного представления и без него показана на рисунке 2.

T, сек

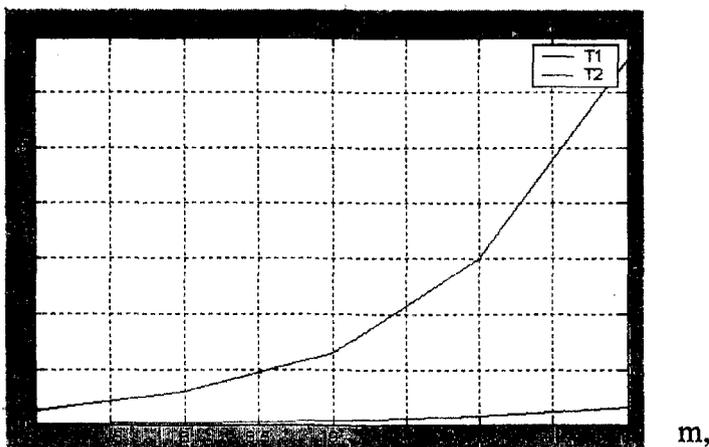


Рисунок 2 – Сравнительная характеристика времени выполнения нелинейного шифрования

Полученные результаты свидетельствуют о том, что применение индексов позволило повысить быстродействие нелинейного шифрования. При этом при увеличении разрядности обрабатываемых данных возрастает и выигрыш в производительности.

Процедура дешифрования принятого сообщения сводится к выполнению следующего выражения:

$$\beta(z) \cdot y(z)^{-1} \equiv \alpha \pmod{p(z)}. \quad (24)$$

Вычисление величины  $y(z)^{-l} \bmod p(z)$  на приемной стороне может быть сведена к возведению элементов поля  $GF(q^v)$  в степень  $l$  по модулю  $p(z)$  и вычислению полинома. Для сокращения времени дешифрования можно также использовать индексное представление элементов поля Галуа.

Представленные в статье материалы свидетельствуют о целесообразности применения системы классов вычетов для обеспечения более высокой степени криптографической защиты потока данных.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шнайер Б. Прикладная криптография. Протоколы, алгоритмы, исходные тексты на языке Си. – М.: Издательство ТРИУМФ, 2003. – 816 с.
2. Иванов М.А., Чугунов И.В. Теория, применение и оценка качества генераторов псевдослучайных последовательностей. – М.: КУДИЗ-ОБРАЗ, 2003. – 240 с.
3. Калмыков И.А., Чипига А.А. Алгоритм обеспечения информационной скрытности для адаптивных средств передачи информации // Инфокоммуникационные технологии. – 2007. – №3. – С.159-162.
4. Калмыков И.А. Устройство для вычисления индекса элементов поля Галуа по модулю / И.А. Калмыков, А.В. Барильская, О.А. Кихтенко // Успехи современного естествознания. Материалы заочной электронной конференции «Современные телекоммуникационные и информационные технологии», Российская Академия Естествознания, Москва, 2007.
5. Кихтенко О.А. Алгоритм обеспечения информационной скрытности для адаптивных средств защиты информации / И.А. Калмыков, А.В. Барильская, О.А. Кихтенко // Материалы VIII Всероссийского конкурса студентов и аспирантов по информационной безопасности «SIBINFO-2008». – Томск. – ТГУСУР. – 2008.
6. Барильская А.В. Обеспечение информационной скрытности для адаптивных средств защиты информации. Алгоритм нелинейного шифрования / И.А. Калмыков, А.В. Барильская, О.А. Кихтенко // Материалы Третьей международной научно-технической конференции «Инфокоммуникационные технологии в науке, производстве и образовании» – Ставрополь. – СевКавГТУ. – 2008.
7. Калмыков И.А. Обеспечение информационной скрытности для адаптивных средств защиты информации. Алгоритм нелинейного дешифрования / И.А. Калмыков, А.В. Барильская, О.А. Кихтенко // Материалы Третьей международной научно-технической конференции «Инфокоммуникационные технологии в науке, производстве и образовании». – Ставрополь. – СевКавГТУ. – 2008.

