

**Министерство образования и науки Российской Федерации**

**Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»**

**16+  
ISSN 2071-6168**

**ИЗВЕСТИЯ  
ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
УНИВЕРСИТЕТА**

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

**Выпуск 11**

**Часть 1**

**Тула  
Издательство ТулГУ  
2016**

Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 11. Ч. 1. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 290 с.

Рассматриваются научно-технические проблемы информатики, вычислительной техники, защиты информации, интеллектуального анализа данных, а также вопросы применения информационных систем в решении прикладных задач.

Материалы предназначены для научных работников, преподавателей вузов, студентов и аспирантов, специализирующихся в проблематике технических наук.

*Редакционный совет*

**М.В. ГРЯЗЕВ** – председатель, **В.Д. КУХАРЬ** – зам. председателя, **В.В. ПРЕЙС** – главный редактор, **А.А. МАЛИКОВ** – отв. секретарь, **И.А. БАТАНИНА**, **О.И. БОРИСКИН**, **М.А. БЕРЕСТНЕВ**, **В.Н. ЕГОРОВ**, **О.Н. ПОНАМОРЕВА**, **Н.М. КАЧУРИН**, **В.М. ПЕТРОВИЧЕВ**

*Редакционная коллегия*

О.И. Борискин (отв. редактор), С.Н. Ларин (зам. отв. редактора), Б.С. Яковлев (отв. секретарь), И.Л. Волчкевич, Р.А. Ковалев, М.Г. Кристаль, А.Д. Маляренко (Республика Беларусь), А.А. Сычугов, Б.С. Баласанян (Республика Армения), А.Н. Чуков

***Подписной индекс 27851  
по Объединённому каталогу «Пресса России»***

Сборник зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). ПИ № ФС77-61104 от 19 марта 2015 г.

«Известия ТулГУ» входят в Перечень ведущих научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание учёной степени доктора наук

© Авторы научных статей, 2016

© Издательство ТулГУ, 2016

Данный выпуск журнала приурочен к двухлетию создания Института прикладной математики и компьютерных наук, образованного путем слияния факультета кибернетики и механико-математического факультета ТулГУ. За прошедшие с момента создания два года институт сохранил и преумножил достижения своих предшественников как в научной, так и в учебной сферах.

В настоящее время институт является основным структурным подразделением университета. В нем осуществляется подготовка специалистов, бакалавров, магистров в области информатики и вычислительной техники, математиков, механиков, а также специалистов по защите информации. Преподавателями института выполняются научные исследования практически по всем разделам компьютерных наук: алгоритмы и структуры данных (теории вычислимости, вычислительной сложности, параллельных вычислений, дедуктивных и реляционных баз данных, распознавания образов, теория алгоритмов), архитектура компьютеров (цифровая логика, теория кодирования и теория конечных автоматов); разработка программного обеспечения (создание программных систем, которые должны удовлетворять заданным программным спецификациям, быть безопасными, защищенными, надежными и заслуживающими доверия пользователей); базы данных и информационно-поисковые системы (организация больших наборов постоянно сохраняемых и совместно используемых данных, допускающих их обновление и обеспечивающих эффективное выполнение запросов); искусственный интеллект и робототехника (распознавание сенсорных сигналов, звуков, изображений и образов, обучение, процессы рассуждения при решении задач и планирования); взаимодействие человека и компьютера (пользовательский интерфейс); прикладная математика (методы и алгоритмы дискретной математики в научных исследованиях).

Ученые института идут «в ногу со временем» и начинают пробовать свои силы в новых для них сферах науки и техники. Это, в первую очередь, работы, связанные с информационной безопасностью.

Результаты исследований ученых института докладываются как на российских, так и международных научных конференциях, публикуются в российских и международных изданиях. Некоторые из них нашли отражение в данном сборнике.

*Директор ИПМКН  
кандидат технических наук, доцент  
Алексей Алексеевич Сычугов*

## ***ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ***

УДК 004.942

### **АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ В ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ**

Г.В. Басалова

*Рассмотрен подход к анализу алгоритмов преобразования информации в информационно-вычислительных системах с использованием математического аппарата сетей Петри. Предлагаемый подход позволяет выполнять моделирование и анализ алгоритмов обработки информации в разрабатываемой или уже существующей вычислительной системе. При этом анализ может производиться с помощью вычислительной техники, так как все его этапы строго формализованы.*

*Ключевые слова: алгоритмы обработки информации, моделирование вычислительных систем, сети Петри.*

Одним из основных этапов разработки любых, в том числе и специализированных, вычислительных систем являются изучение и анализ процессов обработки информации в проектируемой системе. В процессе изучения и анализа должны быть уточнены структура вычислительной системы, входные, промежуточные и выходные данные, процедуры обработки информации и последовательность их реализации, основные характеристики специализированной вычислительной системы и ограничения на ее реализацию [1].

При анализе процессов преобразования информации используются информационные модели, предназначенные для отражения информационных связей между объектами. Особенность такого рода моделей заключается в их графическом представлении, но при этом имеется возможность матричного или аналитического способа их изображения. Информационные модели отражают информационные потоки между различными объектами, отношения между ними, содержат идентификаторы объектов, объемные, временные, частотные и другие характеристики как самих объектов, так и входящих и исходящих потоков данных, а также последовательность выполнения расчетов.

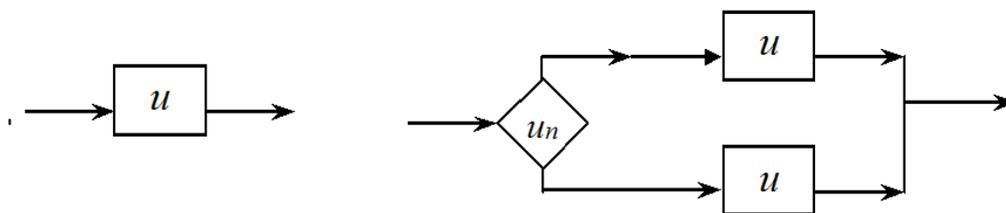
В основу описываемого подхода положен принцип последовательного эквивалентного преобразования матричных моделей систем обработки данных в зависимости от этапа анализа системы и необходимости получения требуемых характеристик.

Исходной информацией для моделирования и анализа технологии обработки данных является состав информационных ресурсов (ИР) по каждой задаче, отношения предшествования между ними, области их определения, множество используемых констант, структурированные матрицы смежности и достижимости, определяющие технологию обработки данных.

На основе анализа матриц смежности и достижимости ИР строится информационных граф для каждой задачи. Анализ информационного графа и его подграфов позволяет определить состав процедур, необходимых для решения задачи. Объединения множества процедур и множества ИР по множеству задач определяют полное множество ИР и процедур заданного множества задач обработки данных. Путем проведения специальных операций “выравнивания” и “наложения” графов отдельных задач формируется общий интегрированный граф технологии решения задач обработки данных, матрица смежности которого является результатом логического сложения матриц смежности анализируемых задач.

Интегрированный граф содержит общие и специфические части технологии решения рассматриваемого множества задач. Исходными данными для анализа, систематизации и формирования требований к схеме обработки данных является информация о парных отношениях между наборами информационных ресурсов системы обработки данных, формализуемая в виде матрицы смежности.

Рассмотрим матричные и графовые модели описания исходной информации и процедур ее обработки. Для описания алгоритмов решения задач обработки данных используют два стандартных блока: функциональный блок и блок принятия решений (рис. 1).



**Рис. 1. Блоки для построения моделей обработки информации**

Функциональный блок  $u$  представляет собой отдельную процедуру обработки данных, под которой понимается некоторое преобразование одних информационных элементов в другие безотносительно к средствам, на которых реализуется это преобразование. Основным требованием при вы-

делении функциональных блоков является одинаковый уровень абстракции и детализации при анализе отдельных задач обработки данных. Под блоком  $u_n$  принятия решений понимают процедуру или операцию логического сравнения поступающих входных данных с заданными. В результате операции сравнения управление передается одному ( $u_1$ ) или другому ( $u_2$ ) функциональному блоку. С помощью этих блоков описывают циклические участки в алгоритмах обработки данных.

Информационное обеспечение алгоритма обработки данных составляет множество типов ИР, обрабатываемых процедурами алгоритма. В качестве ИР в зависимости от уровня абстракции рассматриваются базы данных, массивы, блоки, записи и т.д. Процедуры обработки данных, входящие в функциональный блок, можно рассматривать как преобразования множества входных либо промежуточных ИР в множество промежуточных либо выходных ИР задачи [2].

Степень абстракции процедур обработки информационных элементов зависит от необходимого уровня детализации описания задач обработки данных при их анализе.

Представим процессы преобразования и обработки информации в вычислительной системе с помощью сети Петри.

Как известно, сеть Петри определяется множеством состояний и переходов, а также входными и выходными функциями переходов. Состояния сети будем обозначать кружками, а переходы черточками (барьерами). Дуги соответствуют функциям, связывающим множества состояний и переходов. Входная функция переходов определяет для каждого перехода множество его входных состояний, а выходная – множество его выходных состояний.

При использовании сетей Петри вводится понятие маркера, под которым понимается метка готовности запуска перехода по каждому из его входных состояний. Наличие маркера будем обозначать точкой в кружочке, соответствующем состоянию. Число точек соответствуют числу маркеров в каждом состоянии.

Переход может сработать, если в каждом его входном состоянии имеется хотя бы один маркер. Размещение маркеров по вершинам-состояниям сети Петри называется ее разметкой.

Таким образом, сеть Петри – это набор  $N = (P, T, F, H, M_0)$ , где

- $P$  – конечное множество состояний;
- $T$  – конечное множество переходов;
- $F: P \times T \Rightarrow \{0, 1\}$ ,  $H: T \times P \Rightarrow \{0, 1\}$  – функции инцидентности;
- $M_0: P \Rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$  – начальная разметка сети.

Графически сеть Петри представляется в виде ориентированного графа. Вершину-состояние  $p$  и вершину-переход  $t$  соединяют дугой  $(p,t)$ , если  $F(p,t)=1$  и дугой  $(t,p)$ , если  $H(t,p)=1$ .

Вершины-состояния помечаются целыми неотрицательными числами или соответствующим числом маркерных точек.

Если все состояния сети обозначить последовательно символами  $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$ , то разметку всех состояний сети можно представить в виде  $n$ -мерного вектора  $M$ , координаты которого равны числу маркерных точек в соответствующих состояниях.

Функционирование сети заключается в переходе от одной разметки к другой. Смена разметок происходит в результате срабатывания переходов. Переход  $t$  может сработать при разметке  $M$ , если

$$M(p) - F(p,t) \geq 0, \forall p \in P.$$

Это означает, что каждое входное состояние перехода  $t$  помечено хотя бы одной маркерной точкой.

В результате срабатывания некоторого перехода  $t$ , удовлетворяющего условию (1) разметка  $M$  заменяется разметкой  $M'$ :

$$\forall p \in P: M'(p) = M(p) - F(p,t) + H(t,p),$$

то есть при срабатывании перехода из каждого его входного состояния удаляется и в каждое его выходное состояние добавляется одна маркерная

точка. Это обозначается:  $M \xrightarrow{t} M'$ .

Пусть  $D = \{d_1, d_2, \dots, d_s\}$  – множество ИР специализированной вычислительной системы, где  $S$  – число элементов;  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_L\}$  – множество процедур обработки данных.

Поставим в соответствие каждому элементу  $d_i \in D$  вершину-состояние  $p_i$  сети. Каждому элементу  $u_j \in U$  поставим в соответствие переход  $t_j$  сети.

В соответствии со взаимосвязью информационных ресурсов и процедур обработки соединим дугами элементы множеств  $P$  и  $T$ . Элемент  $p_i \in P$  соединяется с элементом  $t_j \in T$  дугой  $(p_i, t_j)$ , если информационный ресурс  $d_i$  является входным элементом процедуры  $u_j$  и дугой  $(t_j, p_i)$  – если выходным. Так как информационный ресурс может являться входным для нескольких процедур, то для восстановления маркерных точек состояния  $p_i$  после срабатывания перехода  $t_j$  необходимо также построить дуги  $(t_j, p_i)$  для таких  $t_j$  и  $p_i$ , для которых существует дуга  $(p_i, t_j)$ .

Под матрицей смежности ИР  $M_0$  понимают квадратную бинарную матрицу, проиндексированную по обеим осям множеством информационных элементов и содержащую запись 1 в позиции  $(i, j)$   $i, j = \overline{1, s}$ , если между информационными ресурсами  $d_i$  и  $d_j$  существует отношение  $R$  такое, что для получения информационного элемента  $d_j$  непосредственно необходимо обращение к ИР  $d_i$ .

Считается также (для удобства), что каждый элемент достижим из самого себя, то есть  $d_i R d_j$ ,  $i = j$ . Наличие такого отношения будет обозначать как  $d_i R d_j$ , а его отсутствие как  $d_i \bar{R} d_j$ , чему соответствует запись 0 в позиции  $(i, j)$  матрицы  $M_0$ .

Такая формализация позволяет однозначно идентифицировать входные и выходные ИР в алгоритме обработки данных [3].

Матрице смежности  $M_0$  ставится в соответствие граф информационных взаимосвязей  $G(D, M_0)$ , множеством вершин которого является множество ИР, а дуга  $(d_i, d_j)$  соответствует записи 1 в позиции  $(i, j)$  в матрице смежности. Взаимосвязь между процедурами обработки, наборами входных и промежуточных данных удобно представлять с помощью таблицы инцидентности, которая представляет собой таблицу вида  $T = \|t_{ls}\|$ ,  $l = \overline{1, L}$ ,  $s = \overline{1, S}$ , где

$$t_{ls} = \begin{cases} +1, & \text{если } d_s \text{ является входным элементом процедуры } u_l, \\ 0, & \text{если } d_s \text{ не используется процедурой } u_l, \\ -1, & \text{если } d_s \text{ является исходным элементом процедуры } u_l. \end{cases}$$

В таблице  $T_0$  каждая строка отображает процедуру обработки данных, а каждый столбец – использование всеми процедурами рассматриваемого ИР, то есть в строке содержится информация о множестве входных и выходных данных, связанных с анализируемой процедурой.

В  $s$ -м столбце таблицы допускается больше одной позиции  $(l, s)$  со значением -1, если существуют альтернативные варианты получения соответствующего ИР. В этом случае их число должно совпадать с общим числом процедур, имеющих в пересечении с  $s$ -м столбцом значение -1.

Рассмотрим графовое представление двух основных видов взаимосвязи между элементами таблицы  $T_0$ . Выделим два случая. Пусть столбцу информационного ресурса  $d_s$  соответствует единственная процедура  $u_l$  со значением -1, а входными элементами процедуры  $u_l$  являются  $d_k, d_p, d_m$ , что обозначим в виде  $u_l(d_s) = \{d_k, d_p, d_m\}$  (рис. 2). Этот случай соответствует единственному варианту получения  $d_s$ .

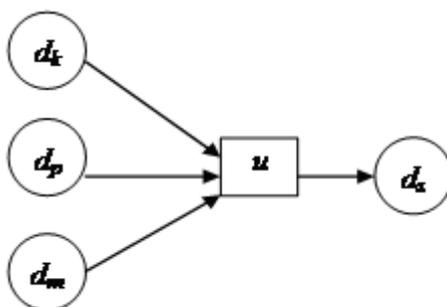
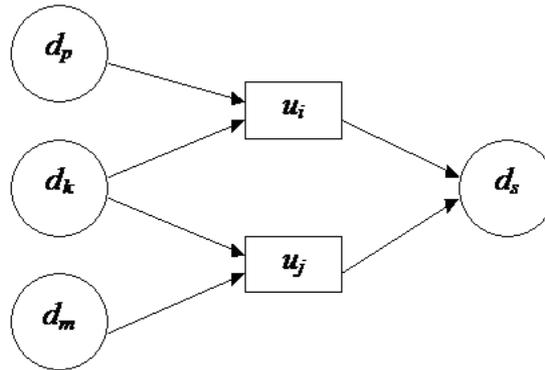


Рис.2. Пример графа для единственного варианта получения информационного ресурса  $d_s$

Пусть столбцу ИР  $d_s$  соответствуют процедуры  $u_l$  и  $u_j$  со значением -1, то есть:

$$u_l(d_s) = \{d_k, d_p\}, \quad u_j(d_s) = \{d_k, d_m\}.$$

Этот случай соответствует наличию двух альтернативных вариантов получения информационного элемента  $d_s$  (рис. 3). В первом случае ИР получается с помощью процедуры  $u_l$ , входными ИЭ которой являются  $d_k, d_p$  во втором – с помощью другой процедуры, имеющей входы  $d_k, d_m$ .



**Рис.3. Пример графа при наличии альтернативных вариантов получения информационного ресурса  $d_s$**

Для проведения основных процедур анализа задач обработки данных требуется получить структурированную матрицу смежности и построить соответствующие им графы. Для формирования структурированной матрицы смежности необходимо преобразовать исходные данные таким образом, чтобы выявить уровни обработки, последовательность используемых процедур и т.д.

Вначале осуществляют переупорядочение ИР в матрице смежности по уровням их обработки. С этой целью используют матрицу достижимости ИР. Под матрицей достижимости  $B_0$  понимается квадратная бинарная матрица, проиндексированная одинаковым образом по обеим осям множеством информационных ресурсов  $D = \{d_s\}, s = \overline{1, S}$ . Запись 1 или 0 в каждой позиции  $(i, j)$  матрицы достижимости соответствует наличию или отсутствию для всех упорядоченных пар ИР  $(d_i, d_j)$  отношения достижимости  $R$ , обладающего свойством транзитивности.

Информационный ресурс  $d_j$  достижим из информационного ресурса  $d_i$  ( $d_i R d_j$ ), если на графе информационных взаимосвязей можно указать направленный путь от вершины  $d_i$  к вершине  $d_j$ , либо  $d_i = d_j$ , то есть если для получения информационного ресурса  $d_j$  используется ИР  $d_i$ .

Матрица достижимости определяется с использованием матрицы смежности  $T_0$  и свойства транзитивности отношения достижимости. При этом заданной матрице достижимости может соответствовать некоторое

множество матриц смежности  $T_0$ , любая из которых имеет одну и ту же матрицу достижимости  $B_0$ . Следовательно, имеется множество графов информационных взаимосвязей, любой из которых содержит необходимую информацию для построения матрицы достижимости.

Процедура выделения уровней обработки с использованием матрицы достижимости  $B_0$  состоит в следующем. Информационный ресурс  $d_i \in D$ , принадлежит множеству элементов верхнего уровня матрицы достижимости, если  $R(d_i) \cap A(d_i) = R(d_i)$ , где  $R(d_i)$  и  $A(d_i)$  – соответственно множество предшествования и достижимости информационного элемента  $d_i$ .

С использованием матрицы достижимости производится итеративное разделение множества ИР на подмножества в соответствии с уровнями их обработки.

Упорядоченному множеству ИР соответствует структурированный граф информационных взаимосвязей, ИР которого разделены на различные уровни.

Обозначим структурированную матрицу смежности  $T_{0C}$ . В этой матрице информационные ресурсы разделены на подмножества в соответствии с уровнями их обработки. Информационные ресурсы, столбцы которых в матрице  $T_{0C}$  не содержат единиц (нулевые столбцы) являются входными элементами задач обработки данных, а информационные ресурсы, соответствующие высшему уровню обработки  $L_1$ , являются выходными ресурсами. Остальные ресурсы являются промежуточными.

Для полного анализа необходимо получение взаимосвязи между информационными ресурсами и процедурами в алгоритме обработки данных. Поэтому на втором этапе анализа, используя информацию, содержащуюся в структурированной матрице смежности и таблице инцидентности задач обработки данных, строится структурированная матрица смежности технологии задач обработки данных [4]. Она отражает существующую взаимосвязь между информационными ресурсами и процедурами в общем алгоритме обработки данных. В этой матрице процедуры упорядочены по уровням их использования, а информационные ресурсы – по уровням их обработки.

Таким образом, рассмотренный метод позволяет выполнять моделирование и анализ алгоритмов обработки информации в разрабатываемой или уже существующей специализированной вычислительной системе. При этом анализ может проводиться с помощью вычислительной техники, так как все его этапы строго формализованы.

### Список литературы

1. Гудман С., Хидетниemi С. Введение в разработку и анализ алгоритмов / пер. с англ. М.: Мир, 1981. 366 с.

2. Типизация разработки модульных систем обработки данных / Мамиконов А.Г., Кульба В.В., Косяченко С.А. М.: Наука, 1989. 165 с.

3. Мамиконов А.Г., Кульба В.В. Синтез оптимальных модульных систем обработки данных. М.: Наука, 1986. 275 с.

4. Методы и модели анализа данных: OPLAP и Data Mining / А.А. Барсегян, М.С. Куприянов, В.В. Степаненко, И.И. Холод. СПб.: БХВ-Петербург, 2004.

*Басалова Галина Валерьевна, канд. техн. наук, доц., [galina\\_basalova@mail.ru](mailto:galina_basalova@mail.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет*

*ANALYSIS OF TRANSFORMATION ALGORITHMS IN INFORMATION-COMPUTING SYSTEMS*

*G.V. Basalova*

*The article considers approaches to the analysis of data processing algorithms in computing systems using mathematical apparatus of Petri nets. The proposed approach allows performing simulations and analysis of information processing algorithms in a developed or existing computer system. The analysis can be performed with the help of computer technology, because it is strictly formalized.*

*Key words: data processing algorithms, modeling of computer systems, Petri nets.*

*Basalova Galina Valerievna, candidate of technical sciences, docent, [galina\\_basalova@mail.ru](mailto:galina_basalova@mail.ru), Russia, Tula, Tula State University*

## **ГИБРИДНЫЙ АЛГОРИТМ СОВМЕСТНОГО ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ И СОСТОЯНИЯ В ЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Аль-Сабул Али Хуссейн Хасан, А.Н. Грачев, А.В. Лукашенко,  
А.А. Фомичев

*Предлагается гибридный алгоритм совместного оценивания параметров и состояния в линейных динамических системах, построенный с использованием генетического алгоритма с резервной элитной популяцией в качестве средства оценивания параметров и линейным дискретным фильтром Калмана в качестве инструмента оценивания состояния. Представлены результаты сравнительного имитационного моделирования предлагаемого гибридного алгоритма с алгоритмом расширенного фильтра Калмана.*

*Ключевые слова: косвенный контроль, идентифицируемость моделей в пространстве состояний, нелинейная фильтрация, генетические алгоритмы, фильтр Калмана*

Задача совместного оценивания параметров и состояния в линейных динамических системах, описываемых уравнениями в пространстве состояний, возникает, например, при необходимости косвенного контроля за неизмеряемыми непосредственно режимными переменными различных технологических процессов. В частности, как показано в работе [1], такая задача имеет место при автоматизации электротермических процессов.

В самом общем случае данная задача решается путем расширения пространства состояний и дальнейшего использования методов нелинейной фильтрации [2 – 3]. Однако известно [2], что такие методы приближенны, и поэтому не гарантируют получения приемлемого результата в различных условиях, кроме того, они достаточно сложны при программной реализации и обладают очень высокими требованиями к вычислительным ресурсам реализующих их компьютеров [3]. Все это значительно усложняет применение такого подхода к решению задачи совместного оценивания в реальном времени.

В конце 70-х начале 80-х годов прошлого века для решения в реальном времени задачи совместного оценивания параметров и состояния в линейных динамических системах были предложены так называемые бутстреп-алгоритмы (bootstrap) [4 – 5]. Основной особенностью таких алгоритмов является разбиение процесса оценивания на две стадии: на первой стадии при фиксированных значениях параметров модели (оставшихся с прошлого шага измерений), как правило, с помощью линейного фильтра Калмана осуществляется оценивание состояния объекта; на второй стадии уже с использованием полученной оценки состояния проводится оценка параметров модели одним из классических методов идентификации, на-

пример, рекуррентным МНК [4] или методом стохастической аппроксимации [5]. Благодаря такому подходу бутстреп-алгоритмы оказываются гораздо проще в программной реализации и вычислительно эффективнее, чем алгоритмы совместного оценивания на основе методов нелинейной фильтрации.

Однако у бутстреп-алгоритмов есть и существенные недостатки. Во-первых, для того, чтобы на этапе идентификации параметров модели можно было использовать классические методы, производится преобразование модели в пространстве состояний к канонической форме. Это существенно сужает возможности использования таких методов в задачах косвенного контроля, в которых модель в пространстве состояний изначально строится и в дальнейшем применяется исключительно в физическом базисе [1]. Переход же от моделей вход-выход (т.е. от канонического базиса) к моделям вход-состояние-выход в физическом базисе, как известно, неоднозначен, а универсальных и корректных методов такого перехода не существует [6]. Во-вторых, даже использование канонических форм не гарантирует отсутствия значительных смещений в оценках параметров модели при реализации бутстреп-алгоритмов. Это объясняется коррелированностью оценки состояния, получаемой на первой стадии алгоритма и входящей в состав регрессоров, с остаточной ошибкой в уравнениях регрессионного типа, используемых для идентификации параметров на второй стадии [7]. Сами авторы бутстреп-алгоритмов, путая оценки состояния с их истинными значениями, этой коррелированности не замечают [4 – 5]. Однако, как убедительно показано в работе [7], бутстреп-алгоритмы в результате оказываются принципиально работоспособными лишь в условиях полного отсутствия шумов, либо при очень низком уровне отношения шум/полезный сигнал.

В работе предлагается гибридный алгоритм совместного оценивания параметров и состояния в линейных динамических системах, построенный по принципу бутстреп-алгоритмов, но состоящий из линейного фильтра Калмана и генетического алгоритма с резервной элитной популяцией (ГА с РЭП) [8] в качестве средства оценивания параметров модели. Такой гибридный алгоритм с одной стороны, будет обладать основными достоинствами бутстреп-алгоритмов (простотой и вычислительной эффективностью), а с другой стороны, не унаследует их недостатки. Объясняется это тем, что для реализации процедуры параметрической идентификации на основе ГА с РЭП нет необходимости отказываться от физического базиса модели в пространстве состояний. Вид идентифицируемой модели в этом случае не играет никакой роли, поскольку идентификация параметров с помощью ГА производится, по сути, методом квазислучайного подбора подходящих решений. Что касается смещенности оценок параметров, то и здесь она не должна возникнуть ни при каком уровне шумов. Во-первых, по той же причине, что ГА является методом подбора и не накладывает

никаких ограничений на вид модели, а во-вторых, потому что в качестве функции пригодности можно использовать нормированный квадрат обновляющего процесса фильтра Калмана, как это делается в гибридных адаптивных алгоритмах трассового сопровождения целей, описанных в работах [9 – 10]. В этом случае, при идентификации параметров оценка состояния, полученная на предыдущем этапе, непосредственно не используется.

Заметим, что у ГА с РЭП, используемого для идентификации параметров, есть еще одно существенное достоинство по сравнению с нелинейными фильтрами и бутстреп-алгоритмами: в нем оценки параметров по определению могут принимать значения только из априори заданного диапазона [8], а не из множества всех действительных чисел. Это повышает устойчивость работы алгоритма и исключает появление физически не интерпретируемых результатов.

Единственным необходимым условием, без соблюдения которого ни один алгоритм совместного оценивания параметров и состояния в линейных динамических системах не будет работать, является условие параметрической идентифицируемости [6, 11], которому изначально должна удовлетворять построенная в пространстве состояний модель объекта. Поскольку, если структура модели такова, что это условие априори не выполняется, то по результатам экспериментальной идентификации может быть получен не единственный набор параметров, минимизирующий заданную функцию потерь, а несколько или даже бесконечное множество таких наборов. В этом случае говорят о локальной или глобальной неидентифицируемости модели [6, 11].

Таким образом, прежде чем использовать любой из алгоритмов совместного оценивания параметров и состояния в системах косвенного контроля, необходимо, руководствуясь качественной и количественной априорной информацией об объекте, построить его модель в физическом базисе и удостовериться в ее параметрической идентифицируемости, например, методами, описанными в работах [11 - 12].

**Постановка задачи.** Модель объекта представляется следующими разностными уравнениями:

$$x(k+1) = \Phi(\theta)x(k) + \Gamma(\theta)u(k) + w(k), \quad (1)$$

$$y(k+1) = H(\theta)x(k+1) + v(k+1), \quad (2)$$

где  $x(k) \in R^n$  – вектор состояния системы;  $y(k) \in R^m$  – вектор наблюдаемых переменных;  $u(k) \in R^p$  – вектор измеряемых входных воздействий (управлений);  $\Phi(\theta) \in R^{n \times n}$ ,  $\Gamma(\theta) \in R^{n \times p}$ ,  $H(\theta) \in R^{m \times n}$  – матрицы состояния, управления и наблюдения, соответственно;  $w(k) \in R^n$ ,  $v(k) \in R^m$  – бе-

лые гауссовские случайные последовательности с нулевыми математическими ожиданиями и ковариационными матрицами:  $Q(\theta)$ ,  $R(\theta)$ ;  $k \in \{\dots, -1, 0, 1, \dots\}$  – номер дискретного момента времени.

Параметризация модели (1) – (2) формально может быть осуществлена некоторым вектором параметров  $\theta(k)$ , включающим в себя все априори неизвестные элементы матриц  $\Phi$ ,  $\Gamma$ ,  $H$ ,  $Q$  и  $R$ . При этом размещение априори известных и неизвестных параметров в этих матрицах может быть задано, например [3], с помощью специальных матриц структуры  $S^\Phi$ ,  $S^\Gamma$ ,  $S^H$ ,  $S^Q$ ,  $S^R$  имеющих соответствующие размерности и элементы, определяемые следующим образом:

$$s_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{если соответствующий параметр априори известен,} \\ 1, & \text{если соответствующий параметр априори неизвестен,} \end{cases} \quad (3)$$

где  $s_{ij}$  – произвольный элемент любой из матриц:  $S^\Phi$ ,  $S^\Gamma$ ,  $S^H$ ,  $S^Q$ ,  $S^R$ .

Предполагается, что параметризованная вектором  $\theta(k) \in R^l$  исходная модель (1)–(2) удовлетворяет условиям полной наблюдаемости и управляемости, а также условиям априорной параметрической идентифицируемости [6, 11, 12]. Известными также считаются статистические характеристики начальных условий  $x(0)$ , а также диапазоны варьирования неизвестных параметров  $\theta(0)$ . Шумы  $\omega(k)$  и  $\nu(k)$ , а также начальное состояние  $x(0)$  считаются некоррелированными между собой.

Требуется получить оценку текущего значения вектора состояния  $x(k)$  и неизвестных параметров  $\theta(k) \in R^l$  модели (1)–(2) по наблюдаемым последовательностям входных и выходных сигналов

$$Y_0^{k+1} = \{y(j), 0 \leq j \leq k+1\} \text{ и } U_0^k = \{u(j), 0 \leq j \leq k\}. \quad (4)$$

**Гибридный алгоритм совместного оценивания на основе фильтра Калмана и ГА с РЭП.** На каждом шаге измерений  $(k+1)$  для текущих значений оценок параметров (т.е. хромосом текущего поколения ГА с РЭП [8]  $\theta^i$ , где  $i=1 \dots NIND$ ) по известным выражениям Калмановского фильтра вычисляются упрежденные (априорные) оценки вектора состояния (одношаговое предсказание) и его ковариации, а также вектор обновляющего процесса.

1. Одношаговое предсказание вектора состояния

$$\tilde{x}_p^i(k+1) = \Phi(\theta^i) \tilde{x}_s^i(k) + \Gamma(\theta^i) u(k). \quad (5)$$

2. Одношаговое предсказание измерения выхода

$$\tilde{y}^i(k+1) = H(\theta^i) \tilde{x}_p^i(k+1). \quad (6)$$

3. Ошибка предсказания измерения выхода (обновляющий процесс)

$$r^i(k+1) = y(k+1) - \tilde{y}^i(k+1). \quad (7)$$

4. Ковариация одношагового предсказания вектора состояния

$$P_p^i(k+1) = \Phi(\theta^i)P_s(k)\Phi^T(\theta^i) + Q(\theta^i). \quad (8)$$

После чего вычисляется функция приспособленности  $e^i(k+1)$  каждой хромосомы текущего поколения, которая затем подвергается минимизации при помощи ГА с РЭП [8].

5. Ковариация обновляющего процесса:

$$S^i(k+1) = H(\theta^i)P_p^i(k+1)H(\theta^i)^T + R(\theta^i). \quad (9)$$

6. Нормированная квадратичная ошибка предсказания выхода (обновляющего процесса)

$$e^i(k+1) = r^{iT}(k+1)S^{i-1}(k+1)r^i(k+1), \quad (10)$$

В результате наилучшая хромосома, полученная после завершения работы ГА с РЭП, минимизирующая (10), принимается за вектор текущих оценок параметров модели объекта ( $\theta^*$ ), которые затем используются при вычислении окончательных сглаженных (апостериорных) оценок вектора состояния в линейном фильтре Калмана (ЛФК).

7. Коэффициент усиления фильтра Калмана

$$K(k+1) = P_p^*(k+1)H^T(\theta^*)\{H(\theta^*)P_p^*(k+1)H^T(\theta^*) + R(\theta^*)\}^{-1}. \quad (11)$$

8. Сглаженные оценки вектора состояния

$$\tilde{x}_s(k+1) = \tilde{x}_p^*(k+1) + K(k+1)r^*(k+1). \quad (12)$$

9. Ковариация сглаженной оценки вектора состояния

$$P_s(k+1) = \{I - K(k+1)H(\theta^*)\}P_p^*(k+1). \quad (13)$$

В качестве начальных условий работы приведенного выше алгоритма должны быть заданы начальная оценка вектора состояния  $\tilde{x}_s(0)$ , а также ковариация этой оценки  $P_s(0)$ . Что касается ГА с РЭП, то для него задаются обычные начальные для любого ГА параметры плюс размер элитной популяции и диапазоны допустимых значений идентифицируемых параметров.

Заметим, что шаги 1 – 6 данного алгоритма выполняются при вычислении функции приспособленности любой особи (хромосомы) ЭП или РЭП. Шаги же 7 – 9 выполняются только на этапе получения оценки состояния и только с учетом выбора наиболее приспособленной хромосомы, т.е. набора идентифицируемых параметров.

**Результаты имитационного моделирования процесса совместного оценивания параметров и состояния с использованием гибридного алгоритма.** Для имитационного моделирования процесса совместного

оценивания параметров и состояния предложенным выше алгоритмом (5) – (13) использовалась модель вида (1) – (2), фактические параметры которой были заданы следующими матрицами:

$$\Phi = \begin{bmatrix} 0.752 & 0.000 & -0.055 \\ -0.095 & 0.655 & 0.166 \\ 0.271 & 0.161 & 0.544 \end{bmatrix}; \quad \Gamma = \begin{bmatrix} 1.1 & 2.0 & 0.5 \\ 1.8 & 1.2 & 1.2 \\ 3.0 & 2.3 & 0.8 \end{bmatrix}; \quad H = \begin{bmatrix} 0.0 & 1.0 & 0.0 \\ 1.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 1.0 \\ 1.0 & 1.0 & 0.0 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Неизвестными, т.е. подлежащими идентификации, параметрами в данной модели считались все элементы матрицы состояний  $\Phi$ , что ранее обозначалось, как  $\Phi(\theta)$ . Все элементы других матриц ( $\Gamma$  и  $H$ ) напротив полагались априори точно известными константами. Легко показать [3, 11], что такая модель обладает всеми необходимыми свойствами для ее использования в вычислительном эксперименте по исследованию алгоритмов совместного оценивания параметров и состояний: она устойчива, полностью управляема и наблюдаема по Калману, а также глобально идентифицируема.

Для простоты шумы в состояниях и измерениях считались некоррелированными случайными сигналами, нормально распределенными с нулевым средним и единичной ковариационной матрицей:

$$w(k) \rightarrow N(0, Q), \quad Q=I; \quad v(k) \rightarrow N(0, R), \quad R=I. \quad (15)$$

Измеряемое входное воздействие также моделировалось с помощью нормально распределенного случайного сигнала с нулевым средним и единичной ковариационной матрицей:

$$u(k) \rightarrow N(0, U), \quad U=I. \quad (16)$$

В качестве начальных условий для оценки вектора состояний были приняты

$$\tilde{x}_s(0) = [0 \ 0 \ 0]^T; \quad P_s(0) = I, \quad (17)$$

где  $I$  – единичная матрица соответствующей размерности.

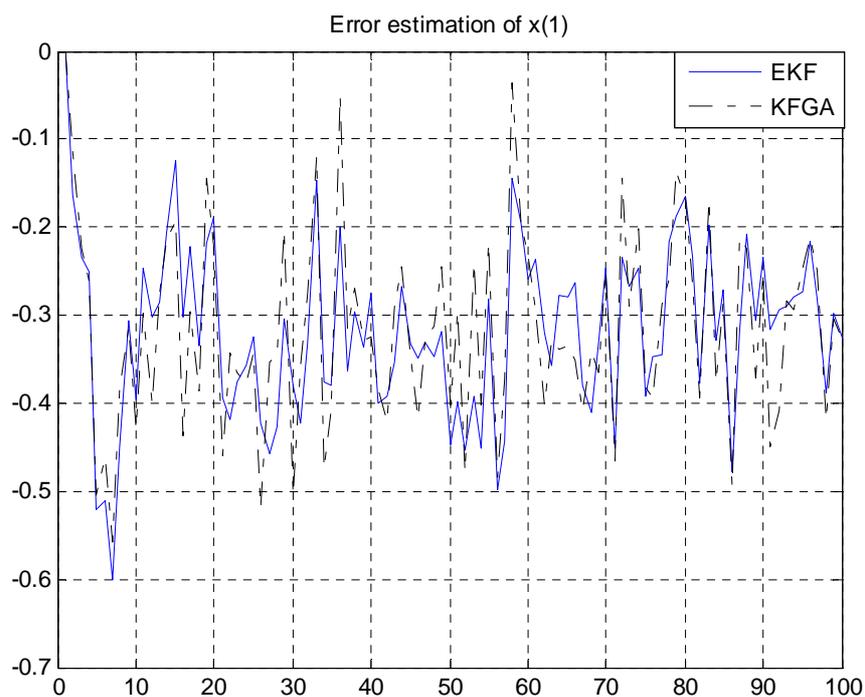
Параметры ГА с РЭП [8] были заданы следующим образом: NIND=20, MAXELIT=20, MAXGEN=100,  $\varepsilon = 10^{-3}$ ,  $P_c=0.9$ ,  $P_m=0.04$ .

Наконец, диапазоны возможного варьирования всех идентифицируемых параметров также для простоты были заданы одинаковыми:

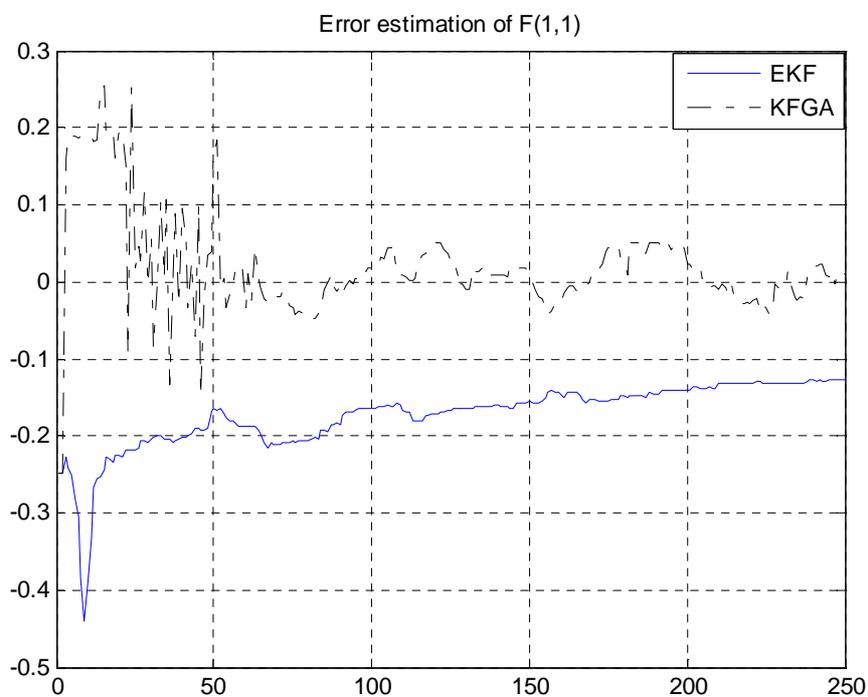
$$-1.0 \leq \theta_l \leq 1.0, \quad (18)$$

где  $l=1 \dots 9$  – номер элемента в векторе идентифицируемых параметров  $\theta$ .

На рис. 1 показаны ошибки оценок первого из трех элементов вектора состояния, полученные в ходе вычислительного эксперимента по совместному оцениванию с использованием классического РФК (ЕКФ) [2, 3, 6] и предложенного гибридного алгоритма (KFGA). На рис. 2 показаны ошибки оценок одного из параметров (элементов матрицы состояний  $\Phi$ ), также полученные в ходе данного вычислительного эксперимента.



**Рис. 1. Ошибки оценок элемента вектора состояний, полученные с помощью классического РФК (EKF) и предлагаемого гибридного алгоритма (KFGA)**



**Рис. 2. Ошибки оценок первого элемента матрицы состояний  $\Phi$ , полученные с помощью классического РФК (EKF) и предлагаемого гибридного алгоритма (KFGA)**

В таблице приведены основные статистические характеристики (среднее значение или смещение, а также СКО) полученных в ходе вычислительного эксперимента оценок параметров и состояний соответственно для классического РФК и предложенного гибридного алгоритма.

**Статистические характеристики полученных  
в ходе вычислительного эксперимента оценок параметров  
и состояний**

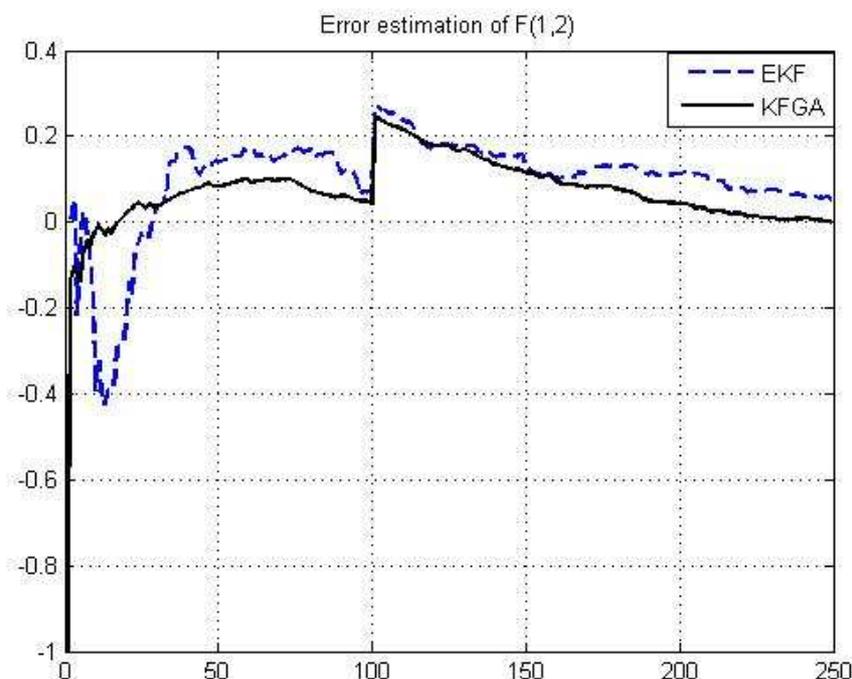
Состояние / параметр	Классический РФК (ЕКФ)		Гибридный алгоритм (KFGA)	
	Смещение $\bar{x}_{ЕКФ}$	СКО $\sigma_{ЕКФ}$	Смещение $\bar{x}_{KFGA}$	СКО $\sigma_{KFGA}$
$x_1$	-0,335	0,0814	-0,339	0,102
$x_2$	-0,339	0,0741	-0,328	0,0953
$x_3$	-0,488	0,108	-0,489	0,133
$f_{11}$	-0,134	0,0374	-0,0185	0,0596
$f_{12}$	-0,061	0,0245	-0,066	0,284
$f_{13}$	0,0643	0,0259	0,0141	0,247
$f_{21}$	-0,159	0,0375	-0,0509	0,0596
$f_{22}$	-0,124	0,0245	-0,0277	0,284
$f_{23}$	0,126	0,026	0,000184	0,247
$f_{31}$	-0,03	0,0374	-0,0528	0,0597
$f_{32}$	0,0542	0,0245	-0,0368	0,284
$f_{33}$	-0,0722	0,0259	0,00864	0,247

Из рис. 1, а также таблицы следует, что оценки состояний, полученные с использованием предложенного гибридного алгоритма и классического РФК, практически не отличаются: они имеют почти одинаковое смещение относительно истинных значений состояний и примерно на 20 % большее СКО. Что касается оценок параметров (см. рис. 2 и таблицу), то в этом случае некоторое превосходство будет за гибридным алгоритмом: его оценки, как правило, имеют меньшее смещение при немного большем СКО. Кроме того, из рис. 2 следует, что оценки параметров у гибридного алгоритма сходятся к истинным значениям, как правило, значительно быстрее.

Второй вычислительный эксперимент по совместному оцениванию параметров и состояния модели вида (1) – (2) при заданных условиях (14) – (18) производился с учетом нестационарности одного из оцениваемых параметров модели. Причем рассматривались два вида нестационарности: резкое скачкообразное изменение или плавный дрейф.