**Калмыков Игорь Анатольевич**

Северо-Кавказский государственный технический университет, г. Ставрополь

Доктор технических наук, профессор, профессор

Тел.: 89034163533

E-mail: kia762@yandex.ru

**Барильская Анастасия Валерьевна**

Северо-Кавказский государственный технический университет, г. Ставрополь

Аспирантка кафедры защиты информации

Тел.: 89054437060

E-mail: stasya-super@yandex.ru

**Кихтенко Ольга Александровна**

Северо-Кавказский государственный технический университет, г. Ставрополь

Аспирантка кафедры защиты информации

Тел.: 89624412046

E-mail: kao87@bk.ru

С.В. МОЖИН

## АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦИКЛОВ В ИСПОЛНЯЕМОМ КОДЕ

*Рассматривается задача восстановления структурных компонентов программного обеспечения. Предлагается алгоритм автоматического определения циклов в исполняемом коде.*

*Ключевые слова:* верификация программного обеспечения; граф потока управления; обратный инжинеринг; алгоритм поиска структурных компонентов.

*The problem of restoration software structural components is considered. Automatic cycles definition algorithm is offered.*

*Keywords:* software verification; control flow graf; reverse engineering; structuring algorithm.

В настоящее время широко применяется программное обеспечение, разработанное сторонними производителями. Как правило, такое программное обеспечение предоставляется без исходного кода, необходимого для его проверки с точки зрения информационной безопасности использования. Несмотря на это, такое программное обеспечение должно быть исследовано для оценки рисков его использования. Ни бинарный код, ни ассемблерный листинг, полученный в результате дизассемблирования, не позволяют с приемлемыми трудозатратами оценить взаимосвязь элементов программы, а также идентифицировать в программе стандартные алгоритмические конструкции [3]. Автоматическое определение структурных компонентов исполняемого кода дает возможность частично преодолеть указанные выше трудности. Программные приложения, представленные в виде исполняемых файлов или на языке ассемблера, сложны для анализа их специалистами в области информационной безопасности и должны быть предоставлены им для анализа на более высоком уровне представления.

При решении этой задачи возникают трудности принципиального характера. В частности, при компиляции программы из языка высокого уровня в язык ассемблера характерно отображение «многие к одному» концепций языка высокого уровня в концепции языка ассемблера, как следствие, однозначное восстановление структурных компонентов программы становится зачастую невозможным [2].

В силу указанных выше причин полностью автоматический определитель структурных компонентов исполняемого кода реализовать принципиально невозможно. Поэтому системы определения структурных компонентов исполняемого кода программ должны работать во взаимодействии с аналитиком, который управляет процессом декомпиляции. В ходе определения структурных компонентов исполняемого кода программы решаются следующие задачи: выделение структурных единиц программы, в частности, подпрограмм в однородном ассемблерном листинге, выявление параметров подпрограмм и возвращаемых ими значений, структурный анализ, то есть восстановление операторов циклов, ветвлений и т.п., восстановление типов данных (как базовых, так и производных) и другие. Поскольку все эти задачи достаточно трудоемки и алгоритмически неразрешимы, на сегодняшний день нет известных программных продуктов, восстанавливающих структурные компоненты исполняемого кода программы, которые качественно справлялись бы со всеми перечисленными выше задачами [1].

Рассмотрим задачу восстановления циклов в трассе выполнения некоторой программы. Для восстановления структурных компонентов кода сначала строится граф

потока управления программы (рис. 1). Граф потока управления может иметь вид иерархического дерева, каждый узел Node которого содержит информацию об адресе текущей инструкции, ее мнемоническом коде, уровне вложенности, указателе на следующую и предыдущую инструкцию, количество дочерних команд, указателе на первую дочернюю команду.

0x010054DC		mov eax, dword ptr ds:[eax]
0x010054DE		mov dword ptr ds:0x1008388, eax
0x010054E3	☐	call .+0x00000134 (0x0100561c),
0x0100561C		xor eax, eax
0x0100561E		ret
0x010054E8		cmp dword ptr ds:0x100705c, ebx
0x010054EE		jnz .+0x0000000c (0x010054fc),
0x010054FC	☐	call .+0x00000109 (0x0100560a),
0x0100560A		push 0x00030000
0x0100560F		push 0x00010000
0x01005614	☐	call .+0x00000051 (0x0100566a),
0x01005501		push 0x01001200
0x01005506		push 0x010011fc
0x0100550B	☐	call .+0x000000f4 (0x01005604),
0x01005604		jmp dword ptr ds:0x10011c0, [MSVCRT.DLL!_jnitterm]
0x01005510		mov eax, dword ptr ds:0x1007104
0x01005515		mov dword ptr ss:[ebp+0xfffffe0], eax
		:
0x0100552A		lea eax, dword ptr ss:[ebp+0xfffffd4]
0x0100552D		push eax
0x0100552E		call dword ptr ds:0x10011c4, [MSVCRT.DLL!__getmainargs]
0x01005534		mov dword ptr ss:[ebp+0xfffffd0], eax
0x01005537		push 0x010011f8
0x0100553C		push 0x010011f4
0x01005541	☐	call .+0x000000be (0x01005604),
0x01005604		jmp dword ptr ds:0x10011c0, [MSVCRT.DLL!_jnitterm]
0x01005546		add esp, 0x00000024