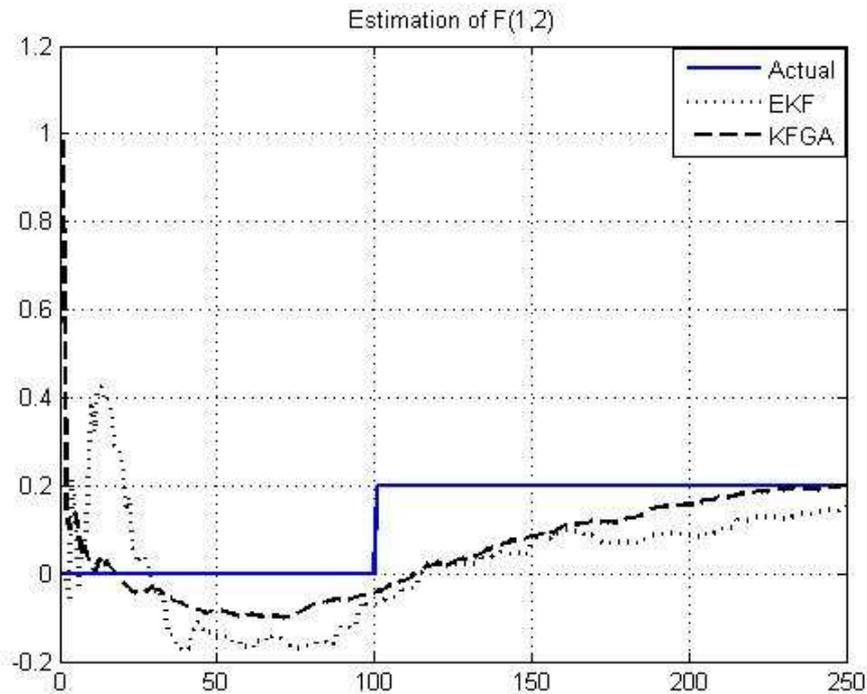
Необходимость таких исследований можно объяснить тем, что хорошая работа предлагаемого гибридного алгоритма в условиях нестационарности объекта очень важна при решении задач косвенного контроля в электротермии. Поскольку вероятность дрейфа параметров в таких объектах весьма высока и может быть связана с изменением химического или гранулометрического состава шихтовых материалов, а также с изменением характеристик футеровки электрических печей в процессе их эксплуатации [1, 12]. Возможно в электротермических агрегатах также и скачкообразное изменение параметров, например, при случающихся эпизодически обвалах шихты.

Сначала был проведен эксперимент, в котором в момент времени  $k = 100$  параметр идентифицируемого объекта  $f_{12}$  резко изменял свое значение с 0 на 0,2 (см. формулы (14)). Ошибки оценивания данного нестационарного параметра матрицы  $\Phi$  с использованием классического РФК и предлагаемого гибридного алгоритма представлены на рис. 3. На рис. 4 показан характер изменения оценок нестационарного параметра  $f_{12}$  обоими сравниваемыми алгоритмами.

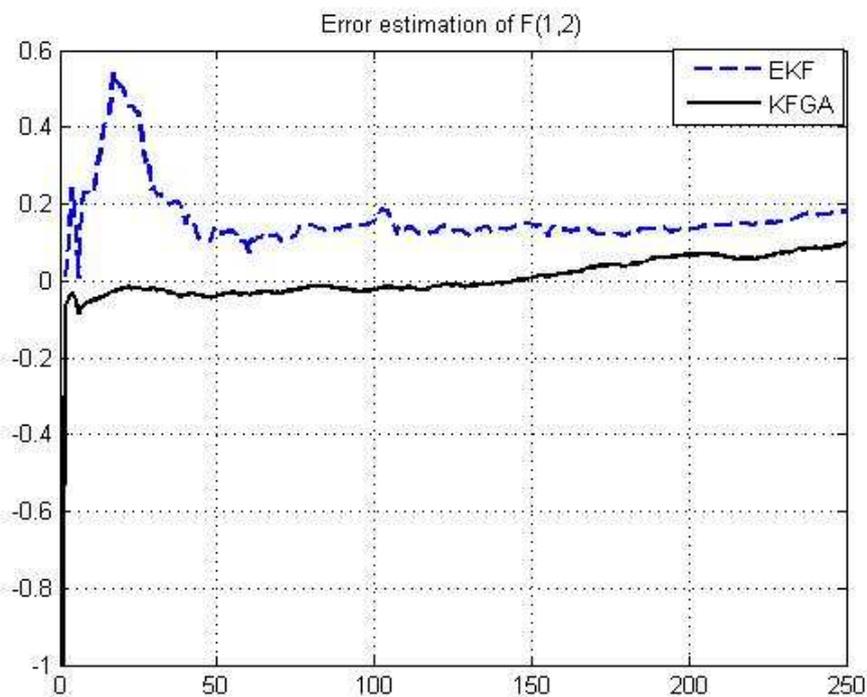


**Рис. 3. Ошибки оценок скачкообразно изменившегося параметра матрицы состояний  $\Phi$ , полученные с помощью классического РФК (EKF) и предлагаемого гибридного алгоритма (KFGA)**

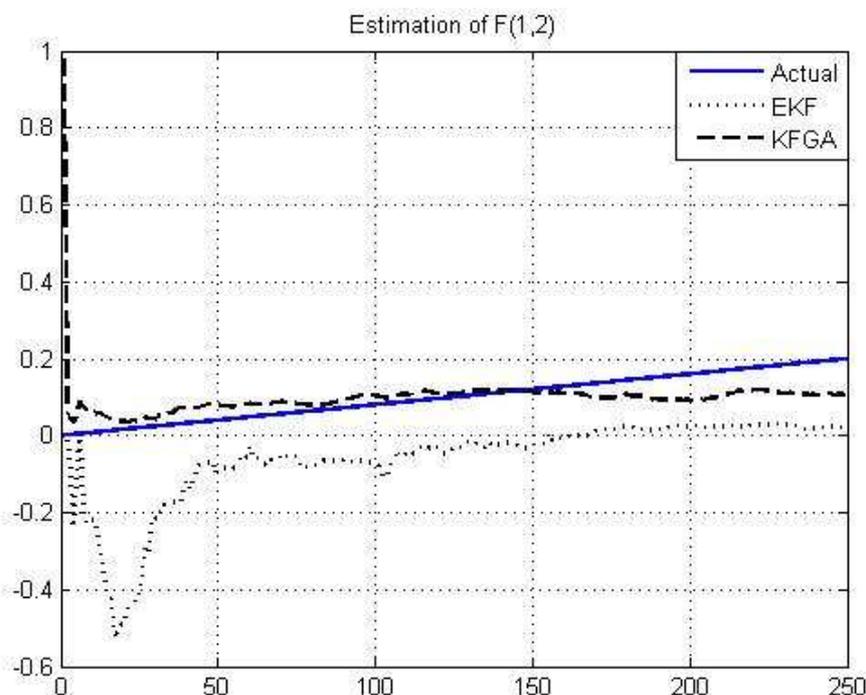
Результаты аналогичных исследований, произведенных при плавном изменении параметра объекта  $f_{12}$  от 0 до 0,2 по закону  $f_{12}(t) = 0,2t / 250$ , представлены на рис. 5 и 6.



**Рис. 4. Характер изменения оценок скачкообразно изменившегося параметра матрицы состояний  $\Phi$ , полученных с помощью классического РФК (EKF) и предлагаемого гибридного алгоритма (KFGA)**



**Рис. 5. Ошибки оценок плавно изменяющегося параметра матрицы состояний  $\Phi$ , полученные с помощью классического РФК (EKF) и предлагаемого гибридного алгоритма (KFGA)**



**Рис. 6. Характер изменения оценок плавно изменяющегося параметра матрицы состояний  $\Phi$ , полученных с помощью классического РФК (EKF) и предлагаемого гибридного алгоритма (KFGA)**

В целом, результаты оценивания обоих типов нестационарных объектов с использованием предлагаемого гибридного алгоритма следует признать удовлетворительными и превосходящими аналогичные результаты классического РФК.

### Список литературы

1. Лукашенко А.В., Грачев А.Н., Фомичев А.А. Информационная система контроля электроэнергетических процессов в электропечах на основе свойств электрической дуги // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 9. Ч. 1. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. С. 107 – 115.
2. Сейдж, Э.П., Мелса Дж.Л. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. М.: Связь, 1976. 496 с.
3. Грачев А.Н., Шурыгин С.В. Методика синтеза итерационных алгоритмов совместного оценивания параметров и состояния линейных дискретных систем // Труды VII Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» – SICPRO'08. М., 2008. С. 204 – 219.
4. El-Sherief H., Sinha N.K. Bootstrap estimation of parameters and states of linear multivariable systems // IEEE Trans. On Automat. Contr. 1979. V. AC-24. №2. P. 340 – 343.

5. El-Sherief, H State and parameter estimation of linear stochastic multivariable sampled data systems // IEEE Trans. On Systems, Man and Cybernetics, 1984. V. SMC-14. №6. P. 911 – 919.

6. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. М.: Наука, 1991. 432 с.

7. Ahmed M.S. On bootstrap estimation of system parameters and states // IEEE Trans. On Automat. Contr, 1983. V. AC-28. №7. P. 805-806.

8. Аль-Сабул Али Хуссейн Хасан, Грачев А.Н. Быстрый генетический алгоритм для приложений реального времени // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. Вып. 2. С. 71 – 79.

9. Аль-Сабул Али Хуссейн Хасан, Грачев А.Н. Адаптивный алгоритм Калмановской фильтрации для трассового сопровождения целей с использованием быстрого генетического алгоритма // Материалы XII Всероссийского совещания по проблемам управления (Россия, Москва, Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова РАН, 16 – 19 июня 2014 г.). С. 9092 – 9103.

10. Ali Hussein Hasan, Grachev Aleksandr N. Target Tracking By Adaptive EKF Using Fast Genetic Algorithm // International Journal of Information Engineering (IJIE). 2014. Vol. 4. Iss. 2, Jun. P. 46 – 52.

11. Авдеенко Т.В., Горский Г.В. Построение динамических моделей в пространстве состояний. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. 285 с.

12. Грачев А.Н., Фомичев А.А., Шурыгин С.В. Анализ параметрической идентифицируемости моделей одного класса симметричных динамических объектов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. Вып. 4. С. 140 – 147.

*Аль-Сабул Али Хуссейн Хасан, канд. техн. наук, [ali\\_hussen\\_hassan@yahoo.com](mailto:ali_hussen_hassan@yahoo.com), Ирак, Дих-Кар, Дих-Карский Университет,*

*Грачев Александр Николаевич, канд. техн. наук, доц., [ga150161@mail.ru](mailto:ga150161@mail.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

*Лукашенко Анатолий Викторович, д-р техн наук, проф., [luav50@mail.ru](mailto:luav50@mail.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

*Фомичев Александр Александрович, д-р техн наук, проф., [aleksandr.fomichev.42@mail.ru](mailto:aleksandr.fomichev.42@mail.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет*

*HYBRID SIMULTANEOUS ESTIMATION OF STATES AND PARAMETERS ALGORITHM  
IN LINEAR DYNAMIC SYSTEMS*

*Al-Sabool Ali Hussein Hasan, A.N. Grachev,  
A.V. Lukashenkov, A.A. Fomichev*

*Simultaneous estimation of states and parameters using Extended Kalman filter need an approximate linearized equation for prediction of the error statistics, which lead to poor error covariance updates and in some cases unstable growth. In this work, we introduce a simultaneous on-line estimation of states and parameters using linear Kalman filter (KF) and fast genetic algorithm (GA), where the states are estimated by the KF and the parameters are estimated by the fast GA. The simulation results showed satisfactory results in both states and parameters estimation accuracy.*

*Key words: Simultaneous states and parameters estimation; Kalman filter; fast genetic algorithm.*

*Al-Sabool Ali Hussein Hasan, candidate of technical sciences, [ali\\_hussen\\_hassan@yahoo.com](mailto:ali_hussen_hassan@yahoo.com), Iraq, ThiQar, Al-Rifai, ThiQar University,*

*Grachev Aleksandr Nikolaevich, candidate of technical sciences, docent, [ga150161@mail.ru](mailto:ga150161@mail.ru), Russia, Tula, Tula State University,*

*Lukashenkov Anatoly Viktorovich, doctor of technical sciences, professor, [luav50@mail.ru](mailto:luav50@mail.ru), Russia, Tula, Tula State University,*

*Fomichev Aleksandr Aleksandrovich, doctor of technical sciences, professor, [aleksandr.fomichev.42@mail.ru](mailto:aleksandr.fomichev.42@mail.ru), Russia, Tula, Tula State University*

УДК 004.932

## **УСТОЙЧИВОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ЛАДОНИ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ О ЦВЕТЕ И ФОРМЕ**

А.В. Копылов, О.С. Середин, О.А. Кушнир, И.А. Грачева, А.О. Ларин

*Предлагается метод детектирования кисти руки в видеопотоке на основе одноклассового пиксельного классификатора, вероятностной гамма-нормальной модели и скелетного описания. Первоначальная сегментация участков кожи выполняется с помощью модифицированной версии одноклассового классификатора, обученного фрагментом изображения части лица и не требующего формирования обучающей выборки для построения модели фона. Результатом классификации является степень принадлежности к классу интереса. Улучшение первоначальной сегментации осуществляется за счет согласования локальных решений и привлечения информации о структуре изображения. Для этого применяется специальный фильтр со свойствами переноса структуры на основе вероятностной гамма-нормальной модели. Для принятия окончательного решения о том, что найденный фрагмент является изображением кисти человека, используется метод сравнения бинарных изображений на основе их скелетов.*

*Ключевые слова: детектирование руки, одноклассовый классификатор, попиксельная классификация, метод описания данных опорными векторами (Support Vector Data Description, SVDD), фильтр передающий структуру, скелет.*

**Введение.** Точное и надежное детектирование изображения кисти руки человека в видеопотоке является необходимым и критически важным этапом при построении простых в использовании систем бесконтактного

взаимодействия человека и технических устройств, например, в задачах распознавания жестов или биометрической идентификации. Несмотря на заметный прогресс в этой области, остается еще целый ряд нерешенных проблем, например, наличие изменений фона и освещенности сцены, изменение формы кисти руки в процессе движения.

Можно выделить три основных подхода к решению данной задачи: подход, основанный на использовании алгоритмов вычитания фона [1 – 3], подход, основанный на цветовой сегментации участков кожи [4 – 8] с последующим детектированием ладони, часто с привлечением дополнительной информации о форме ладони [9, 10], а также подход на основе данных о глубине сцены [11]. При решении задачи с использованием алгоритмов вычитания фона необходимо, чтобы фон оставался неизменным в рамках выбранной модели. Это является серьезным недостатком при обработке видео потока и сильно сужает круг применимости алгоритма до задач, в которых данное ограничение допустимо. Методы сегментации, используемые во втором подходе, основаны на параметрическом представлении области цветового пространства (RGB, HSV, YCbCr), соответствующей цвету кожи. В частности, используются простые пороговые правила [5, 6, 12], либо анализ главных компонент [7, 13], либо модели смеси нормальных распределений [4, 14]. Однако, при съемке в реальных условиях, в результате изменения экспозиции, конфигурация области, соответствующей цвету кожи, внутри цветового пространства может существенно меняться. Кроме того, индивидуальные особенности цвета кожи также приводят к необходимости адаптивной перестройки цветовой модели. Для повышения качества сегментации часто используются геометрические особенности кисти руки. Контур ладони может быть получен путем применения операторов обнаружения границ. Предполагается, что объединение знаний о форме, текстуре и цветовых особенностях изображения кисти может существенно повысить качество детектирования [9]. Существуют методы, использующие информацию об особенностях строения кисти руки, например, кончики пальцев [15]. Распространенным признаком кончиков пальцев является кривизна соответствующего контура [16]. Метод сравнения с эталоном является еще одним методом, который часто применяется для обнаружения пальцев. Эталонами могут служить изображения как кончиков пальцев [17], так и пальцев целиком [18]. Тем не менее, метод сравнения с эталоном имеет ряд недостатков: 1) очень большой объем вычислений; 2) он не инвариантен к масштабированию или повороту; 3) внешний вид кисти руки может значительно меняться в соответствии с 22-мя степенями свободы, что делает выбор эталона очень трудной задачей [19]. Использование дополнительной информации о глубине сцены отчасти позволяет преодолеть эти недостатки [11]. Однако такой подход предполагает, что между ладонью и камерой нет других объектов, а также требует наличия дополнительного оборудования.

Для адаптивной коррекции цветовой модели кожи на кадре видеопотока с целью компенсации изменения освещенности мы предлагаем использовать фрагмент лица человека, находящегося перед видеокамерой, поскольку лицо легко детектируется методом Виолы-Джонса [20]. Похожая идея сегментации описывается в статье [12], однако в ней используются упрощенная модель описания цвета кожи при помощи нормального распределения.

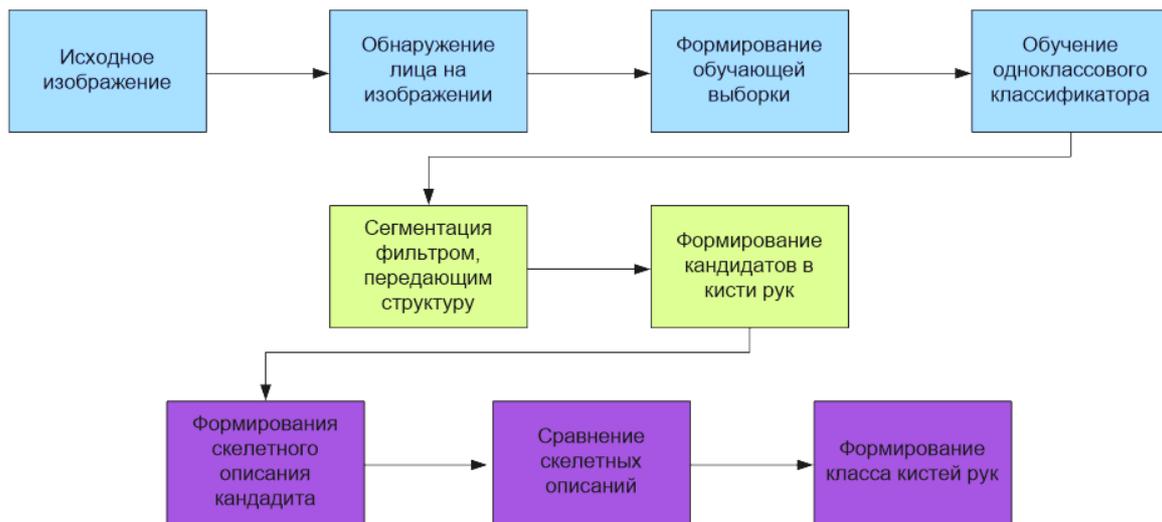
Мы используем модифицированную версию одноклассового пиксельного классификатора [21], не требующего формирования обучающей выборки для построения модели фона. Преимущество использования одноклассового классификатора вместо статического порога заключается в том, что интересующая нас цветовая область в цветовом пространстве описывается не кубоидами, цилиндрами или эллипсоидами, а более сложной геометрической формой за счет использования метода описания данных опорными векторами (Support Vector Data Description, SVDD) [22]. Это позволяет минимизировать ошибочную классификацию пикселей, соответствующих цвету кожи. Обучение классификатора происходит в реальном времени, т.е. практически на каждом кадре видеопотока.

Для согласования локальных решений, принятых одноклассовым классификатором, мы применили байесовский подход на основе специальной гамма-нормальной вероятностной модели [23, 24], позволяющей задавать и корректировать вероятностные отношения между первичными результатами классификации каждого пикселя в отдельности с учетом структуры исходного изображения.

Стоит отметить, что одним из популярных подходов к детектированию кисти на изображении на сегодняшний день является метод Виолы-Джонса [20, 25, 26]. Учитывая, что кисть имеет множество степеней свободы, задача формирования подходящей обучающей выборки становится крайне нетривиальной. Например, в работе [26] обучающая выборка составила 5013 изображений рук, 2504 из которых использовались для обучения классификатора и 2509 для тестирования.

Предлагаемый нами подход к детектированию формы ладони основан на сравнении скелетов бинарных растровых изображений [27]. Достоинством метода является его инвариантность к масштабированию и повороту бинарного образа детектируемого объекта. Общая схема построения детектора кисти руки на изображении представлена на рис. 1.

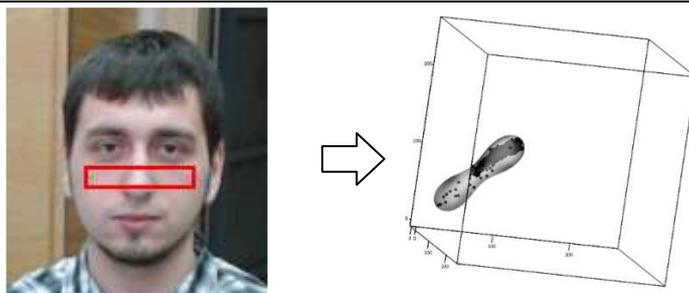
Результатом работы перечисленных выше методов будет являться бинарная маска, соответствующая области ладони в текущем кадре видеопотока вместе со скелетным описанием ее формы, что позволит в дальнейшем решать задачи по распознаванию жестов или биометрической идентификации.



*Рис. 1. Общая схема построения детектора кисти руки*

**Параметрическое представление кожи в цветовом пространстве с помощью одноклассового классификатора.** Подход на основе цветовой сегментации кожи требует построения модели распределения пикселей, соответствующих фрагментам изображения кожи ладони, в цветовом пространстве. Необходимо принять во внимание тот факт, что при съемке в реальных условиях в результате изменения освещенности конфигурация области, соответствующей цвету кожи, внутри цветового пространства может существенно меняться. Кроме того, индивидуальные особенности цвета кожи требуют адаптивной перестройки цветовой модели для изображений разных людей. Чтобы учесть данные изменения, мы используем модифицированную версию одноклассового пиксельного классификатора [21], не требующего формирования обучающей выборки для построения модели фона. Преимущество использования одноклассового классификатора вместо статического порога заключается в том, что интересующая нас область в цветовом пространстве описывается не кубоидами, цилиндрами или эллипсоидами, а более сложной геометрической формой [28–31] за счет использования метода SVDD [22]. Это позволяет минимизировать ошибочную классификацию пикселей, соответствующих цвету кожи. Второе преимущество заключается в том, что вычислительная сложность метода позволяет проводить обучение классификатора в реальном времени.

В качестве обучающей выборки пикселей для одноклассового цветового классификатора предлагается использовать прямоугольную область лица человека. Каждому пикселю прямоугольной области будет соответствовать точка в цветовом пространстве RGB (рис. 2).



**Рис. 2. Фрагмент изображения для обучения одноклассового классификатора и его отображение в цветное пространство RGB**

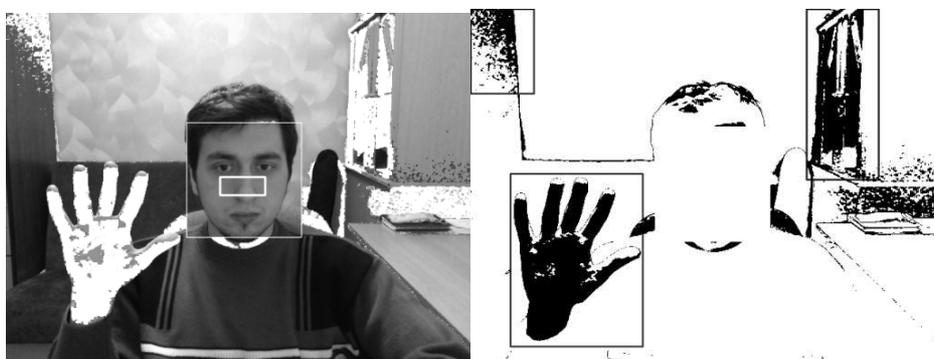
Поиск лиц на изображениях в целом является решенной задачей, и этот этап не вызывает затруднений. В данном случае авторы опираются на реализацию метода Виолы-Джонса из библиотеки алгоритмов компьютерного зрения OpenCV, демонстрирующую эффективные результаты [32]. Параметры положения обучающего фрагмента внутри области, найденной алгоритмом Виолы-Джонса лица, определяются на основе исследования [32]. В частности, расстояние от верхнего края фрагмента лица определено как 0.49 от размера области лица, а высота и ширина обучающей области как 0.11 и 0.6 соответственно. Именно эта область, расположенная между глазами и кончиком носа, наименее подвижна и не подвержена изменениям из-за присутствия усов, бороды, очков, прически, макияжа.

Такой подход позволяет оперативно оценивать изменение цвета кожи на каждом кадре, но при этом необходимо, чтобы на сцене присутствовало лицо (или оно было определено алгоритмом поиска лиц). В противном случае можно воспользоваться заранее обученной общей моделью. После обучения классификатора становится возможным очень быстро принять решение о схожести каждого пикселя изображения на пиксели, присутствующие в обучающей выборке. Это достигается путем проверки принадлежности каждого пикселя изображения области, в большей или меньшей степени охватывающей обучающую выборку. Размер области охвата зависит от параметра Гауссова ядра, используемого в методе SVDD [22].

**Сегментация на основе параметрического представления цвета кожи.** Сегментация изображения непосредственно на основе параметрического представления цвета кожи методом SVDD не обладает достаточной точностью и надежностью (рис. 3), поскольку использует лишь индивидуальные свойства пикселей в цветовом пространстве и не принимает во внимание пространственные отношения между соседними пикселями, а также структуру однородных областей изображения.

Хорошо известные методы сегментации, как например [33], требуют построения модели фона и, кроме того, обладают слишком высокой вычислительной сложностью, чтобы применяться для обработки в реаль-

ном времени. Вместо них используется новый класс фильтров со свойствами передачи структуры, которые появились в литературе сравнительно недавно [34, 35]. Основная идея фильтров со свойствами передачи структуры заключается в извлечении структуры из так называемого управляющего изображения и дальнейшей фильтрации исходного изображения в соответствии с этой структурой. Билатеральный фильтр (Bilateral Filter) [36] и наведенный фильтр (Guided Filter) [34] в настоящее время занимают лидирующие позиции среди фильтров данного класса. Основным недостатком билатерального фильтра и наведенной фильтрации является наличие артефактов, которые визуально проявляются в виде ореолов по краям объектов. Наличие таких артефактов характерно для всех фильтров с конечной импульсной характеристикой в соответствии с эффектом Гиббса. Попытки преодолеть этот недостаток [35] с использованием взвешенных усредненных глобальных параметров соответствующей модели приводят к выходу времени обработки за пределы реального времени. В данной работе используется альтернативный Байесовский подход, описанный в работах [23, 24] и опирающийся на специальную модель марковского случайного поля, называемую гамма-нормальной моделью [37]. Такая модель позволяет принимать во внимание структуру, которая извлекается из так называемого «управляющего» изображения с помощью установки соответствующих вероятностных отношений между элементами исходного изображения и результата фильтрации.



**Рис. 3. Результат цветовой сегментации с использованием одноклассового классификатора**

Пусть  $Y = (y_t, t \in T)$  – исходный массив данных, определенный на подмножестве элементов двумерного дискретного пространства  $T = \{t = (t_1, t_2) : t_1 = 1, \dots, N_1, t_2 = 1, \dots, N_2\}$ , и пусть массив  $X = (x_t, t \in T)$ , определенный на том же множестве аргументов, играет роль искомого результата обработки. Будем рассматривать  $Y$  и  $X$  как наблюдаемую и скрытую компоненты двухкомпонентного случайного поля  $(Y, X)$ . Вероятностные свойства двухкомпонентного случайного поля  $(X, Y)$  полностью опреде-

ляются условной плотностью распределения  $\Phi(Y | X)$  исходного массива данных  $Y = (y_t, t \in T)$  относительно массива  $X = (x_t, t \in T)$  и априорной плотностью распределения  $\Psi(X)$  скрытой компоненты  $X = (x_t, t \in T)$ . Пусть совместная условная плотность  $\Phi(Y | X)$  является нормальной:

$$\Phi(Y | X, \delta) = \frac{1}{\delta^{(N_1 \cdot N_2)/2} (2\pi)^{(N_1 \cdot N_2)/2}} \exp\left(-\frac{1}{2\delta} \sum_{t \in T} (y_t - x_t)^2\right), \quad (1)$$

где  $\delta$  - дисперсия шума наблюдения, являющаяся неизвестной.

Априорная плотность  $\Psi(X)$  скрытой компоненты  $X = (x_t, t \in T)$  также принята нормальной. Но дисперсия  $r_t$  скрытых переменных может быть различной в разных точках  $t \in T$  скрытого поля  $X$ . Удобно выбрать  $r_t, t \in T$  пропорционально дисперсии шума наблюдения  $r_t = \lambda_t \delta$ . Коэффициенты пропорциональности  $\Lambda = (\lambda_t, t \in T)$  могут служить для гибкого задания структуры вероятностных связей между элементами скрытого поля  $X$ . В соответствии с принятыми предположениями получим несобственную плотность:

$$\Psi(X | \Lambda, \delta) \propto \frac{1}{\left(\prod_{t \in T} \delta \lambda_t\right)^{1/2} (2\pi)^{(N_1 \cdot N_2)/2}} \times \exp\left(-\frac{1}{2} \sum_{t', t'' \in V} \frac{1}{\delta \lambda_{t'}} (x_{t'} - x_{t''})^2\right), \quad (2)$$

где  $V$  представляет собой граф смежности элементов изображения, имеющий вид простой решетки. Наконец, примем, что величины, обратные коэффициентам  $1/\lambda_t$ , априорно независимы и имеют одинаковое гамма-распределение на положительной полуоси  $\lambda_t \geq 0$ :

$$G(\Lambda | \delta, \eta, \mu) = \exp\left[-\frac{1}{2\delta\mu} \sum_{t \in T} \left(\eta \frac{1}{\lambda_t} + \frac{1}{\eta} \ln \lambda_t\right)\right], \quad (3)$$

где  $\eta$  и  $\mu$  – параметры, определяющие степень гибкости модели.

Если  $\mu \rightarrow 0$ , то  $1/\lambda_t$  практически полностью сконцентрированы вокруг математического ожидания  $1/\eta$ , а при  $\mu \rightarrow \infty$ ,  $1/\lambda_t$  стремятся к практически равномерному распределению.

Совместная апостериорная плотность распределения скрытого поля  $X$  и коэффициентов  $\Lambda$  полностью определяется (1), (2) и (3):

$$P(X, \Lambda | Y, \delta, \eta, \mu) = \frac{\Psi(X | \Lambda, \delta) G(\Lambda | \eta, \mu) \Phi(Y | X, \delta)}{\iint \Psi(X | \Lambda, \delta) G(\Lambda | \eta, \mu) \Phi(Y | X, \delta) dX d\Lambda}.$$

Легко убедиться, что оценки максимума апостериорного распределения (maximum a posteriori probability, MAP) приводят к задаче минимизации следующей целевой функции:

$$J(X, \Lambda | Y, \eta, \mu) = \sum_{t \in T} (y_t - x_t)^2 + \sum_{t', t'' \in V} \left\{ \frac{1}{\lambda_{t'}} [(x_{t'} - x_{t''})^2 + \eta/\mu] + (1 + 1/\mu) \ln \lambda_{t'} \right\}. \quad (4)$$

При фиксированных коэффициентах  $\Lambda$  оптимальная оценка  $X$  может быть получена путем решения простой квадратичной задачи оптимизации

$$\hat{X} = \arg \min_X \left\{ \sum_{t \in T} (y_t - x_t)^2 + \sum_{t', t'' \in V} \frac{1}{\lambda_{t'}} (x_{t'} - x_{t''})^2 \right\}$$

при помощи быстрой процедуры на основе древовидного динамического программирования [38].

Если значения скрытых переменных  $X$  фиксированы,  $X = X^s$ , критерий (4) приводит к следующим оценкам  $\Lambda$  с заданными параметрами  $\eta$  и  $\mu$ :

$$\hat{\lambda}_{t'}(X^s, \eta, \mu) = \eta \frac{(1/\eta)(x_{t'}^s - x_{t''}^s)^2 + 1/\mu}{1 + 1/\mu}, (t', t'') \in V.$$

Информация о структуре дополнительного «управляющего» изображения  $X^s$  может быть выражена при помощи коэффициентов  $\hat{\Lambda} = (\hat{\lambda}_{t'}, t' \in T)$ . Как было сказано выше, поле  $\Lambda$  служит мерой локальной изменчивости скрытого поля  $X$ . Как видно из критерия (4),  $\lambda_{t'}, t' \in T$  играет роль штрафа на различие значений смежных переменных  $x_{t'}^s$  и  $x_{t''}^s$ ,  $(t', t'') \in V$ . Таким образом, поле  $\Lambda$ , оцененное с помощью дополнительного «управляющего» изображения, может быть использовано для переноса структуры локальных связей между элементами «управляющего» изображения на результат обработки. Обобщенная схема сегментации показана на рис. 4.

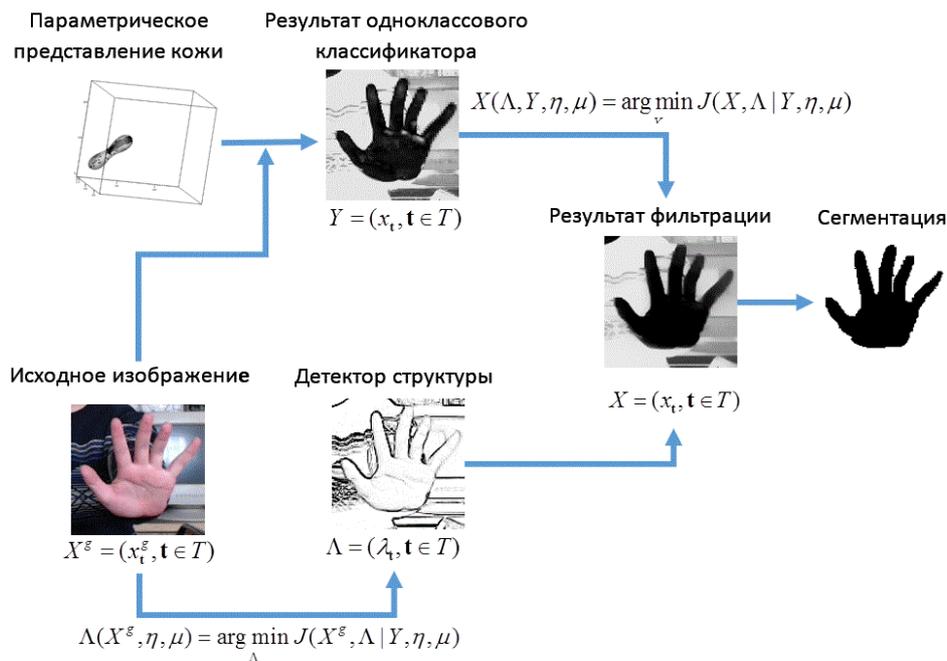


Рис. 4. Обобщенная схема цветового классификатора

Предложенная процедура имеет линейную вычислительную сложность относительно количества элементов изображения и время обработки, сравнимое с быстрым наведенным фильтром (Fast Guided Filter) [39].

В задаче сегментации исходное изображение играет роль «управляющего»  $X^g$ , а грубая сегментация на основе вероятностного однокласового классификатора играет роль наблюдаемого изображения  $Y$ . Метод описания данных опорными векторами дает возможность получить «размытую» классификацию вместо бинарной. Мы используем расстояние от объекта до центра гиперсферы в расширенном гильбертовом пространстве как степень принадлежности к классу интереса.

Размытая классификация в сочетании с фильтром, переносящим структуру, позволяет получить более точное и устойчивое решение.

**Детектирование кисти руки на основе сравнения скелетов бинарных изображений.** Сегментированные прямоугольные области бинарного изображения частично отбраковываются по ряду эмпирических признаков: размеру (предполагается, что размер сопоставим с размерами найденного лица человека), геометрическим характеристикам и степени заполненности информацией (вычисляется как отношение числа черных пикселей, принадлежащих области, к размеру области). Прошедшие отбор области-кандидаты предъявляются для анализа процедуре сравнения бинарных изображений на основе скелетизации [27]. Каждый кандидат сравнивается с эталонными (типичными) изображениями левой и правой ладони (рис. 5).



Рис. 5. Эталонные изображения левой и правой ладони

Процедура сравнения начинается с построения скелетов изображений: один скелет строится для изображения эталонной ладони, второй – для изображения-кандидата (рис. 6).

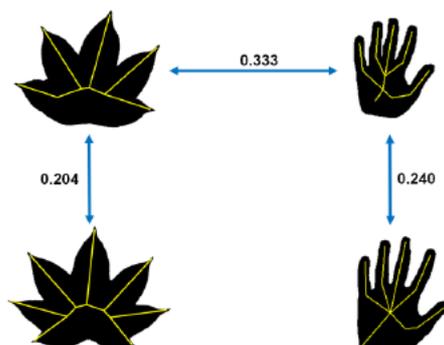


Рис. 6. Примеры двух классов бинарных изображений, их скелетов и вычисленные для них меры различия

Алгоритм сравнения двух скелетов изображений состоит из следующих шагов.

1. Кодирование скелета и его радиальной функции последовательно (цепочкой) примитивов. Каждый примитив содержит информацию о топологических характеристиках соответствующего скелетного ребра: его длине, значении угла, образованного с соседним ребром, радиальной функции.

2. Парное выравнивание цепочек примитивов, осуществляемое посредством динамического программирования.

3. Вычисление меры несходства на основе оптимального парного выравнивания цепочек примитивов, а, следовательно, и закодированных ими скелетов.

Полученная таким образом двухместная функция расстояния для бинарных растровых изображений возвращает неотрицательное число, определяющее меру их несходства. Предполагается, что для принятия решения, содержит ли область-кандидат изображение ладони (левой или правой), достаточно простого порогового правила, относящего к классу ладоней все изображения, расстояние от которых до эталона меньше некоторого значения. Поэтому необходимо выбрать адекватные задаче эталонные изображения правой и левой ладони.

Согласно нашим предварительным исследованиям, процедура сравнения изображений демонстрирует хорошую производительность: время вычисления меры различия двух объектов составляет 3-5 мс на обычном ноутбуке.

**Экспериментальные результаты.** Для проведения экспериментального исследования нами была собрана база изображений, сделанных в разных интерьерах при различных условиях освещенности. На каждом изображении зафиксирован один человек, предъявляющий кисть руки. Сцена каждого изображения построена таким образом, чтобы обеспечить наблюдателю однозначное выделение объектов интереса (в данном случае лицо и кисть без пересечений) (рис. 7). Всего в базе содержится 302 изображения. Для каждого изображения экспертом была определена прямоугольная область, содержащая кисть руки. Эта информация использовалась в дальнейшем как истинная оценка. Доступ к размеченной базе можно получить по адресу [http://lda.tsu.tula.ru/papers/TulaSU\\_HandsDetDB.zip](http://lda.tsu.tula.ru/papers/TulaSU_HandsDetDB.zip).

На первом этапе проведения экспериментальных исследований оценивали качество сегментации предложенными в работе алгоритмами. В частности, необходимо проверить, насколько уверенно предложенная процедура выделяет претендентов для последующего сравнения с эталоном. Как видно из таблицы, после сегментации на большинстве изображений, на которых было обнаружено лицо (используется параметр `NeighborFaces = 9` в OpenCV-реализации метода Виолы-Джонса), удалось также выделить и фрагмент, соответствующий реальной кисти руки, причем в 52 случаях этот претендент был единственным.



**Рис. 7. Примеры фотографий из созданной базы данных для проведения экспериментов**

**Качество сегментации**

Критерий	Предложенный в работе метод	Алгоритм GrabCut
Количество изображений в базе	302	
Корректно найдено лиц алгоритмом Виолы-Джонса	289	
Среднее число претендентов на изображении	3,02	2,39
Один из найденных претендентов соответствовал истинному положению руки	233	172
Единственный претендент, соответствующий истинному положению руки	52	36
Не найдено ни одного претендента	2	37

Сравнили предложенный подход к сегментации с хорошо известным алгоритмом GrabCut [40] на основе метода разреза графов. Среднее время расчетов для алгоритмов сегментации (реализация в среде MATLAB) составило 1,3 с для метода GrabCut и 0,3 с для предложенного метода на основе гамма-нормальной вероятностной модели. Примеры фрагментов-кандидатов показаны на рис. 8. Все они были разделены экспертом на три типа: «левая рука» (109 экземпляров), «правая рука» (71), и «не рука» (541). Кроме того, два наиболее типичных объекта были назначены в качестве эталона левой руки и эталона правой руки (см. рис. 5).



**Рис. 8. Объекты, похожие на ладонь человека (а), объекты, не схожие по форме с ладонью человека (б)**

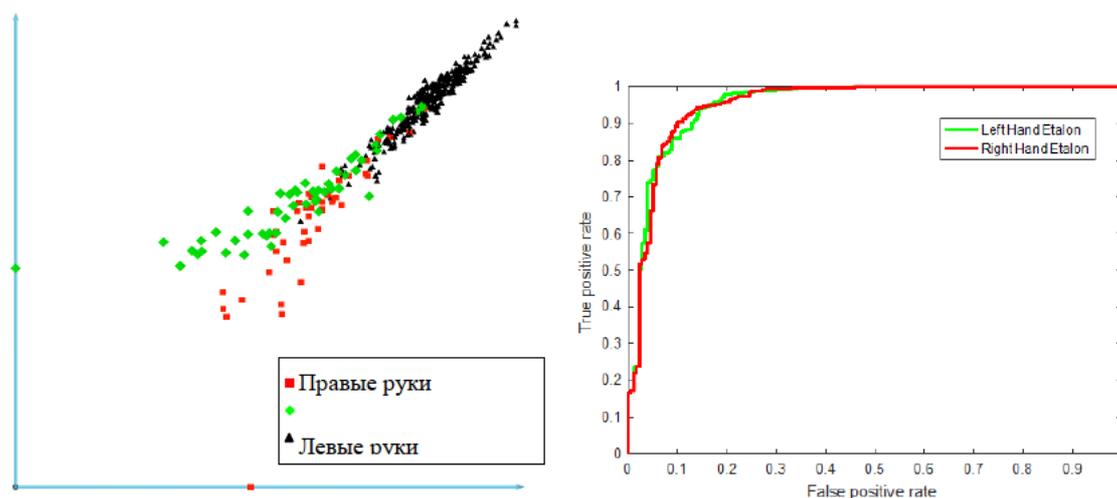
Качество алгоритма сравнения бинарных изображений оценивалось посредством анализа расстояний между объектами-кандидатами, полученными с помощью сегментации, и эталонными изображениями левой и правой руки. На рис. 9 представлено отображение матрицы парных расстояний для всех полученных образцов-претендентов (размер матрицы –  $721 \times 721$ ) на двумерную плоскость, где в качестве первого признака (вертикальная ось) выбираются расстояния до эталона правой руки, а в качестве второго (горизонтальная ось) – расстояния до эталона левой руки. Наглядно показано, что выполняется гипотеза компактности для изображений руки, что позволяет построить систему выделения кисти руки, используя простое пороговое правило по расстоянию от заданного эталона. Качество отделения изображений ладони от других претендентов («не рук») в виде ROC-кривой показано на рис. 9. Значение показателя качества классификации «площадь под кривой» для левой руки равна 0,9535, а для правой руки – 0.9531.

**Заключение.** Обнаружение кисти руки является достаточно сложной задачей и требует сочетания различных методов и алгоритмов для получения надежного решения. Предлагаемый подход состоит из трех основных этапов: обнаружения лица для обучения одноклассового классификатора, цветовой сегментации кожи и формирования кандидатов для сравнения с эталоном.

Основными преимуществами подхода являются инвариантность к условиям освещения, особенностям цвета кожи человека, повороту руки и масштабированию. Кроме того, не используется модель фона изображения, что делает подход надежным в сложных или меняющихся сценах. Разработанный метод позволяет быстро переобучить цветовой классификатор, используя для этого только небольшой фрагмент изображения лица.

Новый метод сегментации на основе одноклассового цветового классификатора и фильтра, передающего структуру, был построен с использованием вероятностной гамма-нормальной модели. Это позволяет значительно сократить количество объектов-кандидатов для сравнения с эталоном. Инвариантный к повороту и масштабированию алгоритм, основанный на выравнивании цепочек скелетных примитивов, обеспечивает качественное сравнение кандидатов с эталонными объектами.

Благодаря высокой скорости работы представленных алгоритмов становится возможной обработка изображений в режиме реального времени и детектирование кисти руки в видеопотоке. Экспериментальные исследования демонстрируют надежность и точность предложенного метода.



**Рис. 9. Расстояние претендентов от эталонного изображения левой руки (горизонтальная ось) и правой руки (вертикальная ось) и ROC-кривые для функции сравнения претендентов**

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 14-07-00527, 16-57-52042, 16-07-01039.

### Список литературы

1. Review and evaluation of commonly-implemented background subtraction algorithms / Y. Benezeth [et al.] // 2008 19th Int. Conf. Pat. Recogn. 2008. P. 1 – 4.
2. Piccardi M. Background subtraction techniques: a review // 2004 IEEE Int. Conf. Syst. Man Cybern. (IEEE Cat. No.04CH37583). 2004. Vol. 4. P. 3099 – 3104.
3. Shiravandi S., Rahmati M., Mahmoudi F. Hand gestures recognition using dynamic Bayesian networks // 2013 3rd Joint Conference of AI & Robotics and 5th RoboCup Iran Open International Symposium. IEEE, 2013. P. 1 – 6.
4. Jones M., Rehg J. Statistical Color Models with Application to Skin Detection // Int. J. Comput. Vis. 2002. Vol. 46, № 1. P. 81 – 96.
5. Kakumanu P., Makrogiannis S., Bourbakis N. A survey of skin-color modeling and detection methods // Pat. Recogn. 2007. Vol. 40, № 3. P. 1106 – 1122.
6. Vezhnevets V. A Survey on Pixel-Based Skin Color Detection Techniques // Cybernetics. 2003. Vol. 85, № 0896–6273 SB-IM. P. 85 – 92.