Рисунок 1 – Трасса выполнения программы

Необходимо отметить, что факт повторного появления в трассе выполнения программы узла с уже использовавшимся адресом и кодом не является признаком наличия цикла. Программист может использовать стандартные библиотечные функции многократно в произвольном месте кода. Поэтому факт повторения через  $n$  шагов в трассе выполнения программы узла с ранее использовавшимся адресом и кодом является поводом проверить следующие  $n$  шагов трассы на предмет их совпадения с  $n$  предыдущими шагами. Это можно выполнить с помощью простого алгоритма, псевдокод которого приведен ниже.

Алгоритм проверки факта повторения  $n$  команд в трассе выполнения программы.

Вход: трасса выполнения процесса в виде иерархического дерева  $T$ , текущий элемент трассы  $NextNode$  (Address, Command, level,  $NextNode$ , ChildCount, FirstChild), количество элементов в предполагаемом цикле –  $n$ .

Выход: true – следующие  $n$  шагов трассы совпадают с  $n$  предыдущими;

false – иначе.

bool isCikl (NextNode, n)

```
{
  PatternNode = Selected[0]; //узел образец
  for (i = 0; i < n; i++)
  {
    if (NextNode.Address != PatternData.Address) return false;
    PatternNode = Selected[i+1];
    NextNode = NextNode.NextSibling;
  }
}
```

return true;

Если в результате выявления циклов в трассе выполнения программы происходит перестройка иерархического дерева трассы с целью визуализации найденных циклических конструкций, то необходимо учитывать, что для отыскания вложенных циклов нужно организовать последовательный обход всех элементов трассы. Ниже приведен псевдокод алгоритма поиска и визуализации циклических конструкций в трассе выполнения программы.

Вход: трасса выполнения процесса в виде иерархического дерева T, каждый элемент трассы Node(Address, Command, level, NextSibling, ChildCount, FirstChild)

Выход: последовательность команд цикла, количество проходов по циклу

```

NextNode; //текущий элемент трассы для анализа
BeginNode; //первый элемент цикла
Selected[i]; //список элементов трассы, входящих в цикл
Address; //адрес первой команды в потенциальном цикле
Trassa_size; //количество элементов на данном уровне вложенности
TotalCount; //счетчик обработанных элементов
CurrentCount; //счетчик элементов, для которых закончен поиск циклов
Count; //счетчик проходов по циклу
//получим количество элементов на данном уровне вложенности
Trassa_size = ParentNode.ChildCount;
NextNode = ParentNode.FirstChild; //это первый элемент в трассе
CurrentCount = 0; //счетчик обработанных элементов трассы

do { //перебираем все элементы в трассе
  BeginNode = NextNode; //запоминаем потенциальное начало цикла
  Selected <- NextNode; //вносим элемент в список элементов цикла
  Address = Node.Address; //запоминаем адрес первой команды потенциального цикла
  TotalCount = CurrentCount + 1;
  do { //перебираем все следующие элементы трассы
    NextNode = NextNode.Sibling; //это следующий элемент трассы
    if (NextNode) //если следующий элемент трассы существует?
    {
      Selected <- NextNode; //вносим элемент в список элементов цикла
      if (NextNode.Address == Address) //повтор адреса – возможно цикл
      {
        Selected -> NextNode; //исключаем элемент из цикла
        Count = 1; //количество повторов
        while (isCikl (NextNode, TotalCount, Trassa_size, Count))
        { //функция isCikl() проверяет факт
          Count++; //повтора всех элементов входящих в цикл
          TotalCount = TotalCount + SelectedCount;
        } //считаем количество проходов по циклу
        if (Count > 1) //если имеем два и более прохода по дереву ...
        { //... перестраиваем дерево
          //функция Perestroika() перестраивает дерево и возвращает следующий элемент трассы
          BeginNode = Perestroika (BeginNode, NextNode, SelectedCount, Count);
          CurrentCount = CurrentCount + (SelectedCount * Count - 1);
          break;
        }
        Selected <- NextNode;
      } //конец, если повтор адреса
      TotalCount ++;
    } //конец, если следующий элемент трассы существует?
  } while (TotalCount < Tr_size); //конец перебора всех следующих