7. Adaptive Skin Color Classifier / M. Wimmer [et al.] // Proc. first ICGST Int. Conf. Graph. Vis. Image Process. GVIP-05. 2005. № December. P. 324–327.

8. Phung S.L., Bouzerdoum A., Chai D. Skin segmentation using color pixel classification: analysis and comparison. // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 2005. Vol. 27. № 1. P. 148 – 154.

9. Junqiu W., Yagi Y. Integrating Color and Shape-Texture Features for Adaptive Real-Time Object Tracking // Image Process. IEEE Trans. 2008. Vol. 17, № 2. P. 235–240.

10. Малашин Р.О., Луцив В.Р. Восстановление силуэта руки в задаче распознавания жестов с помощью адаптивной морфологической фильтрации бинарного изображения // Оптический журнал. 2013. Vol. 80. № 11. P. 54 – 61.

11. Suarez J., Murphy R.R. Hand gesture recognition with depth images: A review // Proc. IEEE Int. Work. Robot Hum. Interact. Commun. 2012. № August 2016. P. 411 – 417.

12. Francke H., Ruiz-del-Solar J., Verschae R. Real-time hand gesture detection and recognition using boosted classifiers and active learning // 2nd Pacific Rim Symp. Image Video Techn. PSIVT 2007. Vol. 4872 LNCS. P. 533 – 547.

13. Hikal N.A., Kountchev R. Skin Color Segmentation Using Adaptive PCA and Modified Elliptic Boundary Model. 2011. P. 978 – 979.

14. Hassanpour R., Shahbahrami A., Wong S. Adaptive Gaussian Mixture Model for Skin Color Segmentation // World Acad. Sci. Eng. Technol. 2008. Vol. 31, № July. P. 1 – 6.

15. Oka K., Sato Y., Koike H. Real-time fingertip tracking and gesture recognition // IEEE Comput. Graph. Appl. 2002. Vol. 22. № 6. P. 64 – 71.

16. Argyros A.A., Lourakis M.I.A. Vision-based interpretation of hand gestures for remote control of a computer mouse // Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics). 2006. Vol. 3979 LNCS. P. 40 – 51.

17. Crowley J., Berard F., Coutaz J. Finger tracking as an input device for augmented reality // Int. Work. .... 1995. № June. P. 1 – 8.

18. Rehg J.M., Kanade T. Model-based tracking of self-occluding articulated objects // Proc. IEEE Int. Conf. Comput. Vis. 1995. P. 612 – 617.

19. Zhu Y. et al. Vision Based Hand Gesture Recognition // 2013 Int. Conf. Serv. Sci. IEEE, 2013. Vol. 3. № 1. P. 260 – 265.

20. Jones M., Viola P. Fast Multi-view Face Detection // Mitsubishi Electr. Res. Lab TR2000396. 2003. № July.

21. Parametric Representation of Objects in Color Space Using One-Class Classifiers: inbook / A. Larin [et al.] // Machine Learning and Data Mining in Pattern Recognition: 10th International Conference, MLDM 2014, St. Petersburg, Russia, July 21 – 24, 2014. Proceedings / ed. Pernert P. Cham: Springer International Publishing, 2014. P. 300 – 314.

22. Tax D.M.J., Duin R.P.W. Support Vector Data Description // *Mach. Learn.* Kluwer Academic Publishers, 2004. Vol. 54, № 1. P. 45–66.

23. Gracheva I., Kopylov A., Krasotkina O. Fast Global Image Denoising Algorithm on the Basis of Nonstationary Gamma-Normal Statistical Model: inbook // *Analysis of Images, Social Networks and Texts: 4th International Conference, AIST 2015, Yekaterinburg, Russia, April 9-11, 2015, Revised Selected Papers* / ed. Y.M. Khachay [et al.]. Cham: Springer International Publishing, 2015. P. 71–82.

24. Gracheva I., Kopylov A. Image Processing Algorithms with Structure Transferring Properties on the Basis of Gamma-normal Model // *Analysis of Images, Social Networks, and Texts April, 7-9th, Yekaterinburg. In Printing*, 2016. P. In printing.

25. A Real-Time Hand Gesture Recognition Method / Y. Fang [et al.] // *Multimed. Expo, 2007 IEEE Int. Conf. IEEE, 2007*. P. 995 – 998.

26. Bowden R. A boosted classifier tree for hand shape detection // *Sixth IEEE Int. Conf. Autom. Face Gesture Recognition, 2004. Proceedings. IEEE, 2004*. P. 889 – 894.

27. Kushnir O., Seredin O. Shape Matching Based on Skeletonization and Alignment of Primitive Chains: inbook // *Analysis of Images, Social Networks and Texts: 4th International Conference, AIST 2015, Yekaterinburg, Russia, April 9--11, 2015, Revised Selected Papers* / ed. Y.M. Khachay [et al.] Cham: Springer International Publishing, 2015. P. 123 – 136.

28. Sabeti L., Wu Q.M.J. High-speed skin color segmentation for real-time human tracking // *2007 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. IEEE, 2007*. P. 2378 – 2382.

29. Improving adaptive skin color segmentation by incorporating results from face detection / J. Fritsch [et al.] // *Proceedings. 11th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication. IEEE, 2002*. P. 337–343.

30. Hsieh C.C., Liou D.H., Lai W.R. Enhanced face-based adaptive skin color model // *J. Appl. Sci. Eng.* 2012. Vol. 15. № 2. P. 167 – 176.

31. Real-time foreground-background segmentation using codebook model / K. Kim [et al.] // *Real-Time Imaging.* 2005. Vol. 11, № 3. P. 172 – 185.

32. Degtyarev N., Seredin O. Comparative testing of face detection algorithms // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. Springer Berlin Heidelberg, 2010. Vol. 6134 LNCS. P. 200 – 209.

33. Bali A., Singh S.N. A Review on the Strategies and Techniques of Image Segmentation // *2015 Fifth International Conference on Advanced Computing & Communication Technologies. IEEE, 2015*. P. 113 – 120.

34. He K., Sun J., Tang X. Guided image filtering // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 2013. Vol. 35, № 6. P. 1397 – 1409.
35. Zhang J., Cao Y., Wang Z. A New Image Filtering Method: Nonlocal Image Guided Averaging // 2014 IEEE Int. Conf. Acoust. Speech Signal Process. 2014. № 2012. P. 2479 – 2483.
36. Digital photography with flash and no-flash image pairs / G. Petschnigg [et al.] // ACM Trans. Graph. 2004. Vol. 23. № 3. P. 664.
37. Bayesian Estimation of Time-Varying Regression with Changing Time-Volatility for Detection of Hidden Events in Non-Stationary Signals / O.V. Krasotkina [et al.] // Proc. 7th IASTED Int. Conf. Signal Process. Pattern Recognit. Appl. (SPPRA 2010). 2010. P. 8 – 15.
38. Optimization techniques on pixel neighborhood graphs for image processing / V.V. Mottl [et al.] // Graph-Based Represent. Pattern Recognit. Computing, / ed. Jolion J.-M., Kropatsch W.G. Wien: Springer-Verlag/Wien, 1998. Vol. 12, № Computing. Supplement, 0344-8029. P. 135 – 145.
39. He K., Sun J. Fast Guided Filter // CoRR. 2015. Vol. abs/1505.0. P. 2.
40. Boykov Y., Kolmogorov V. An experimental comparison of min-cut/max-flow algorithms for energy minimization in vision // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 2004. Vol. 26, № 9. P. 1124 – 1137.

*Копылов Андрей Валериевич, канд. техн. наук, доц., [and.kopylov@gmail.com](mailto:and.kopylov@gmail.com), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

*Середин Олег Сергеевич, канд. физ.-мат. наук, доц., [oseredin@yandex.ru](mailto:oseredin@yandex.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

*Кушнир Олеся Александровна, ассист., [kushnir-olesya@rambler.ru](mailto:kushnir-olesya@rambler.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

*Грачева Инесса Александровна, асп., [gial509@mail.ru](mailto:gial509@mail.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

*Ларин Александр Олегович, [ekzebox@gmail.com](mailto:ekzebox@gmail.com), Россия, Тула, Тульский государственный университет*

#### **ROBUST PALM DETECTION BASED ON COMBINING OF COLOR AND SHAPE INFORMATION**

*A.V. Kopylov, O.S. Seredin, O.A. Kushnir, I.A. Gracheva, A.O. Larin*

*In this paper, we describe a background-invariant hand detection method in video stream, which is trained without any background training sample. Method uses the modified version of one-class pixel classifier for initial rough segmentation. The special filter with structure-transferring properties built on probabilistic gamma-normal model applied for improving initial segmentation. To make a final decision whether a segmented image fragment is the image of human hand or not the method of binary images comparison based on skeletonization is employed.*

*Key words: Hand detection, One-class classification, Pixel classifier, Support Vector Data Description (SVDD), Structure transferring filter, Skeleton comparison.*

*Kopylov Andrej Valerievich, candidate of technical sciences, docent, [and.kopylov@gmail.com](mailto:and.kopylov@gmail.com), Russia, Tula, Tula State University,*

*Seredin Oleg Sergeevich, candidate of mathematical sciences, docent, [oseredin@yandex.ru](mailto:oseredin@yandex.ru), Russia, Tula, Tula State University,*

*Kushnir Olesja Aleksandrovna, assistant, [kushnir-olesya@rambler.ru](mailto:kushnir-olesya@rambler.ru), Russia, Tula, Tula State University,*

*Gracheva Inessa Aleksandrovna, postgraduate, [gia1509@mail.ru](mailto:gia1509@mail.ru), Russia, Tula, Tula State University,*

*Larin Aleksandr Olegovich, [ekzebox@gmail.com](mailto:ekzebox@gmail.com), Russia, Tula, Tula State University*

УДК 004.93

## ГРУППИРОВКА ПРИЗНАКОВ БЕЗ ПОСТРОЕНИЯ ФАКТОРОВ ГРУПП

С.Д. Двоенко, Д.О. Пшеничный, Ф.А. Хандельянц

*В задачах группировки существует проблема интерпретации факторов групп, так как они являются синтетическими признаками. Обычно определяется представитель группы как признак, наиболее коррелирующий с ее фактором. Тогда разбиение на группы интерпретируется прямо в терминах исходных признаков. Предложен новый подход для выбора признаков, адекватно представляющих факторы групп без их непосредственного вычисления. Данный подход основан на построении оптимальной последовательности главных миноров корреляционной матрицы признаков. Показано, что предложенный подход позволяет формировать как начальное решение для других алгоритмов группировки, так и может применяться самостоятельно для оценки числа групп и построения содержательных группировок.*

*Ключевые слова: группировка, кластер, метрика, корреляция, собственное число, собственный вектор, минор.*

**Введение.** В интеллектуальном анализе данных предполагается, что экспериментальные сведения об изучаемом явлении представлены как результаты измерений в виде матрицы данных  $X(N, n)$ , где  $N$  – число измерений,  $n$  – число измеряемых характеристик. Каждое измерение характеристик изучаемого явления рассматривается как объект  $\omega_i \in \Omega$ , который процессом измерения помещен в  $n$ –мерное признаковое пространство и представлен в нем вектором-строкой  $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, \dots, x_{in})$ ,  $i = 1, \dots, N$ . Матрица данных представляет собой множество из  $N$  строк  $X(N, n) = (\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N)^T$ , расположенных друг под другом.

Согласно гипотезе компактности предполагается, что объекты образуют  $K$  локальных сгущений (классы, кластеры, таксоны), которые следует выделить (отделить друг от друга), т.к. они предположительно характеризуют различные состояния изучаемого явления.

С другой стороны, совокупность измерений одной характеристики образует вариационный ряд, т.е. признак, представленный наблюдениями  $X_j = (x_{1j}, \dots, x_{Nj})^T$ . Тогда матрица данных представляет собой множество из  $n$  вариационных рядов-столбцов  $X(N, n) = (X_1, \dots, X_n)$ .

Согласно гипотезе скрытых факторов считается, что их поведение определяет соответствующие «глубинные» свойства объекта исследования, которые проявляются через измеренные признаки как его реакции на внешние воздействия. Факторы проявляются через измеряемые признаки и различным образом влияют на эти признаки. Зависимость признаков от некоторого фактора определяет похожесть их поведения, т.е. похожесть изменений значений соответствующих вариационных рядов. Предполагается, что существует  $L$  таких факторов  $F_i$ , которым должны соответствовать группы признаков  $G_i, i = 1, \dots, L$ .

Очевидно, что объективная закономерность, скрыто присутствующая в изучаемом явлении, обязательно проявится в результатах обработки различными методами и алгоритмами, основанными на различных предположениях о нем. Таким образом, необходимо расширять разнообразие интеллектуальных методов обработки данных. Актуальность новых подходов вполне очевидна, особенно в связи с накоплением больших объемов экспериментальных данных и развитием методов обработки данных, представленных парными сравнениями.

**1. Задача группировки признаков.** Задача группировки признаков имеет самостоятельное значение и может решаться разными способами.

Относительно факторов делается важное предположение, что, в идеале, они независимы. Статистический смысл независимости факторов означает, что соответствующие вариационные ряды наблюдений, будучи построенными, окажутся некоррелированными. Это означает, что такие скрытые признаки можно представить наблюдениями  $F_i = (f_{1i}, \dots, f_{Ni})^T$ ,  $i = 1, \dots, L$ , которые формируют систему ортогональных векторов.

Если сначала определяются факторы, то потом определяются признаки, подверженные их влиянию в наибольшей степени (задача факторного анализа и проблема вращения для определения факторных нагрузок и получения т.н. «простой» факторной структуры). Проблема заключается в том, что ортогональное вращение факторов не совсем адекватно решает проблему получения простой структуры. Поэтому приходится применять косоугольное вращение, что усложняет модель факторного анализа, т.к. факторы уже не являются независимыми [1, 2].

Если сначала выделять группы сильно коррелирующих признаков, где признаки из разных групп почти не коррелируют, то потом можно построить представляющие эти группы факторы. При таком решении, в частности, проблема простой факторной структуры для косоугольной системы факторов решается автоматически, хотя сами факторы несколько отличаются от классических. В этом случае решается, например, известная задача экстремальной группировки [3]. Следует отметить, что данная задача решается также и для центроидных направлений.

В обоих вариантах задачи группировки возникает проблема содержательной интерпретации полученных факторов или соответствующих групп признаков. Фактор группы, все-таки, является синтетическим признаком, интерпретация которого может быть затруднена. Поэтому часто применяется следующий прием.

После выделения групп признаков и построения соответствующих им факторов в каждой группе определяется т.н. «представитель» группы, как наиболее сильно коррелирующий с фактором группы признак. Далее рассматривается только множество таких признаков-представителей.

В этом случае задача группировки также решает и другую известную задачу сокращения размерности признакового пространства. Эта задача также имеет самостоятельное значение. В данном случае получается сокращенное и содержательно интерпретируемое признаковое пространство. Важное свойство такого подпространства очевидно: эти реальные признаки коррелируют между собой в наименьшей степени и лучше всего могут представить скрытые факторы. Совсем упрощая, их даже часто рассматривают как факторы. При таком подходе все преобразования, выполняемые в соответствии с факторной моделью, являются промежуточными, т.к. в итоге выбираются некоторые исходные признаки.

Здесь предлагается подход, который позволит выбрать подмножество исходных признаков, обладающих аналогичными свойствами, не требуя построения собственных или центроидных направлений в качестве промежуточного этапа преобразований.

**2. Метрические нарушения конфигураций элементов.** Задача группировки (выделения факторов) решается для матрицы взвешенных скалярных произведений признаков  $X_j, j = 1, \dots, n$ , т.е. для матрицы  $R(n, n)$  корреляций вариационных рядов наблюдений. Для определения свойств факторов сами наблюдения  $X(N, n)$  уже не нужны. Поэтому в факторном анализе оценка значений факторов как восстановленных наблюдений является отдельной и дополнительной задачей.

Это замечание особенно актуально в связи с развитием современных подходов, опирающихся на данные об объектах исследования, представленных только в виде парных сравнений. В этом случае предполагается, что реальные признаки существуют, но для измерения уже недоступны.

Считается, что от измеренных признаков остались лишь матрица расстояний  $D(N, N)$  или скалярных произведений  $C(N, N)$  между объектами и матрица корреляций  $R(n, n)$  между признаками.

Развитие этих методов показывает, что нужно обеспечить вложенность экспериментальных наблюдений в соответствующее метрическое (евклидово) пространство признаков и применить модификации алгоритмов кластер-анализа и группировки, не требующих матрицы данных  $X$ .

Проблема метричности конфигурации элементов известна и рассматривается, например, в задаче шкалирования [4]. Ее конечной целью является восстановление хорошо интерпретируемых признаков в явном виде, как представленных соответствующими измерениями. Если этого не требуется, то задачи кластеризации и группировки можно решить и без непосредственного восстановления собственно значений признаков.

В частности, такой подход позволяет для решения задач кластеризации и группировки применять одни и те же алгоритмы, рассматривая объекты или признаки просто как элементы множества, погруженные в соответствующее метрическое пространство [5].

Если элементами множества являются признаки, то, исходя из смысла схожести вариационных рядов, рассматривают модули или квадраты коэффициентов корреляций в матрице  $R(n, n)$ . Если изначально рассматривается некоторая функция парных сравнений, имеющая смысл близости  $s_{ij} \geq 0$ ;  $i, j = 1, \dots, n$ , то ее рассматривают как положительные вариации (корреляции, если они нормированы).

На практике часто в полученных конфигурациях элементов имеются метрические нарушения. Причины этого различны. Поэтому одной из актуальных задач современного анализа данных является восстановление метричности данных. Именно в этом случае применение упомянутых выше алгоритмов является математически корректным.

Известно, что нарушения метричности конфигураций приводят к появлению отрицательных собственных чисел в матрице скалярных произведений между элементами множества. В случае множества признаков это относится к матрице корреляций  $R(n, n)$ . Если ее собственные числа упорядочить по убыванию  $\lambda_1 > \dots > \lambda_n$ , то можно считать, что пространства размерностей, соответствующих отрицательным собственным числам не существуют в том смысле, что в них для наблюдений не выполняется, например, теорема Пифагора, или, в общем случае, теорема о косинусах, могут быть нарушены неравенства треугольника и т.д.

Тогда результаты обработки, вообще говоря, следует признать недостаточно корректными, где уровень некорректности определяется математической некорректностью результата.

Известно, что дисперсия данных – это размерность  $n$  пространства признаков. Для устранения в  $R(n, n)$  отрицательных собственных чисел обычно применяют известное дискретное разложение Карунена-Лоэва. Из всех элементов матрицы  $R(n, n)$  «послойно» исключают вклады собственных векторов (направлений), соответствующих отрицательным собственным числам (в этом случае также будем говорить, что это – «вклады» собственных чисел).

В факторном анализе матрица т.н. «остаточных» корреляций  $R_q(n, n)$  определяется после послойного устранения вкладов первых  $q$  собственных векторов, соответствующих собственным числам, упорядоченным по убыванию. Естественно, что  $\det R_q(n, n) = 0$ .

Здесь удобно применить этот термин к результату устранения вкладов  $q$  отрицательных собственных чисел, которые оказываются последними в упорядочении. У такой матрицы остаточных корреляций  $R_{q-}(n, n)$  также  $\det R_{q-}(n, n) = 0$ . После устранения вкладов  $q$  отрицательных собственных чисел матрица остатков  $R_{q-}(n, n)$  становится ненормированной (и более того, некорректной), где  $r_{ii} > 1, i = 1, \dots, n$ . Но тогда, строго говоря, в

данных «ниоткуда» появляется добавочная дисперсия, т.к.  $\sum_{i=1}^n r_{ii} > n$ . Формально из  $R_{q-}(n, n)$  можно получить корректную корреляционную матрицу с единичной главной диагональю, просто пронормировав ее.

Очевидно, что нормировка уничтожает сведения о доле внесенной дисперсии. Поэтому в общем случае появление новой дисперсии в данных после нормировок матрицы корреляций невозможно проконтролировать. Это нежелательно, когда решается задача группировки признаков.

По-видимому, эта проблема не столь принципиальна при наличии признакового пространства, т.е. матрицы данных  $X(N, n)$ . В этом случае можно построить матрицу т.н. «вычисленных признаков»  $Y(N, m)$ , где  $m = n - q < n$  и  $\lambda_1 > \dots > \lambda_m > 0$ , как проекций векторов-объектов из  $X$  на  $m$  первых собственных направлений. В пространстве вычисленных признаков наблюдения-строки  $\mathbf{y}_i = (y_{i1}, \dots, y_{im})$  образуют метрическую конфигурацию, что позволяет корректно решать задачи группировки, кластеризации, визуализации и т.д.

С другой стороны, в линейной факторной модели существуют известная проблема определения общностей (вкладов общих факторов в дисперсию данных). Например, в методе главных факторов после редукции  $R(n, n)$  с целью устранения дисперсий характерных факторов редуцированная матрица  $\bar{R}(n, n)$  оказывается ненормированной, т.к.  $r_{ii} < 1, i = 1, \dots, n$

из-за уменьшенных значений ее диагональных элементов. Это – известная в факторном анализе проблема определения общностей, теоретического решения которой не предлагалось. Есть лишь эмпирические рекомендации по оценке величины общностей.

Отметим, что эмпирические рекомендации часто приводят к появлению отрицательных собственных чисел в редуцированной матрице  $\bar{R}(n, n)$ , т.е. к метрическим нарушениям конфигурации множества.

Чтобы избежать этого, при построении главных факторов приходится лишь «слегка» редуцировать диагональные элементы корреляционной матрицы, обычно в значительно меньшей степени, чем по эмпирическим рекомендациям. Вообще-то, это означает, что доля дисперсии в данных, объясняемая общими факторами, очень высока. Как в этом случае интерпретировать соотношения общностей и характерностей с точки зрения факторной модели – это другая проблема.

Следует отметить, что проблема общностей возникает и для центроидных факторов. Центроидные направления отличаются от собственных направлений, но эмпирический принцип выбора общностей также приводит к появлению отрицательных собственных чисел, т.е. к нарушению метричности конфигурации элементов множества.

**3. Оптимальная последовательность признаков.** В отличие от процедуры Карунена-Лоэва авторами был предложен другой метод так называемой «индивидуальной» корректировки лишь некоторых (или всех) парных сравнений некоторых элементов множества с остальными элементами для восстановления нарушенной метрической конфигурации, при котором сохраняется дисперсия данных [6, 7].

В данном методе наличие собственных чисел в матрице  $S(n, n)$  взвешенных скалярных произведений, где  $s_{ii} = 1, i = 1, \dots, n$ , связывается не с послойным ее разложением на вклады соответствующих собственных векторов (чисел), а с индивидуальными вкладами самих элементов множества. В качестве такой матрицы можно взять, например, матрицу  $R(n, n)$  корреляций, модулей или квадратов корреляций признаков.