```

```
NextNode = BeginNode.Sibling;
CurrentCount ++;
}while (NextNode);           //конец перебора всех элементов трассы
```

На рисунке 2 показан результат работы предложенного алгоритма.

0x01002265	mov esi, dword ptr ds:0x1001164	0x01002265	mov esi, dword ptr ds:0x1001164
0x01002266	mov ebx, eax	0x01002266	mov ebx, eax
0x0100226D	jmp +0x00000029 (0x01002296),	0x0100226D	jmp +0x00000029 (0x01002296),
Цикл - 31 проходов		Цикл - 31 проходов	
0x01002298	push edi	0x01002298	Пролод 1
0x01002299	push edi	0x01002299	push edi
0x0100229A	lea eax, dword ptr ss:[ebp+0xfffffe4]	0x0100229A	push edi
0x0100229D	push edi	0x0100229A	lea eax, dword ptr ss:[ebp+0xfffffe4]
0x0100229E	push eax		
0x0100229F	call esi, [USER32.DLL   GetMessageW ]	0x01002272	push eax
		0x01002273	push ebx
0x01002265	mov esi, dword ptr ds:0x1001164	0x01002274	push dword ptr ds:0x1006374
0x01002266	mov ebx, eax	0x0100227A	call dword ptr ds:0x1001160, [USER32.DLL   TranslateAcceleratorW ]
0x0100226D	jmp +0x00000029 (0x01002296),	0x01002280	test eax, eax
	Цикл - 31 проходов	0x01002282	jnz +0x00000014 (0x01002296),
	Пролод 1	0x01002284	lea eax, dword ptr ss:[ebp+0xfffffe4]
	Пролод 2	0x01002287	push eax
	Пролод 3	0x01002288	call dword ptr ds:0x100115c, [USER32.DLL   TranslateMessage ]
		0x0100228E	lea eax, dword ptr ss:[ebp+0xfffffe4]
		0x01002291	push eax
		0x01002292	call dword ptr ds:0x1001158, [USER32.DLL   DispatchMessageW ]
0x01002298	push edi		Пролод 2
0x01002299	push edi		Пролод 3

Рисунок 2 – Результат поиска циклических конструкций в трассе выполнения программы

Очевидно, что подобная визуализация структурных компонентов программного обеспечения значительно упрощает процесс его анализа и верификации.

Следующим этапом автоматического анализа трассы выполнения программы является правильное восстановление операторов цикла языка высокого уровня **while** и **do – while** с простыми условиями операторов передачи управления, таких, как **break**, **continue** и **return**.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуильфанов И. FLIRT – Fast Library Identification and Recognition Technology. [Электронный ресурс] – URL: <http://www.idapro.ru/description/flirt/>
2. Щеглов К.Е. Обзор алгоритмов декомпиляции //Электронный журнал «Исследовано в России». [Электронный ресурс] – URL: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2001/116.pdf>
3. Долгова К.Н., Чернов А.В. О некоторых задачах обратной инженерии //Труды Института системного программирования РАН.

Сергей Владимирович Мюжин  
Академия ФСО России, г. Орел  
Преподаватель  
Тел.: (4862) 41-99-33  
E-mail: kattz@rambler.ru

УДК 004.056.53

Б.И. СОЛОВЬЕВ, С.А. ПРОСОЛУПОВ,  
И.Ю. ЛУКЬЯНЧЕНКОВ, Д.И. ПОДВАЛЕНЧУК

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОН БЕЗОПАСНОСТИ В ЦИФРОВОЙ СЕТИ СВЯЗИ

*В статье рассматривается актуальная задача определения узких мест по безопасности в цифровой сети связи. Для её решения используется метод разложения булевой функции по переменным, позволяющий получить на структуре сети зоны, подверженные наибольшему воздействию. Представлен пример расчёта на конкретной структуре сети связи.*

**Ключевые слова:** безопасность; передача данных; цифровая сеть связи; метод разложения булевой функции по переменным.

*The article deals with actual task of allocating drawbacks(bottlenecks) of digital telecommunication network security. Method of boolean function expansion in several parameters which allows to define most vulnerable zones of network structure is used to solve this problem. A telecommunication network structure analysis example is introduced.*

**Keywords:** security; data transfer; digital telecommunication network; method of boolean function expansion in several parameters.

### ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие и широкое применение информационных и телекоммуникационных технологий определяет создание организационных и технологических условий для перехода к информационному обществу за счет предоставления гражданам широких возможностей на свободный поиск, получение, передачу, производство и распространение информации через информационные сети.

Для реализации поставленных задач требуется создание цифровой телекоммуникационной инфраструктуры, позволяющей предоставлять услуги доступа по различным схемам к соответствующим информационным ресурсам.

Данная инфраструктура реализуется как выделенная сеть связи, наложенная на существующие цифровые каналы операторов связи различных форм собственности с использованием технологий построения виртуальных каналов связи.

Передача данных через цифровую сеть представляет собой явную угрозу для безопасности. Внутренние ресурсы сети становятся доступными для многочисленных пользователей, а конфиденциальный трафик может быть просмотрен злоумышленником.

Для обеспечения функционирования в единой телекоммуникационной среде различных по конфиденциальности или назначению информационных задач могут быть использованы различные технологии защиты каналов с использованием специальных программных и аппаратных устройств. Это позволяет обеспечить требуемый уровень безопасности путем создания внутри распределенной телекоммуникационной сети информационно-независимых виртуальных защищенных контуров, включающих как отдельные элементы, так и сегменты сетей.

При реализации поставленных задач важна финансовая сущность применения механизмов обеспечения безопасности. Учитывая высокий объем затрат, связанных с аппаратным и программным обеспечением информационной сети, требуется определить политику, которая, с одной стороны, должна отвечать требуемому уровню безопасности, а с другой – привести к минимизации расходов. Эта проблема находит свое отражение в процессе проектирования (синтеза) сети [1,2].

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целесообразно непосредственно перед внедрением механизмов защиты определить сетевую топологию, направления и интенсивности информационного обмена между корреспондирующими парами узлов (КПУ)  $Z_k, k = \overline{1, m}$  [3]. Затем, исходя

из значений вероятностей защиты от доступа  $p_{\lambda D}$  каждого отдельного сегмента (ребра) сети, выделить зоны или фрагменты сети, наиболее подверженные влиянию внешних воздействий. Адекватно полученным расчетным значениям вероятности защиты от доступа каждого фрагмента  $P_{\lambda D}$  осуществляется установка соответствующих программных и аппаратных средств обеспечения безопасности. То есть, необходимо определить такие места внедрения данных средств на сети, в которых полученный эффект от их использования будет максимальным.

Наиболее предпочтительным местом их установки будут те участки сети, которые используются совместно несколькими КПУ  $Z_k, k = \overline{1, m}$  и одновременно являются узкими местами сети [2,3]. Очевидно, что данными участками будут приведенные покрывающие множества  $\overline{P_Z}^{\lambda}, \lambda = \overline{1, \Lambda_G}$ , каждое из которых разрывает все допустимые пути между всеми КПУ.

### МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Нахождение  $\overline{P_Z}^{\lambda}, \lambda = \overline{1, \Lambda_G}$  осуществляется на основе решения задачи минимизации булевой функции (БФ) по переменным. В качестве БФ выступает матрица связности графа  $G_T(A, B)$ , соответствующего топологической структуре сети. Под минимизацией БФ понимается нахождение наиболее простого представления этой функции в виде суперпозиции простых импликант, составляющих фиксированную, функционально полную систему БФ. Схема решения данной задачи предусматривает выполнение двух этапов [4]:

1. Нахождение всех простых импликант заданной БФ или составление импликантной таблицы.
2. Нахождение приведенных систем простых импликант или построение тупиковых дизъюнктивных нормальных форм.