Пусть дана симметричная нормированная матрица  $S(n, n)$ . Согласно критерию Сильвестра, матрица  $S(n, n)$  квадратичной формы положительно определена, если все ее главные миноры  $S_k = S(k, k), k = 1, \dots, n$  положительны  $\det S_k > 0$ , где  $S_1 = S(1, 1) = s_{11} = 1$ . Согласно следствию из закона инерции Сильвестра число  $q$  отрицательных собственных чисел совпадает с числом смен знаков детерминантов в последовательности  $S_0 = 1, S_1, S_2, \dots, S_n = S(n, n)$ . Легко увидеть, что значения главных миноров (их детерминанты) в нормированной  $S$  убывают, начиная с единицы. При

наличии отрицательных собственных чисел последовательность главных миноров оказывается знакопеременной, где значения главных миноров постепенно уменьшаются по модулю.

Известно, что одновременная перестановка двух строк и двух соответствующих столбцов в  $S$  не изменяет ее собственных чисел. Такая перестановка соответствует перестановке двух элементов множества.

Определим такой порядок элементов множества, чтобы смены знаков значений главных миноров в последовательности  $S_k, k = 1, \dots, n$  происходили в ее конце. Если матрица  $S(n, n)$  ранга  $n$  имеет  $q$  отрицательных собственных чисел, то тогда в идеальном случае главный минор  $S_{n-q+1}$  впервые окажется отрицательным  $\det S_{n-q+1} < 0$ , а знаки последующих  $q-1$  миноров будут чередоваться.

Естественно считать, что именно в этот момент  $k = n - q + 1$  очередной элемент множества  $\omega_k$ , представленный своими парными сравнениями  $s_{ki} = s_{ik}, i = 1, \dots, n$  с остальными, внес метрическое нарушение в уже построенную конфигурацию. Нарушение можно устранить одним из предложенных нами ранее способов коррекции его парных сравнений, получив положительное значение текущего главного минора  $S_k$  [6,7].

Следующий минор  $S_{k+1}$  снова окажется отрицательным и потребует исправления. Всего потребуется скорректировать парные сравнения для  $q$  элементов множества. В этом смысле отрицательные собственные числа оказываются связанными с конкретными элементами множества или, другими словами, оказываются «локализованными» в матрице парных сравнений.

Рассмотрим процедуру, которая позволит получить оптимальную последовательность элементов множества. Известно, что определитель матрицы  $S(n, n)$  равен произведению ее собственных чисел. Если он отрицателен, то количество собственных чисел нечетно, если положителен, то – четно.

Рассмотрим главные миноры  $S_k, k = n, \dots, 1$  в обратном порядке. Определим в матрице  $S_k$  такую строку и столбец  $i$ , что значение дополнительного минора  $(S_k)_i^i, 1 \leq i \leq k$ , образованного при их удалении, сменит знак по сравнению с  $S_k$  и окажется максимальным по модулю. Если знак не изменяется, то просто найдем такой дополнительный минор без смены знака. Пусть  $u$  – общее число таких шагов без смены знака дополнительного минора до локализации всех  $q$  смен знаков главных миноров.

Последовательность поочередно отброшенных строк и столбцов формирует оптимальную последовательность главных миноров  $S_k, k = 1, \dots, n$  (и элементов множества, последовательно формирующих те-

кущие миноры), в которой впервые отрицательный минор встретится не ранее, чем в момент  $n - q - u + 1$ . Это означает, что полученная перестановка формирует такую матрицу  $S(n, n)$ , у которой придется корректировать парные сравнения не более, чем у  $q + u$  последних элементов множества в оптимальной последовательности. В общем случае при неоптимальной последовательности элементов приходится корректировать значительно большее число элементов множества, т.к. каждая очередная коррекция обычно порождает шлейф дополнительных коррекций.

Легко увидеть, что при отсутствии метрических нарушений будет получена локально оптимальная последовательность главных миноров  $S_k, k = 1, \dots, n$ , где их значения, оставаясь неотрицательными, убывают наиболее медленно (почти).

Рассмотрим матрицу корреляций  $R(n, n)$ . Можно заметить, что значение  $\det R$  зависит от степени «ортогональности» конфигурации системы признаков: чем «ортогональнее» система признаков, тем ближе значение детерминанта к единице, и – к нулю в противном случае. Для  $n = 2$  это очевидно, т.к.  $\det R = 1 - r^2$ . Для  $n = 3$  в этом нетрудно убедиться, т.к.  $\det R = 1 + 2r_{12}r_{13}r_{23} - r_{12}^2 - r_{13}^2 - r_{23}^2$ , рассмотрев возможные значения парных коэффициентов корреляций, которые соответствуют конфигурациям без метрических нарушений, и т.д. С увеличением размерности  $n$  это эмпирическое свойство преимущественно сохраняется в целом, но, естественно, появляются возможности для взаимной компенсации достаточно высоких корреляций в усложняющихся формулах вычисления детерминантов, тем более, для корреляций со знаками.

В этих условиях оказывается, что для метрически корректной матрицы  $R(n, n)$  оптимальная последовательность главных миноров  $S_k, k = 1, \dots, n$ , где  $S_1 = 1$  и  $S_n = R(n, n)$ , определяет локально оптимальную последовательность вложенных подмножеств «наиболее ортогональных» признаков. В начале такой оптимальной последовательности расположены «наиболее ортогональные» друг к другу и к остальным признаки, а к концу последовательности выстраиваются все «менее ортогональные» к остальным признаки, выбранные в последнюю очередь.

Корреляционная матрица  $R(n, n)$  имеет статистический смысл, поэтому будем говорить об оптимальной последовательности наименее коррелированных вложенных подмножеств признаков. Отсюда легко увидеть, что первые  $m$  признаков в оптимальной последовательности должны образовывать наименее коррелирующее подмножество из всех  $n$  признаков, которое содержательно удобно интерпретировать как множество представителей  $m$  групп признаков.

Таким образом, процедура построения локально-оптимальной последовательности признаков позволяет решить задачу группировки на  $m$  групп (редукции размерности) без построения собственных направлений (для квадратов корреляций) или без построения центроидных направлений (для модулей корреляций).

**4. Начальные разбиения в алгоритмах группировки.** Ранее было показано, что алгоритм экстремальной группировки на модулях коэффициентов корреляций («модуль») эквивалентен алгоритму  $k$ -средних, который представлен в модифицированной форме для обработки близостей [5]. Такая модификация эквивалента классическому алгоритму  $k$ -средних для матрицы данных  $X$  в том смысле, что «внезапное» погружение элементов множества в пространство признаков не изменит результат разбиения. Алгоритм «модуль» строит центроидные факторы в задаче экстремальной группировки признаков.

Алгоритм экстремальной группировки на квадратах коэффициентов корреляций («квадрат») строит первые главные компоненты для каждой группы сильно коррелирующих признаков. Тем самым решается задача факторного анализа как задача построения главных компонент или главных факторов для, соответственно, нередуцированной  $R(n, n)$  или редуцированной  $\bar{R}(n, n)$  матриц корреляций.

Как и все процедуры кластер-анализа и группировки, процедура построения оптимальной последовательности также является локальной. Эксперименты показывают, что локальность процедуры построения оптимальной последовательности того же свойства, что и у процедур кластер-анализа и группировки. В частности, ожидаемым свойством оптимальной последовательности признаков обычно является устойчивое выделение от двух до пяти наименее (почти) коррелирующих признаков.

Таким образом, в силу локальности свойств процедур экстремальной группировки процедура построения оптимальной последовательности имеет самостоятельное значение в задаче группировки признаков.

Известно, что в процедурах с локальными свойствами важной проблемой является поиск начального решения (разбиения). Например, в задаче экстремальной группировки считается, что центроидные решения являются хорошим началом для группировок по собственным направлениям.

Поэтому оптимальная последовательность признаков рассматривается как другой способ получения начального решения для алгоритмов экстремальной группировки, которое для заданной матрицы  $R(n, n)$  является единственным. Это свойство представляется наиболее интересным.

**5. Программа экспериментов.** Пусть число групп признаков  $L$  заранее задано  $G_i, i=1, \dots, L$ , где  $|G_i|=n_i, \sum_{i=1}^L n_i = n, r(X_j, F_i)$  – корреляция

фактора  $F_i = (f_{1i}, \dots, f_{Ni})^T$  с признаком  $X_j = (x_{1j}, \dots, x_{Nj})^T$ . Для количественной оценки качества группировок рассмотрим известные критерии  $I_Q$  для алгоритма «квадрат» и  $I_M$  для алгоритма «модуль»:

$$I_Q = \sum_{i=1}^L \sum_{j \in G_i} r^2(X_j, F_i),$$

$$I_M = \sum_{i=1}^L \sum_{j \in G_i} |r(X_j, F_i)|.$$

Алгоритмы экстремальной группировки имеют следующий общий вид:

*Начальный шаг.* Для  $L$  групп указать какое-либо разбиение.

*Шаг  $k$ .*

1. В каждой группе  $G_i$ , образующей подматрицу  $R(n_i, n_i)$ ,  $i = 1, \dots, L$  построить фактор  $F_i = (f_{1i}, \dots, f_{Ni})^T$  как главный или центроидный факторы, или как первую главную компоненту.

2. Просмотреть все признаки и перенести каждый из них в ту группу, с фактором которой он коррелирует сильнее всего:  $X_j \in G_p$ , если  $s(X_j, F_p) > s(X_j, F_i)$ ,  $i = 1, \dots, L$ . Здесь близость  $s(X_j, F_p)$  представлена как  $s(X_j, F_p) = |r(X_j, F_i)|$  или  $s(X_j, F_p) = r^2(X_j, F_i)$ .

3. Перейти к шагу  $k = k + 1$ , если группы изменились, иначе стоп.

В данной работе программа экспериментов была направлена на исследование свойств оптимальной последовательности признаков, представляющей как начальное решение для алгоритмов экстремальной группировки, так и применяемой самостоятельно.

Рассматривались следующие начальные решения: первые  $L$  признаков в оптимальной последовательности,  $L$  минимально коррелирующих признаков как явная классическая альтернатива им, просто первые  $L$  признаков, случайно отобранные  $L$  признаков. Эти начальные решения порождали начальные разбиения для алгоритмов «квадрат» и «модуль» в смысле критериев  $I_Q$  и  $I_M$ . Очевидно, что первые два начальных решения являются хорошими (оптимальными), вторые два – нет. Эксперименты это подтвердили, поэтому далее представлены результаты только для оптимальных начальных решений.

Определение числа кластеров  $K$  является хорошо известной проблемой кластер-анализа. Одним из эвристических приемов для его выбора является определение границы, начиная с которой, убывание критерия кластеризации до нуля (средневзвешенная дисперсия кластеров) при изменении  $K = 1, \dots, N$  резко замедляется, где  $N$  – число объектов.

В задаче группировки при изменении числа групп  $L = 1, \dots, n$  критерии группировки  $I_Q$  и  $I_M$  возрастают до  $n$ , где  $n$  – число признаков. В этом случае также рассматривают границу, начиная с которой, возрастание этих критериев резко замедляется.

В оптимальной последовательности главных миноров  $S_k, k = 1, \dots, n$ , их значения, оставаясь неотрицательными (если потребовалось, то после коррекции), убывают наиболее медленно. В этом случае график изменения их значений приобретает характерный вид, когда значения на центральном участке графика резко падают. В этом случае аналогичное эвристическое предположение о числе групп признаков предполагает рассмотрение области резкого падения значений главных миноров.

Предполагается, что при оптимальном числе групп получаются хорошо содержательно интерпретируемые факторы, характеризующие их.

**6. Группировка экономических показателей.** Массив представляет собой данные Организации экономического сотрудничества и развития (Organization for Economic Cooperation and development, OECD) [8] из сводного отчета за 2013 г. (Fastbook Country Statistical Profiles – 2013 edition) по 13 экономическим показателям 13 стран мира: Австралия, Франция, Германия, Италия, Япония, Корея, Мексика, Турция, США, Китай, Индонезия, Россия, ЮАР.

Представлены следующие показатели.

1. ВВП на душу населения (долл.).
2. Рост реального ВВП (%).
3. Прибыль, полученная в сельском хозяйстве, охоте и лесном хозяйстве, рыбалке (%).
4. Прибыль, полученная в промышленности, включая энергетические отрасли (%).
5. Прибыль, полученная в оптовых и розничных продажах, отелях, ресторанах, ремонте, транспорте (%).
6. Прибыль, полученная в финансовом посредничестве, недвижимости, арендных и деловых услугах (%).
7. Реальная прибыль, полученная в сельском хозяйстве, охоте и лесном хозяйстве, рыбалке (%).
8. Реальная прибыль, полученная в промышленности, включая энергетические отрасли (%).
9. Реальная прибыль, полученная в оптовых и розничных продажах, отелях, ресторанах, ремонте, транспорте (%).
10. Реальная прибыль, полученная в финансовом посредничестве, недвижимости, арендных и деловых услугах (%).
11. Общее потребление энергии (ТВт-ч).
12. Электричество, производимое ядерной энергетикой (ТВт-ч).

13. Доля электричества, производимого ядерной энергетикой, от общего объема (%).

Значения показателей прибыли в различных сферах активности представлены как с учетом общего уровня цен (реальная прибыль) в результате процессов инфляции-дефляции, так и без учета общего уровня цен (прибыль). Другие показатели связаны с уровнем ВВП и потреблением энергии. Статистические связи между уровнем ВВП, прибылью и энергетическими затратами представлены корреляционной матрицей  $R(13,13)$ .

Как сказано выше, по значениям главных миноров для экономических показателей можно предположить, что число групп составляет 4 – 5.

Оптимальная последовательность признаков, построенная по матрице квадратов корреляций экономических показателей, имеет вид [8, 5, 13, 9, 11, 4, 7, 12, 3, 1, 10, 6, 2].

Оптимальная последовательность признаков, построенная по матрице модулей корреляций экономических показателей, имеет вид [10, 8, 5, 13, 12, 4, 11, 9, 2, 7, 3, 6, 1].

Результаты группировок показаны в табл. 1 и 2. Для каждого числа групп показаны начальные решения как представители, выбранные по разным принципам (минимально коррелирующие признаки и первые признаки из оптимальной последовательности). Также показаны результирующие группы и их представители.

Изменение хотя бы одного начального представителя после перегруппировки означает, что начальное разбиение было улучшено. Если представители не изменились, то начальное разбиение не улучшилось. Номера представителей выделены жирным шрифтом.

Рассмотрим табл. 1. Для разбиения на три группы признаков результат по критерию  $I_Q$  неудовлетворителен. А именно, для начального разбиения по минимальным корреляциям признаки 2 и 8 после перегруппировки попали в разные группы.

В то же время для начального разбиения по оптимальной последовательности эти два признака после перегруппировки оказались вместе в одной отдельной группе. Такая же ситуация сохраняется и для четырех групп признаков (в таблице не показана).

Но для пяти групп признаков результаты двух группировок практически одинаковы.

А именно, представители разных групп для обоих вариантов начального разбиения обязательно входят в состав разных групп и после перегруппировки. В частности, признаки 2 и 8 также входят в составы разных групп в обеих группировках.

В обоих случаях начальные группировки были улучшены, причем начальные представители остались в своих группах, даже если для них после перегруппировки были выбраны новые представители. Сами результирующие группировки минимально отличаются друг от друга признаком 12.

Такой результат хорошо соответствует ранее сделанному формальному предположению о пяти группах экономических показателей. Состав полученных групп позволяет содержательно интерпретировать их следующим образом (в порядке перечисления в табл. 1 показаны признаки, присутствующие в составе соответствующих групп одновременно в обоих разбиениях):

- 1) прибыль в промышленности с учетом энергозатрат (8);
- 2) прибыль в торговых и транспортных услугах (5);
- 3) прибыль в производстве натуральной продукции с учетом энергозатрат (7, 13);
- 4) ВВП и прибыль во всех сферах активности (1, 2, 3, 4, 6, 9, 10);
- 5) Общее потребление энергии (11).

Рассмотрим табл. 2. Для разбиения на три группы по критерию  $I_M$  результаты похожи в том смысле, что все представители разных групп находятся в разных группах до и после перегруппировки. Для разбиения на четыре группы результат неудовлетворителен, т.к. в одной группировке признаки 5 и 11 представляют разные группы, а в другой группировке признаки 5 и 11 располагаются вместе и образуют отдельную группу.

Для пяти групп признаков разбиения полностью совпадают, где признак 12 находится в одной группе вместе с признаком 11. Таким образом, и в этом варианте подтвердилась ранее предложенная интерпретация групп признаков (порядок перечисления групп соответствует табл. 1).

Рассмотрим качество группировок. В табл. 3 показано, что для пяти групп начальное разбиение, полученное по оптимальной последовательности признаков, лучше, чем по минимальным корреляциям.

Этот результат имеет самостоятельное значение, если экстремальная группировка по критерию «квадрат» не применяется.

В табл. 4 также показано, что для 4-й и 5-й групп экстремальная группировка по критерию «модуль» не улучшила начальное разбиение. В этом случае разбиение, полученное по оптимальной последовательности признаков, также имеет самостоятельное значение, т.к. сразу формирует окончательную группировку. Отметим, что в данном случае оптимальная последовательность формирует множество признаков, наиболее адекватно соответствующих предположению о наименьшей коррелированности.

**Таблица 1**

**Группировки экономических показателей по критерию  $I_Q$**

Число групп	Мин. корр.	Представители	Группы	Опт. послед.	Представители	Группы
3	7	7	<b>7 8 13</b>	8	2	<b>2 8</b>
	11	11	<b>5 11 12</b>	5	5	<b>5 11</b>
	6	10	1 2 3 4 <b>6 9</b> <b>10</b>	13	3	1 3 4 6 7 9 10 12 <b>13</b>
5	8	8	<b>8</b>	8	8	<b>8</b>
	5	5	<b>5</b>	5	5	<b>5</b>
	7	7	<b>7 13</b>	13	13	<b>7 12 13</b>
	6	10	1 2 3 4 <b>6 9</b>	9	10	1 2 3 4 6 <b>9 10</b>
	11	11	<b>10</b> <b>11 12</b>	11	11	<b>11</b>

**Таблица 2**

**Группировки экономических показателей по критерию  $I_M$**

Число групп	Мин. корр.	Представители	Группы	Опт. послед.	Представители	Группы
3	6	10	1 2 3 4 <b>6 9 10</b>	10	1	<b>1 2 3 4 6 9 10 12 13</b>
	7	7	<b>7 8 13</b>	8	7	<b>7 8</b>
	11	11	<b>5 11 12</b>	5	5	<b>5 11</b>
4	6	10	1 2 3 4 <b>6 9 10</b>	10	10	1 2 3 4 6 9 <b>10</b>
	7	7	<b>7 8 13</b>	8	8	<b>8</b>
	5	5	<b>5</b>	5	5	<b>5 11</b>
	11	11	<b>11 12</b>	13	13	<b>7 12 13</b>
5	6	10	1 2 3 4 <b>6 9 10</b>	10	10	1 2 3 4 6 9 <b>10</b>
	8	8	<b>8</b>	8	8	<b>8</b>
	5	5	<b>5</b>	5	5	<b>5</b>
	7	7	<b>7 13</b>	13	7	<b>7 13</b>
	11	11	<b>11 12</b>	12	11	<b>11 12</b>

**Таблица 3**

**Качество группировок по критерию  $I_Q$**

Число групп	Мин. корреляции		Опт. последовательность	
	Начальное разбиение	Результат	Начальное разбиение	Результат
3	5,1537	7,1308	3,5312	6,4304
5	7,0055	8,8924	<b>7,1196</b>	8,8002

Таблица 4

**Качество группировок по критерию  $I_M$** 

Число групп	Мин. корреляции		Опт. последовательность	
	Начальное разбиение	Результат	Начальное разбиение	Результат
3	9,0739	9,0739	8,5066	8,8205
4	9,7296	9,7296	9,9426	9,9426
5	10,521	10,521	<b>10,521</b>	10,521

**Заключение.** При решении задачи группировки возникает проблема содержательной интерпретации полученных факторов и групп признаков. Признаки, объединяемые в группы, обычно поддаются содержательной совместной интерпретации. Но факторы групп является синтетическими признаками, интерпретация которых может быть затруднена.

После выделения групп и построения факторов часто в каждой группе определяется ее представитель, как наиболее сильно коррелирующий с фактором группы признак. Такие представители позволяют содержательно интерпретировать группировку в терминах исходных признаков.

При таком подходе все преобразования, выполняемые в соответствии с факторной моделью, являются промежуточными, т.к. в итоге выбираются представители из исходных признаков.

В данной работе предложен подход, позволяющий выбрать подмножество из исходных признаков, способных адекватно представить скрытые факторы, не требуя построения собственных и центроидных направлений в качестве промежуточного этапа преобразований. Данный подход основан на построении оптимальной последовательности признаков. В начале такой оптимальной последовательности расположены наименее коррелированные друг с другом и с остальными признаками, а к концу последовательности выстраиваются все более коррелированные с остальными признаками, выбранные в последнюю очередь.

Предложенный подход позволяет формировать начальное решение для других алгоритмов группировки и может применяться самостоятельно для оценки числа групп и построения содержательных группировок.

**Список литературы**

1. Harman H.H. Modern Factor Analysis. 3<sup>rd</sup> ed. University of Chicago Press. 1976. 508 p.
2. Lawley D.N., Maxwell A.E. Factor Analysis as a Statistical Method. 2<sup>nd</sup> ed. London: Butterworth. 1971. 117 p.
3. Lumelskii V.Ya. Parameter Grouping on the Basis of the Square Coupling Matrix // Automation and Remote Control. 1970. №1. P. 117 – 127.

4. Cox T.F., Cox M.A.A. Multidimensional Scaling. 2<sup>nd</sup> ed. Chapman and Hall/CRC. 2000. 328 p.

5. Двоенко С.Д. Кластеризация множества, описанного парными расстояниями и близостями между его элементами // Сибирский журнал индустриальной математики. 2009. Т.12. №1. С.61 – 73.

6. Двоенко С.Д., Пшеничный Д.О. Устранение метрических нарушений в матрицах парных сравнений // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. Вып. 2. С. 96 – 104.

7. Двоенко С.Д., Пшеничный Д.О. О локализации отрицательных собственных значений в матрицах парных сравнений // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. Вып. 2. С. 94 – 102.