Импликантная таблица БФ представляет собой прямоугольную таблицу, строки которой обозначаются простыми импликантами БФ, а столбцы набором значений переменных (или соответствующими им конъюнктами единицы), на которых функция обращается в единицу. Если какая-либо простая импликанта обращается в единицу на некотором наборе значений или данная импликанта составляет часть определенной конъюнкты, то на пересечении соответствующей строки и столбца импликантной таблицы ставится «1». Если же импликанта на каком-либо наборе обращается в ноль или же не является частью определенной конъюнкты, то на соответствующем пересечении строки и столбца ставится «0». В качестве импликантной таблицы для БФ, реализующей матрицу связности графа  $G_T(A, B)$ , выступает матрица путей КПУ  $\Pi = \|\rho_{k,t}^j\|$ , строки которой представляют собой пути для каждой КПУ, расположенные в порядке возрастания рангов или соответствующие наборы значений переменных (конъюнкты) БФ, а столбцы – ребра графа, выписанные в порядке возрастания номеров или импликанты БФ:

$$\Pi = \left\| \begin{array}{cccccc} \rho_{11}^1 & \rho_{11}^2 & \dots & \rho_{11}^j & \dots & \rho_{11}^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \rho_{kt}^1 & \rho_{kt}^2 & \dots & \rho_{kt}^j & \dots & \rho_{kt}^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \rho_{mt_m}^1 & \rho_{mt_m}^2 & \dots & \rho_{mt_m}^j & \dots & \rho_{mt_m}^n \end{array} \right\|, \quad (1)$$

$$\rho_{k,t}^j = \begin{cases} 1, & b_j \in \pi_k^t; \\ 0, & b_j \notin \pi_k^t, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\pi_k^t$   $t$  – й путь между  $k$  – й КПУ.

Выделение приведенных систем простых импликант может быть произведено непосредственно по импликантной таблице. Для этого выбираются минимальные системы строк таблицы так, чтобы для каждого столбца среди выбранных строк нашлась хотя бы одна строка, содержащая в этом столбце «1». Очевидно, что в такую систему должны входить все строки, в которых содержится «1», являющаяся единственной в своем столбце. Простые импликанты, обозначающие строки с указанным свойством, составляют ядро БФ, которые накрывают соответствующие этим единицам конъюнкты функции и входят в любую приведенную систему простых импликант этой функции. Исключая из импликантной таблицы столбцы, обозначенные уже накрытыми конъюнктами, методом перебора находят минимальные покрытия оставшихся конъюнктов. Однако перебор всевозможных минимальных накрытий конъюнктов непосредственно по импликантной таблице практически применим для относительно простых импликантных таблиц, а также в тех случаях, когда требуется найти лишь одну из приведенных систем простых импликант. Для нахождения всех минимальных накрытий в случае сложных таблиц применяется естественный алгебраический метод, состоящий из следующих этапов [4]:

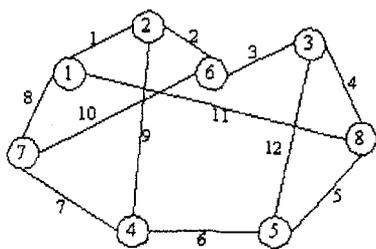


Рисунок 1 – Топологическая структура сети

1. Определяется ядро матрицы путей  $\Pi = \|\rho_{k,t}^j\|$ , т.е. нахождение ребер, непосредственно связывающих КПУ  $Z_k, k = \overline{1, m}$ .

2. В матрице  $\Pi = \|\rho_{k,t}^j\|$  вычеркиваются строки и столбцы, соответствующие элементам ядра.

3. Множество путей в модифицированной матрице путей записывается как сумма (дизъюнкция) произведений (конъюнкций) символов ребер, образующих каждый из путей рассматриваемого множества, и каждое слагаемое заключается в скобки.

4. Все знаки сложения заменяются знаками умножения и наоборот (находится двойственная булева функция).

5. Раскрываются все скобки, выражение приводится к сумме произведений (к нормальной дизъюнктивной форме) в соответствии с законами булевой алгебры.

6. К каждому из полученных слагаемых, представляющих собой приведенные системы простых импликант, добавляется ядро матрицы путей, что приводит к образованию совокупности приведенных покрывающих множеств

$$\overline{\Pi_Z} = \left\{ \overline{\Pi_Z^\lambda} \right\}, \lambda = \overline{1, \Lambda_G}, \text{ сформированных относительно путей между КПУ.}$$

### ПРИМЕР ОПРЕДЕЛЕНИЯ УЯЗВИМЫХ МЕСТ

Рассмотрим пример нахождения приведенных покрывающих множеств относительно КПУ  $Z_1 = \{a_1; a_8\}$  и  $Z_2 = \{a_2; a_4\}$  на сети, топологическая структура которой представлена на рисунке 1.