8. OECD Statistics - OECD, 2013-2014 [Электронный ресурс] URL: <http://stats.oecd.org/> (дата обращения 31.08.2016).

*Двоенко Сергей Данилович, д-р физ.-мат. наук, проф., [dsd@tsu.tula.ru](mailto:dsd@tsu.tula.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

*Пшеничный Денис Олегович, асп., [denispshenichny@yandex.com](mailto:denispshenichny@yandex.com), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

*Хандельянц Филипп Александрович, студент, [kratos679@gmail.com](mailto:kratos679@gmail.com), Россия, Тула, Тульский государственный университет*

#### FACTORLESS FEATURE GROUPING

*S.D. Dvoenko, D.O. Pshenichny, F.A. Khandeliants*

*There is a problem of group factors interpretation, since they appear to be synthetic features. Group representatives are usually defined as features most correlated with its group factors. Hence, groups are interpreted directly in terms of initial features. The new approach is proposed to specify features, which represent factors correctly without factors to be calculated themselves. This approach is based on the optimal sequence of correlation matrix minors. According to this approach, the initial partitioning for other algorithms can be defined. Also standalone results can be delivered for grouping and for number of groups evaluating.*

*Key words: grouping, cluster, metrics, correlation, eigenvalue, eigenvector, minor.*

*Dvoenko Sergey Danilovich, doctor of physic-mathematical science, professor, [dsd@tsu.tula.ru](mailto:dsd@tsu.tula.ru), Russia, Tula, Tula State University,*

*Denis Olegovich Pshenichny, postgraduate, [denispshenichny@yandex.com](mailto:denispshenichny@yandex.com), Russia, Tula, Tula State University,*

*Filipp Aleksandrovich Khandeliants, student, [kratos679@gmail.com](mailto:kratos679@gmail.com), Russia, Tula, Tula State University*

## СЕТЬ ХЭММИНГА И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РАСПОЗНАВАНИЯ ПОДПИСЕЙ

А.А. Ежов, А.С. Новиков

*Рассмотрена архитектура нейронной сети Хэмминга. Описан алгоритм обучения. Приведено описание программы, использующей сеть Хэмминга для решения задачи распознавания подписей. Продемонстрированы результаты распознавания подписей.*

*Ключевые слова: сеть Хэмминга, расстояние Хэмминга, сеть Хопфилда, нейронная сеть, синаптическая связь, распознавание образов.*

Нейронная сеть Хэмминга (Hamming Network) [1, 2] была предложена в 1987 г. Р. Липпманом. Она представляет собой релаксационную многослойную сеть с обратными связями между отдельными слоями. Сеть Хэмминга применяется в качестве ассоциативной памяти. При распознавании образов она использует в качестве меры близости расстояние Хэмминга. Весовые коэффициенты и пороги сети Хэмминга определяются из условия задачи, поэтому такая сеть является нейронной сетью с фиксированными связями. Ключевой особенностью данной сети является тот факт, что она выдает на выходе не сами значения эталонного вектора, который в наибольшей мере похож на входной, а номер соответствующего эталонного образца.

Архитектура сети Хэмминга показана на рис. 1.

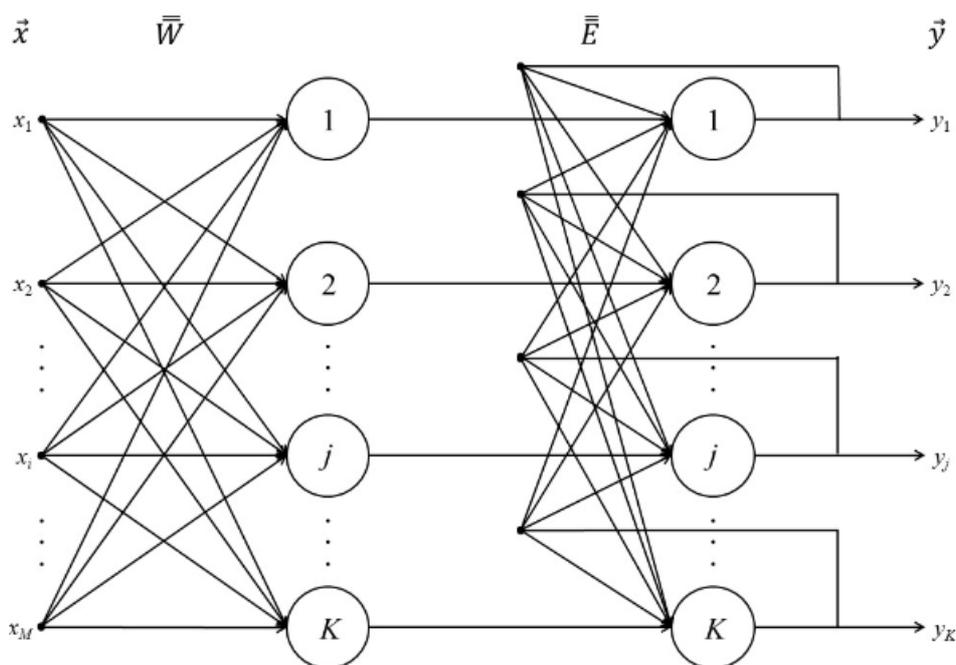


Рис. 1. Архитектура сети Хэмминга

Как видно из рис. 1, в сети имеется два слоя: первый является структурным компонентом сети прямого распространения, второй – компонентом сети Хопфилда. Сеть с прямыми связями вычисляет меру подобия между входным и эталонным образом, используя метрику Хэмминга. Сеть Хопфилда используется для разрешения возникающих конфликтов, когда входной образ является подобным нескольким эталонным образам, хранящимся в сети. При этом на выходе сети остается активным только один нейрон-победитель. Первый и второй слои состоят из  $K$  нейронов, при этом величина  $K$  равна количеству эталонных образов, запоминаемых сетью. Вектор  $\vec{X}$  ( $x_i, i=1,2,\dots,M$ ) определяет поданный на вход сети зашумленный образ. Значения входных переменных принадлежат множеству  $\{-1;1\}$ . Матрица  $W$  размерностью  $K \times M$  содержит величины синаптических связей сети прямого распространения, матрица  $E$  размерностью  $K \times K$  хранит значения синаптических связей нейронов сети Хопфилда. Функция активации нейронов – пороговая.

Общая постановка задачи, решаемой сетью Хэмминга, может быть следующей. Имеется исходный эталонный набор образов, предназначенный для обучения сети. Каждый из образов представлен в виде бинарного вектора и имеет соответствующий класс. Необходимо произвести сопоставление поданного на вход нейронной сети зашумленного образа со всеми эталонными паттернами и сделать вывод о его принадлежности к тому или иному классу, либо о невозможности его классификации.

Жизненный цикл сети Хэмминга состоит из двух основных этапов: обучение и практическое использование [3]. Ниже рассмотрим оба этих этапа подробнее.

**Обучение.** Процесс обучения сети Хэмминга сводится к выполнению следующей последовательности действий

1. Сформировать матрицу эталонных образов

$$Q = \begin{bmatrix} \vec{X}^1 \\ \vec{X}^2 \\ \dots \\ \vec{X}^K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_M^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_M^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1^K & x_2^K & \dots & x_M^K \end{bmatrix}. \quad (1)$$

2. С помощью полученной матрицы  $Q$  вычислить матрицу весовых коэффициентов  $W$  сети прямого распространения

$$w_{ij} = \frac{1}{2} q_{ij}; \quad i \in [1, K], \quad j \in [1, M]. \quad (2)$$

3. Определить вид активационной функции. В качестве функции активации для нейронных элементов сети Хопфилда может быть использована пороговая функция, определяемая в соответствии с выражением

$$f(z) = \begin{cases} 0, & z \leq 0, \\ z, & z > 0. \end{cases} \quad (3)$$

Пороговая величина нейронов Т определяется по формуле

$$T = \frac{M}{2}. \quad (4)$$

4. Задать значения синапсов обратных связей нейронов сети Хопфилда в виде матрицы Е, каждый элемент которой определяется в соответствии с выражением

$$e_{jp} = \begin{cases} 1, & j = p, \\ -\varepsilon, & j \neq p; \end{cases} \quad j \in [1, K], p \in [1, K], \quad (5)$$

где  $\varepsilon$  – абсолютное значение веса синаптической связи между нейронами сети Хопфилда, лежащее в интервале  $\varepsilon \in (0, \frac{1}{K}]$ .

Формула (5) имеет определенный смысл. Согласно ей вес обратной связи одного и того же нейрона с самим собой положителен и равен единице, а веса связей этого нейрона с остальными нейронами сети Хопфилда отрицательны и равны  $-\varepsilon$ . Таким образом, можно сказать, что эти нейроны соединены ингибиторными или тормозящими синапсами.

5. Установить максимально допустимое значение нормы разности векторов выхода сети  $E_{max}$  на двух последовательных итерациях. Обычно достаточно принять  $E_{max}=0,1$ .

**Практическое использование.** Распознавание неизвестного образа производится согласно следующим этапам.

1. На вход сети подать распознаваемый вектор  $\vec{X}^*$ .
2. Рассчитать состояния  $\vec{S}_1$  нейронов первого слоя по формуле

$$s_{1j} = \sum_{i=1}^M w_{ji} x_i^* + T; \quad j \in [1, K]. \quad (6)$$

3. Рассчитать значения выходов нейронов первого слоя  $\vec{Y}_1$ , используя в качестве аргумента функции активации (3) полученные в п. 2 значения состояний соответствующих нейронов.

4. Выходам нейронов второго слоя  $\vec{Y}_2$  присвоить полученные в п. 3 значения  $\vec{Y}_1$ . Эти значения будут использованы как начальные для инициализации итерационного процесса распознавания

$$\vec{Y}_2^{(0)} = \vec{Y}_1. \quad (7)$$

5. Организовать итерационный процесс, на каждом этапе которого рассчитываются новые значения состояний и выходов нейронов сети Хопфилда. Новые состояния нейронов  $\vec{S}_2^{(q+1)}$  рассчитываются по формуле

$$s_{2j}^{(q+1)} = y_{2j}^{(q)} - \varepsilon \sum_{\substack{p=1 \\ p \neq j}}^K y_{2p}^{(q)}; j \in [1, K]. \quad (8)$$

Новые значения выходов нейронов  $\vec{Y}_2^{(q+1)}$  вычисляются путем применения активационной функции (3) к вектору состояний  $\vec{S}_2^{(q+1)}$ .

6. Итерационный процесс в п. 5 повторяется до выполнения условия стабилизации

$$\left\| \vec{Y}_2^{(q+1)} - \vec{Y}_2^{(q)} \right\| \leq E_{\max}. \quad (9)$$

В результате выполнения всех этих этапов на выходе сети в идеальном случае должен получиться вектор с одним положительным и всеми остальными нулевыми элементами. Индекс положительного элемента укажет номер эталонного образа, в наибольшей мере соответствующего входному сигналу. Но, как часто бывает, входной образец может быть очень сильно зашумлен, и на выходе сети могут появиться несколько положительных значений. В таком случае обычно считают, что сети не удалось однозначно классифицировать входной образ.

**Использование сети Хэмминга для решения задачи распознавания подписей.** Сеть Хэмминга может быть использована для решения задачи распознавания подписей. Сначала сети для обучения предъявляются эталонные подписи, представленные в виде бинарных векторов. После того, как на основе предъявленных образцов будут рассчитаны коэффициенты матрицы  $W$  и порог  $T$ , на вход сети подается неизвестный образец подписи и начинается итерационный процесс распознавания, завершающийся после выполнения условия стабилизации (9).

Перед тем, как обучить сеть на эталонных образах, необходимо провести предварительный анализ исходных изображений с целью их преобразования в бинарные вектора, так как сеть Хэмминга работает только с ними.

Преобразование изображения в бинарный вектор можно осуществить по принципу скользящего окна: имеется окно, перемещающееся по всему изображению подписи сверху вниз и анализирующее определенные его участки путем подсчета количества темных пикселей. Для того, чтобы определить, является ли текущий анализируемый пиксель темным, необходимо выполнить преобразование в оттенки серого по формуле [4]

$$Y' = 0,3R + 0,59G + 0,11B, \quad (10)$$

где  $Y'$  – полученное значение пикселя в градациях серого (0-255);  $R, G, B$  – соответствующие цветовые компоненты анализируемого пикселя.

После того, как было получено значение  $Y'$ , необходимо сравнить его с некоторым пороговым значением  $P$  и проверить следующие условия.

1. Если  $0 \leq Y' \leq P$ , то соответствующий пиксель считать темным.

2. Если  $Y' > P$ , пиксель считать светлым. В системе используется значение  $P=90$ .

Количество «прыжков»  $v$  (по сути равное количеству элементов  $M$  бинарного вектора), которое должно проделать скользящее окно, для того, чтобы проанализировать все изображение, будет определяться размером самого окна  $r$  и высотой  $h$  исходного изображения

$$v = \frac{h}{r}. \quad (11)$$

В данном случае  $h=160$  (используются изображения размером  $160 \times 160$  пикселей), тогда величина  $v$  будет определяться согласно формуле

$$v = \frac{160}{r}. \quad (12)$$

Меняя размер окна  $r$ , можно будет изменять точность анализа изображения. Например, если  $r=1$ , то будет проанализирована каждая строка изображения и рассчитано количество темных пикселей в ней, а если  $r=4$ , то будет проанализировано каждые 4 строки изображения и уже в этом объеме данных вычислено количество темных пикселей. При каждом  $i$ -ом перемещении скользящего окна по изображению подписи должно быть определено соответствующее количество темных пикселей  $N_i$ .

После того, как будет проанализировано все изображение, потребуется выполнить последний этап – преобразовать полученные значения  $N_i$  подписи в соответствующий бинарный вектор. Для того, чтобы определить, какое значение (1 или -1) необходимо поставить в соответствие той или иной величине  $N_i$ , необходимо сравнить её с пороговой величиной  $L$ .

1. Если  $N_i \geq L$ , то  $i$ -му элементу бинарного вектора подписи присваивается значение «1».

2. Если  $N_i < L$ , то  $i$ -му элементу бинарного вектора подписи присваивается значение «-1».

Таким образом, для всех эталонных подписей можно определить соответствующие им бинарные вектора, которые в дальнейшем будут использованы для обучения сети и распознавания неизвестных образцов.

Для реализации описанного выше механизма была разработана и отлажена программа распознавания подписей, в основе которой лежит сеть Хэмминга. Главное окно программы показано на рис. 2.

На рис. 3 показано окно распознавания подписи.

На рис. 4 показаны образцы эталонных подписей, используемых для обучения сети.



Рис. 2. Главное окно программы распознавания подписей

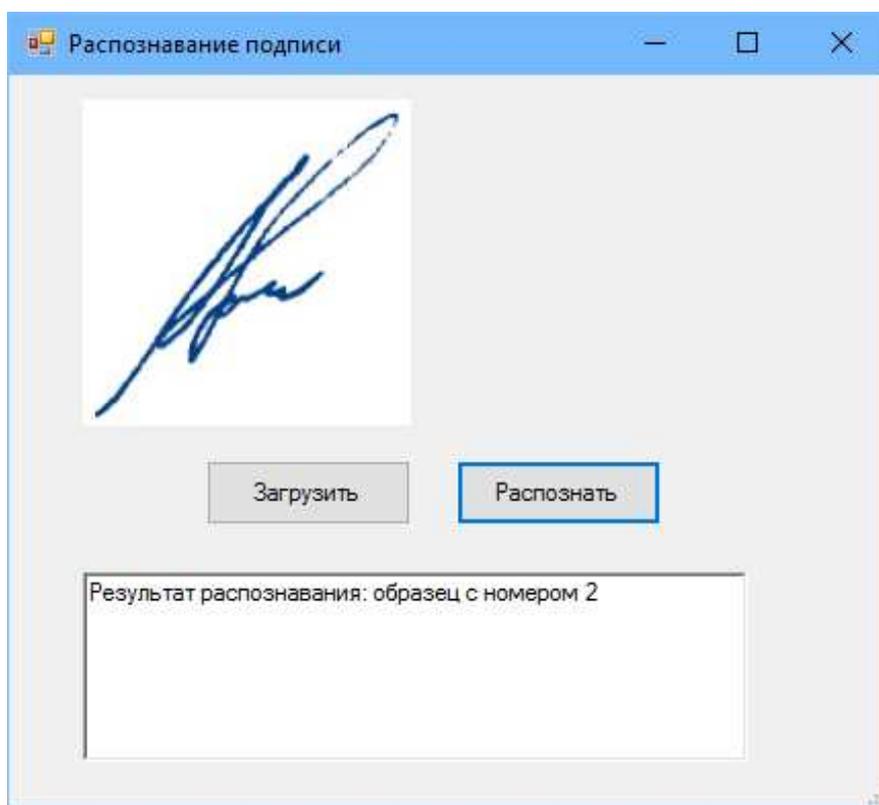


Рис. 3. Окно распознавания подписи



Рис. 4. Подписи, используемые для обучения сети

Сеть Хэмминга обучалась на подписях рис. 4 при варьировании двух основных параметров: размера скользящего окна  $r$  и пороговой величины  $L$ . Эффективность распознавания неизвестных образцов проверялась на подписях, показанных на рис. 5.

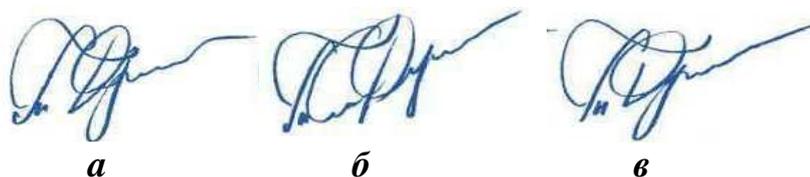


Рис. 5. Подписи для тестирования сети

Как видно из рис. 5, подписи 5, а, 5, б и 5, в являются вариациями эталонной подписи 4, в.

Результаты проведенных экспериментов сведены в таблицу. В данной таблице символ «х» означает, что сети не удалось классифицировать входной образец.

### Результаты распознавания подписей сетью Хэмминга

№ п/п	Параметры окна		Результаты распознавания		
	$r$	$L$	Подпись		
			рис. 5, а	рис. 5, б	рис. 5, в
1	2	5	+	+	+
2	4	10	+	+	+
3	6	15	+	+	+
4	8	20	+	+	+
5	10	25	+	+	+
6	12	30	+	+	+
7	14	35	+	+	+
...					
20	40	100	+	х	+
...					
30	60	150	х	х	х

Как видно из таблицы, параметры  $r$  и  $L$  изменялись по линейным законам

$$r = 2x, L = 5x. \quad (13)$$

Всего было проведено 30 экспериментов. При использовании одних комбинаций этих параметров для обучения сети результаты распознавания полностью совпадали с ожидаемыми, в случае использования других ком-

бинаций на выходе сети формировалось несколько положительных значений, что делало невозможным точную классификацию входного образа. Это, очевидно, можно объяснить тем, что при использовании той или иной пары параметров  $r$  и  $L$  формировалась матрица эталонных образов  $Q$ , в которой все строки достаточно мало отличались друг от друга, поэтому поданный на вход образец не мог быть отнесен к какому-либо одному классу. Для того, чтобы добиться корректного распознавания сетью подаваемых образцов, необходимо экспериментально выявлять оптимальные параметры обучения, благодаря которым в матрице  $Q$  строки будут хорошо отличаться друг от друга.

В конечном счете, можно установить, что при выборе аргумента  $x$  на интервале  $[1, 7]$  для расчета параметров обучения  $r$  и  $L$  по формуле (13) результаты решения поставленной задачи распознавания заданных подписей будут демонстрировать эффективную работу обученной сети Хэмминга. В случае использования других значений аргумента для заданных линейных зависимостей могут наблюдаться ошибки распознавания и неустойчивости выходов сети. Чтобы это исключить, можно экспериментально проверить эти значения, обучая сеть, или выбрать другие зависимости, а затем проверить вычисленные по этим зависимостям параметры.

### Список литературы

1. Головкин В.А. Нейронные сети: обучение, организация и применение. Кн. 4: учеб. пособие для вузов / под общ. ред. А.И. Галушкина. М.: ИПРЖР, 2001. 256 с.
2. Нейронная сеть Хэмминга [Электронный ресурс] // Wikipedia: свободная энциклопедия: [сайт]. [2016]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Нейронная\\_сеть\\_Хемминга](https://ru.wikipedia.org/wiki/Нейронная_сеть_Хемминга) (дата обращения: 30.09.2016).
3. Нейронные сети Хэмминга [Электронный ресурс] // Портал искусственного интеллекта: [сайт]. [2015]. URL: <http://neuronus.com/nn/38-theory/971-nejronnye-seti-khemminga.html> (дата обращения: 30.09.2016).
4. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2012. 1104 с.

*Ежов Александр Александрович, магистр, [san4o.lexter2011@yandex.ru](mailto:san4o.lexter2011@yandex.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

*Новиков Александр Сергеевич, канд. техн. наук, доц., [thesis-tsu@yandex.ru](mailto:thesis-tsu@yandex.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет*

**HAMMING NETWORK AND ITS APPLICATION TO SOLVE THE PROBLEM OF  
RECOGNITION OF SIGNATURES**

*A.A. Ezhov, A.S. Novikov*

*The architecture of the neural network of the Hamming, described learning algorithm, a description of the program, which uses Hamming network to solve the problem of recognition of signatures, demonstrated recognition of signatures.*

*Key words: the Hamming network, Hamming distance, Hopfield network, neural network, synaptic communication, pattern recognition.*

*Ezhov Alexander Alexandrovich, master, [san4o.lexter2011@yandex.ru](mailto:san4o.lexter2011@yandex.ru), Russia, Tula, Tula State University,*

*Novikov Alexander Sergeyeovich, candidate of technical sciences, docent, [thesis-tsu@yandex.ru](mailto:thesis-tsu@yandex.ru), Russia, Tula, Tula State University*

УДК 681.3.07

## **ДУАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ФОРМИРОВАНИЮ ВНУТРЕННИХ ОБРАЗОВ ПРИ ВОСПРИЯТИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ИСКУССТВЕННЫМИ ЖИВЫМИ МАШИНАМИ**

Е.А. Семенчев

*Рассматривается один из возможных подходов к формированию внутренних образов внешних полей интеллектуальными беспилотными машинами методом декомпозиции по двойственным парам. Данный подход способен осуществлять анализ и контроль потребностей объекта в процессе функционирования, например, потребности в собственной безопасности. Предложена схема концептуальной модели подсистемы формирования образов внешних объектов.*

*Ключевые слова: двойственная пара, декомпозиция по двойственным парам, автономные машины, самосохранение, образы полей объектов.*

Наличие подсистемы самосохранения в автономных искусственных живых машинах (ИЖМ) обусловлено естественной необходимостью обеспечивать своевременную и адекватную реакцию на опасные изменения в окружающей среде и во внутреннем состоянии. Особенно, если возникающая ситуация способна нарушить функционирование или привести к полному разрушению машины или окружающих объектов во время выполнения поставленной задачи.