Матрица путей или импликантная таблица будет иметь следующий вид:

$$b_1 \quad b_2 \quad b_3 \quad b_4 \quad b_5 \quad b_6 \quad b_7 \quad b_8 \quad b_9 \quad b_{10} \quad b_{11} \quad b_{12}$$

$$\Pi = \begin{matrix} \pi_1^1 \\ \pi_1^2 \\ \pi_1^3 \\ \pi_2^1 \\ \pi_2^2 \\ \pi_2^3 \end{matrix} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (3)$$

Ядро матрицы путей составляют ребра  $b_9$  и  $b_{11}$ . В матрице (3) удаляются строки и столбцы, соответствующие элементам ядра, и осуществляется построение ее конъюнктивного представления:

$$\varphi = (b_1 \vee b_2 \vee b_3 \vee b_4) \cdot (b_5 \vee b_6 \vee b_7 \vee b_8) \cdot (b_1 \vee b_7 \vee b_8) \cdot (b_2 \vee b_3 \vee b_6 \vee b_{12}). \quad (4)$$

В соответствии с законом дистрибутивности в выражении (4) раскрываются скобки и производятся соответствующие преобразования:

$$\varphi = b_2 \cdot b_8 \vee b_3 \cdot b_8 \vee b_3 \cdot b_7 \vee b_2 \cdot b_7 \vee b_1 \cdot b_6. \quad (5)$$

Полученное выражение содержит пять приведенных систем простых импликант, к которым добавляются элементы ядра и образуются приведенные покрывающие множества  $\overline{\Pi_Z^1} = \{b_9, b_{11}, b_2, b_8\}$ ,  $\overline{\Pi_Z^2} = \{b_9, b_{11}, b_3, b_8\}$ ,  $\overline{\Pi_Z^3} = \{b_9, b_{11}, b_3, b_7\}$ ,  $\overline{\Pi_Z^4} = \{b_9, b_{11}, b_2, b_7\}$ ,  $\overline{\Pi_Z^5} = \{b_9, b_{11}, b_1, b_8\}$ , образующие множество  $\overline{\Pi_Z} = \{\overline{\Pi_Z^\lambda}\}$ ,  $\lambda = \overline{1,5}$ .

Среди всей совокупности приведенных покрывающих множеств определяется множество, обладающее минимальным значением  $P_{\lambda D}$ , которое рассчитывается, согласно формуле параллельного соединения сетевых элементов:

$$P_{\lambda D} = 1 - \prod_{b_j \in \overline{\Pi_Z^\lambda}} (1 - P_D) \quad (6)$$

Полученное приведенное покрывающее множество будет «узким местом» сети по безопасности.

## ВЫВОДЫ

Очевидно, что установка средств защиты информации на ребрах с наименьшим значением  $P_D$ , образующих минимальное покрывающее множество по безопасности, позволит осуществить защиту передаваемых потоков, что приведет к повышению уровня структурной безопасности сети в целом. Помимо этого, существенно экономятся средства, затрачиваемые на реализацию механизмов информационной безопасности в зависимости от степени возможных угроз.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. – СПб.: Питер, 2004. – 864 с.
2. Зайченко Ю.П., Гонта Ю.В. Структурная оптимизация сетей ЭВМ. – К.: Техника, 1986. – 168 с.
3. Филипс Д., Гарсиа-Диас А. Методы анализа сетей. – М.: Мир, 1984. – 496 с.
4. Глушков В.М. Синтез цифровых автоматов. – М.: Физматгиз, 1962. – 476 с.

**Соловьев Борис Игоревич**  
Академия ФСО России, г. Орёл  
Кандидат технических наук, доцент

**Просолупов Сергей Алексеевич**  
Академия ФСО России, г. Орёл  
Преподаватель  
E-mail: serpow@rambler.ru

**Лукьянчиков Иван Юрьевич**  
Академия ФСО России, г. Орёл  
Студент

**Подваленчук Денис Игоревич**  
Академия ФСО России, г. Орёл  
Студент