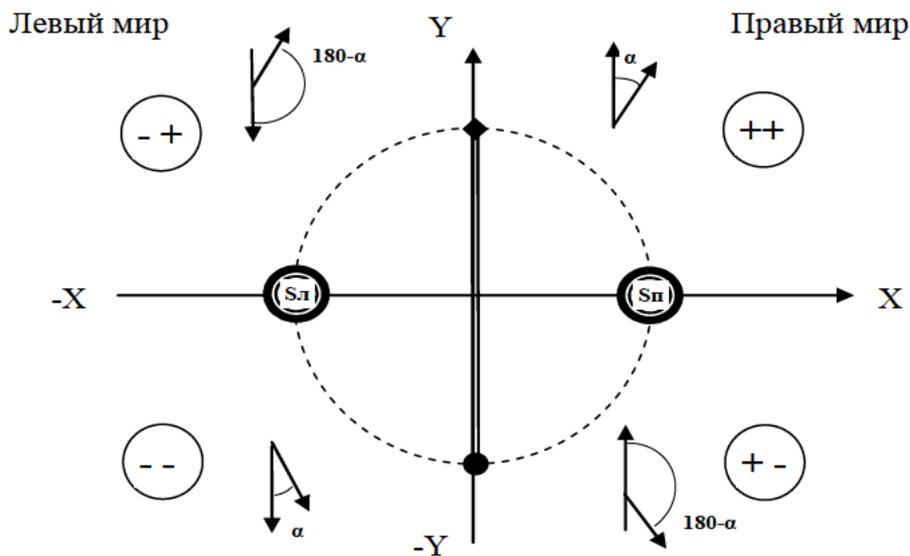
Как показано в [1], метод декомпозиции по двойственным парам является одним из универсальных подходов к изучению и построению внутренней организации ИЖМ. В данной работе предложен возможный подход к формированию ИЖМ внутренних образов внешних объектов, обладающих электрическими и магнитными полями. основанный на методе декомпозиции объектов по двойственным парам (ДП).

**1. Принцип построения электромагнитной сенсорной системы ИЖМ.** Для реализации в ИЖМ функций по оперированию внешними объектами и способности адекватно реагировать на изменения состояний окружающей среды необходимы разнообразные сенсорные системы восприятия информации, способные выделять из окружающей среды полезную информацию и формировать интегральную оценку наблюдаемого процесса или явления в целях обнаружения объекта, обладающего, например, необходимым энергетическим ресурсом, определения его пространственно-временных характеристик и свойств.

Наличие в ИЖМ сенсоров, чувствительных к определенным свойствам энергетического ресурса, позволяет достаточно точно определять пространственно-временные характеристики источника энергетического ресурса и сформировать необходимые действия .

Применим метод декомпозиции по двойственным парам для построения организации информационно-сенсорной системы обнаружения энергетического ресурса и измерения его пространственно-временных характеристик (относительного расположения, расстояния, скорости перемещения и т.п.).

В соответствии с методом декомпозиции мультидвойственных пар (ДМП) принимается, что ИЖМ обладает своей плоскостью симметрии. Совместим плоскость  $ZOY$  трехмерной системы координат с плоскостью симметрии ИЖМ. Таким образом, плоскость  $ZOY$  данной системы координат ИЖМ делит окружающий мир на правую и левую половины (рис. 1).



**Рис. 1. Двойственная пара сенсоров электростатического поля**

Целесообразно соответственно расположить сенсоры, воспринимающие, например, электростатические сигналы, на каждой такой половине (правый и левый). Таким образом, орган восприятия информации будет

дуалистичен по построению и представлен в общем случае двумя группами (правой и левой) чувствительных элементов (анализаторами), которые в совокупности входят в сложную информационную систему. Для работы в «стереорежиме» ИЖМ использует два электростатических анализатора с левым и правым чувствительными элементами (антеннами).

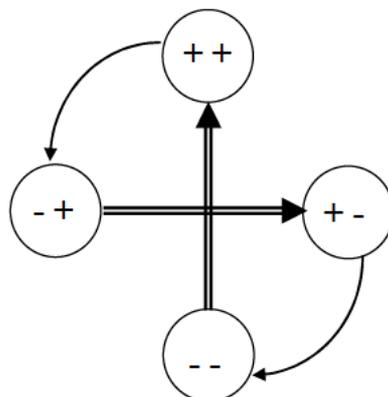
Оси системы координат образуют крест, каждая перекладина которого содержит двойственную пару чисел:  $(\langle -X, 0 \rangle, \langle 0, X \rangle)$  и  $(\langle -Y, 0 \rangle, \langle 0, Y \rangle)$ . Каждая пара этих чисел характеризует отношение типа «X – Y» и может быть ассоциирована с местоположением источника электростатического поля (ИЭП): «впереди – слева», «впереди – справа», «сзади – слева», «сзади – справа».

Разместим сенсоры электростатического поля (ЭП)  $S_l$  и  $S_p$  по оси «-X, X» симметрично относительно начала координат, (см. рис. 1).

Очевидно, что эти сенсоры образуют внешнюю двойственную пару, связанную общей «перекладиной». Эти сенсоры вместе с «перекладиной» можно условно рассматривать в качестве весов, взвешивающих потенциал ЭП, действующий на каждый сенсор. Другую перекладину разместим в другом измерении, т.е. по оси  $Y$ . Эта перекладина, связанная с серединой первой, будет играть роль стрелки, указывающей направление на объект, создающий ЭП. Точку опоры ассоциируем с началом координат.

Всякий раз, когда нарушается баланс весов левого и правого сенсоров из-за смещения источника ЭП в правом или в левом мирах, возникает сила, направленная на восстановление балансных отношений. При фиксированном расстоянии между сенсорами  $S_l$  и  $S_p$  балансные отношения восстановятся либо путем поворота сенсорной пары на угол, при котором «стрелка весов» совпадет с направлением на источник ЭП, либо изменением соотношения плеч весов. В последнем случае образ объекта будет фиксироваться либо ближе к правому сенсору, либо ближе к левому сенсору.

Таким образом, будем иметь крест отношений, отражающий эволюцию двух асимметричных двойственных пар, взаимодействующих и синхронизированных друг с другом (рис. 2).



**Рис. 2. Эволюция отношений свойств двойственных пар по правилу креста**

В этой эволюции можно выделить четыре типа основных событий: «ИЭП впереди – справа», «ИЭП впереди – слева», «ИЭП сзади – справа», «ИЭП сзади – слева». На каждом этапе эволюции присутствует двойственность, т.е. имеет место группировка всех элементов в две взаимодополнительные группы. При переходе от квадранта «++» к квадранту «-+» происходит зеркальное отражение вокруг вертикальной оси (С – инвариантность). Выполняется закон сохранения «заряда». Здесь эволюционный поток двойственного отношения знака не меняет. При переходе от квадранта «-+» к квадранту «+-» начинает действовать другой закон – закон сохранения «четности» (Р - инвариантность). Этот закон изменяет знак (или спин) эволюционного потока на противоположный. Восприятие ЭП происходит в другой ортогональной зоне. Вследствие изменения действующего на сенсоры знака потенциала ЭП (силы) происходит инверсия восприятия. Источник ЭП воспринимается как находящийся сзади. Далее процесс повторяется в обратном порядке.

Разумеется, аналогичные построения будут справедливы и для вертикальной плоскости, проходящей через сенсоры  $S_l$  и  $S_p$ . В этом случае будем иметь уже не крест, а куб закона изменения свойств двойственного отношения. Сенсорная система будет уже работать в «3D – режиме».

**2. Функционально-структурная организация подсистемы восприятия электростатических образов ИЖМ.** Предположим, что источником энергии для ИЖМ является электричество. Каждый электрический источник энергии формирует в окружающем пространстве электростатическое поле, обладающее определенными физическими свойствами. ЭП в данной точке характеризуется физической величиной – напряженностью  $E$ , которая обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника энергии до данной точки и потенциалом  $\Phi$ , который обратно пропорционален расстоянию до источника энергии. Для этих величин можно записать соотношения

$$E = k \cdot \frac{1}{r^2}, \quad \Phi = k \cdot \frac{1}{r},$$

где  $k$  – коэффициент преобразования;  $r$  – расстояние от ИЭП до данной точки.

Эти величины можно, например, принять за свойства, на которые способны реагировать сенсоры ИЖМ.

Эквипотенциальные линии вокруг двух точечных зарядов, представленные на рис. 3, являются кривыми четвертого порядка и представляют собой софокусные овалы Кассини [2]:

$$(x^2 + y^2)^2 - 2c^2(x^2 - y^2) = a^4 - c^4,$$

где  $c$  – полуфокусное расстояние ( $c = OJ_1$ );  $a$  – параметр, который связан с соотношением  $NJ_1NJ_2 = a^2$  (здесь точка  $N$  принадлежит овалу Кассини).

С точки зрения инженерной практики важно по одной заданной точке  $N$  и установленному положению зарядов ( $Z_1=J_1$  и  $Z_2=J_2$ ) определить прохождение эквипотенциальной линии как линии равного потенциала из всего семейства овалов Кассини. В связи с этим геометрическая задача сводится к определению параметра  $a$ .

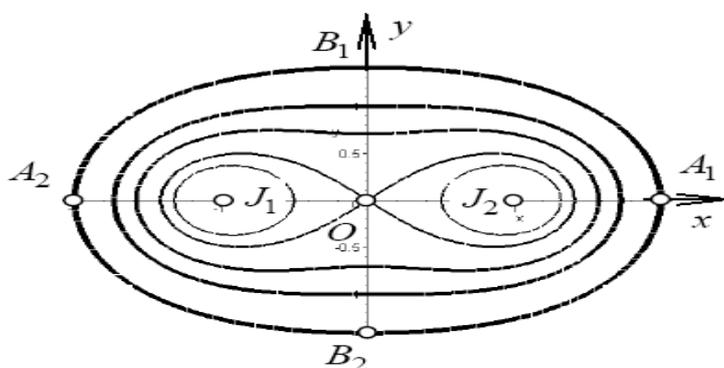


Рис. 3. Линии электростатического поля двух разноименных зарядов

Так как параметр  $a$  определяет одну эквипотенциальную поверхность, то значение напряженности пропорционально параметру  $a$ :

$$E = kpr \cdot a ,$$

где  $kpr$  – коэффициент преобразования.

Сформированные линии электростатического поля служат шаблоном для дальнейшего распознавания ИЭП.

Электростатические характеристики, получаемые в разные моменты времени от левого и правого сенсоров ИЖМ, используются для формирования некоторой «картинки» (образа) силовых линий ЭП в тот или иной момент времени, полученной посредством возможностей автономной информационно-измерительной системы анализаторов (АИСО) ИЖМ.

Если предположить, что сенсоры ИЖМ могут быть подвижны относительно системы координат ИЖМ, то на каждый момент времени эти образы будут представлены значениями в точках, в которых анализаторы способны их измерить. Совокупность таких точек и значение характеристик ЭП в них и будут составлять образы, представленные на рис. 4.

Диапазон восприятия сенсоров отождествляется с двойственной парой, играющей роль шкалы измеряемого свойства ЭП, например, потенциала ИЭП. Ее можно представить как шкалу некоторого чувства анализаторов активного объекта, которое дает «ощущение» интенсивности принятого сигнала – является ли сигнал слабым или, наоборот, достаточно мощным.

На данной шкале минимуму соответствует точка  $\Phi_{\min}$  – порог чувствительности анализаторов ИЖМ, а максимуму – точка  $\Phi_{\max}$  (рис. 5).

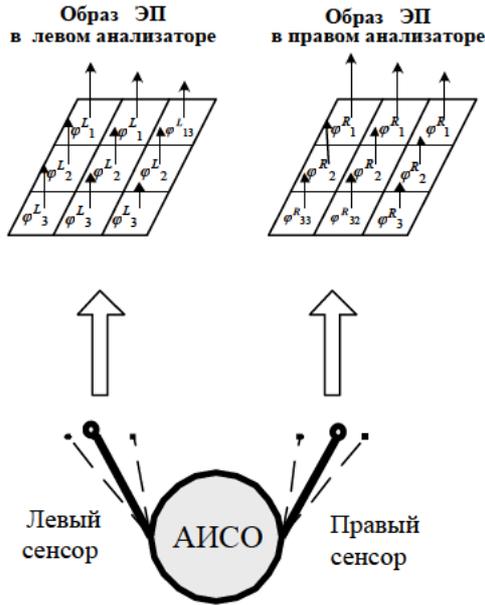


Рис. 4. Формирование образов электростатического поля анализаторами ИЖМ

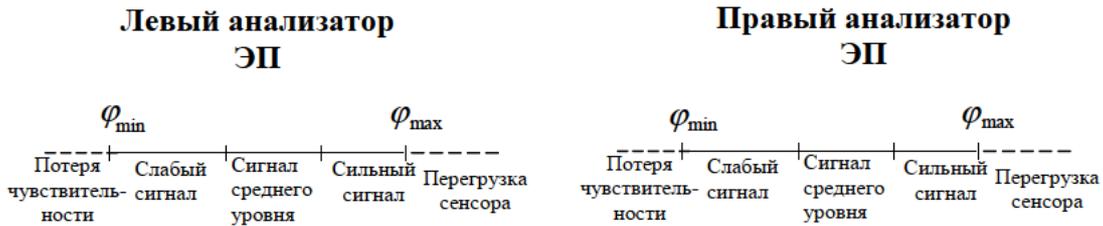


Рис. 5. Шкала чувствительности ИЖМ к электрическому полю

В большинстве случаев полученные образы отличаются друг от друга. Это происходит из-за того, что сенсоры ИЖМ расположены на некотором расстоянии друг от друга. А так как потенциал ЭП обратно пропорционален расстоянию, то и измерения правого и левого анализатора различны. Эти различия используются для определения направления на источник энергии. Они будут эквивалентны только в том случае, если источник электростатического поля находится в плоскости симметрии ИЖМ, т.е.  $\Delta\varphi = 0$ . В противном случае для определения местоположения ИЭ необходимо активизировать связанные с эффекторами ИЖМ процедуры ликвидации несимметрии электростатических образов.

В момент наибольшего баланса левого и правого образов ИЭ (ось  $Y$  направлена на ИЭП) образы подвергаются преобразованию и из двух образов с внешней двойственностью формируется единый образ ИЭП с внутренней двойственностью. Для этого момента времени вычисляются пространственно-временные характеристики ИЭ.

В дальнейшем единый образ ИЭП масштабируется и сравнивается со среднестатистическим образом (шаблоном), хранящемся в памяти ИЖМ. Если подходящего образа в памяти не находится, накапливается информация о вновь поступивших образах, выделяется новый шаблон, который и запоминается в памяти вместе с дополнительной информацией, ассоциированной с данным образом.

На изложенной принципиальной основе для решения задач формирования, распознавания и обработки электростатических образов и сигналов автономным объектом была разработана функциональная структура, укрупненная схема которой представлена на рис. 6.

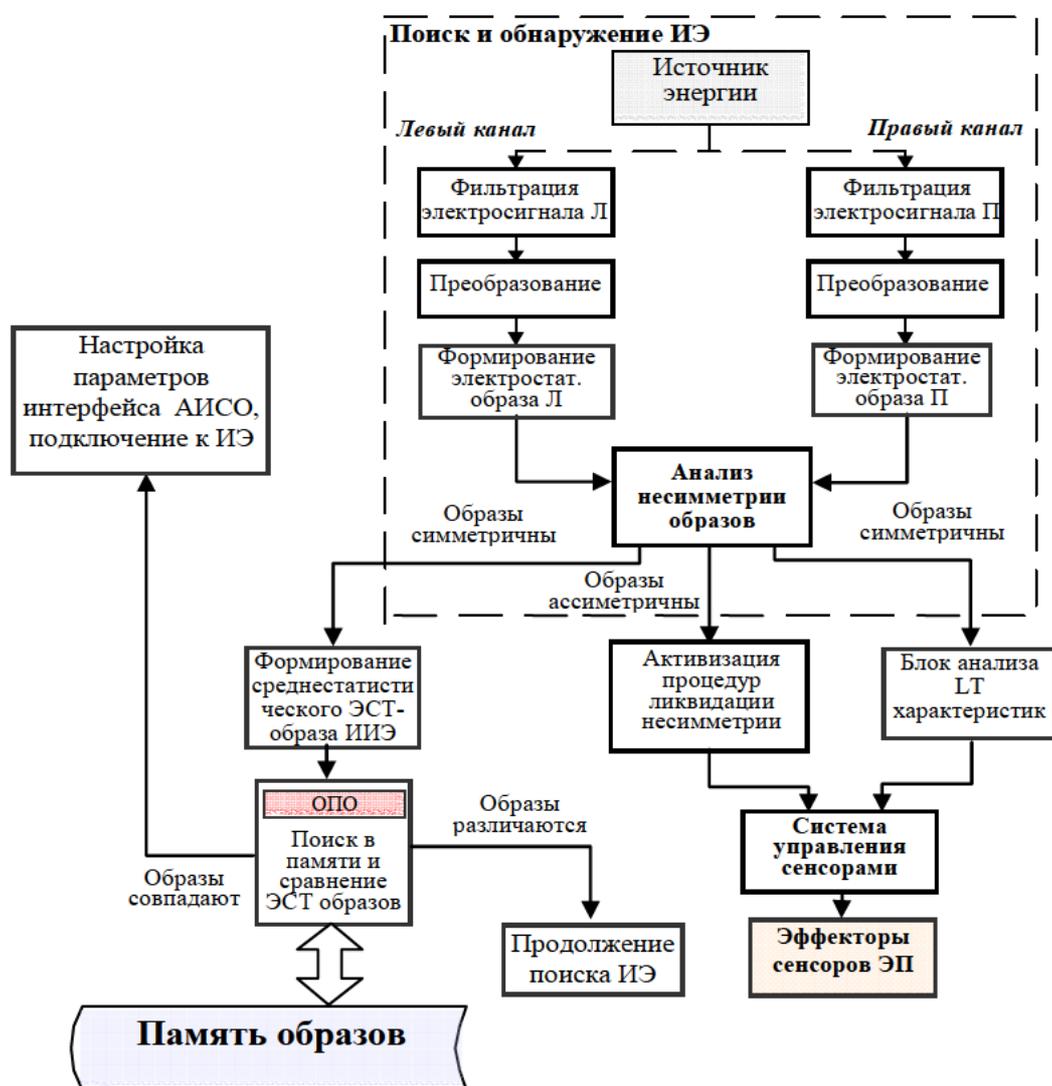


Рис. 6. Общая схема построения образа источника электростатического поля в ИЖМ

На входе такой системы располагаются блоки фильтров, которые пропускают сигналы рабочего диапазона на соответствующие анализаторы. Нижней границей рабочего диапазона является порог чувствительно-

сти сенсоров, а верхней – максимально возможное значение воспринимаемого сигнала. Фильтры выделяют из общего фона и фиксируют те сигналы, характеристики которых укладываются в определенный диапазон и изменяются за определенный промежуток времени (например, «скачком») по отношению к фону, реализуя тем самым функцию направленности «внимания». Если значение напряженности (потенциала) ниже порога чувствительности, то ИЖМ не анализирует ее.

После того, как сигнал пройдет сквозь систему фильтров, происходит его преобразование и накопление. Затем, по полученному сигналу формируется зеркально симметричная пара кадров электростатических образов предполагаемого источника энергоресурса ИЖМ.

В дальнейшем формируется единый образ объекта, который рассматривается как «отпечаток» структуры реального объекта в памяти ЭВМ. В данном случае реальным объектом является электростатическое поле. Таким образом, полученная картина является «чувственным» образом (отпечатком) этого ЭП.

После того, как местоположение предполагаемого ИЭП найдено, определяются его параметры. В дальнейшем полученный образ ИЭП распознается и запоминается в памяти, которая является частью базы знаний ИЖМ, где хранятся все интегральные образы объектов окружающей среды, а также их свойства и модели поведения.

Таким образом, в работе предложен единообразный подход к разработке сенсорных подсистем ИЖМ, основанный на использовании взаимодополнительных внешних двойственных элементов, ориентированных на восприятие двух и трехмерной информации. Разработанные алгоритмы восприятия и фиксации пространственно-временной информации (звуковой, видео и электростатической) и распознавания образов, внешних для ИЖМ объектов, основаны на «взвешивании» взаимодополнительных (двойственных) информационных образов по принципу рычажных весов.

### **Список литературы**

1. Семенчев Е.А. Системный анализ и синтез искусственных живых машин: двойственный аспект. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. 252 с.
2. Графский О.А. Анализ построения и моделирования электростатических полей. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2004. 264 с.

*Семенчев Евгений Александрович, канд. техн. наук, доц., [s1e2m3@mail.ru](mailto:s1e2m3@mail.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет*

*DUAL APPROACH TO FORMING THE INTERNAL IMAGE IN THE PERCEPTION OF ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS OF ARTIFICIAL LIVING MACHINES*

*One of the possible approaches to the formation of internal image of external fields intelligent unmanned machines decomposition method for dual pairs. This approach is able to analyze and control the object needs in the operation, for example, in their own security needs. The scheme kontseptulnoy model subsystems forming images of external objects.*

*Key words: dual pair, decomposition by dual pairs, stand-alone machines, self-preservation, images of fields objects.*

*Semenchev Evgeniy Aleksandrovich, candidate of technical sciences, docent, [s1e2m3@mail.ru](mailto:s1e2m3@mail.ru), Russia, Tula, Tula State University*

УДК 004.932

## **АЛГОРИТМЫ ВИДЕОАНАЛИТИКИ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИИ НЕШТАТНЫХ СИТУАЦИЙ**

В.Л. Токарев, Д.А. Абрамов

*Рассматривается задача математического обеспечения систем автоматического обнаружения и классификации нештатных ситуаций. Предложен вариант алгоритмического обеспечения системы, основным измерителем которой является видеокамера.*

*Ключевые слова: видеоаналитика, классификация нештатных ситуаций.*

В настоящее время существенно возрос интерес к построению информационно-измерительных систем, использующих видеокамеры в качестве источника измерительной информации. Широкое распространение подобных систем обусловлено резким падением цен на видеокамеры, ростом производительности вычислительных систем, а также развитием методов и алгоритмов обработки изображений, позволяющих обеспечить необходимую разрешающую способность.

Одной из наиболее социально значимых задач обработки видеоизображения является задача принятия решения в режиме реального времени о классе и виде нештатной ситуации (НС), появляющейся в контролируемой зоне. Решение этой задачи, основанное на автоматизации всех этапов принятия решения о классификации НС, позволит уменьшить влияние «человеческого» фактора на время выдачи соответствующего сообщения, а также повысить оперативность принятия мер по ликвидации последствий, причинённых НС.

Однако сложность ее решения, связанная с необходимостью использования методов распознавания образов, накопления и обработки больших объемов экспериментальных данных, а также учета большого числа различных факторов [1], заставляет искать другие подходы, отличающиеся меньшей вычислительной сложностью, и позволяющие оперативно получать оценку ситуации, складывающейся в контролируемой зоне.

В статье предлагается один из вариантов такого подхода, заключающегося в построении интеллектуальной мультиагентной системы, использующей предварительно созданные базы правил.

Основные требования к таким системам: 1) реагирование на появление НС должно быть в реальном масштабе времени; 2) критерием качества системы должен быть минимум ложных «срабатываний» при ограничении на количество пропуска нештатных ситуаций.

Один из вариантов структуры такой системы приведен на рис. 1.

Система содержит два основных модуля: видеоподсистему с модулем предварительной обработки изображений (ВПСМ) и модуль принятия решений (МПП).

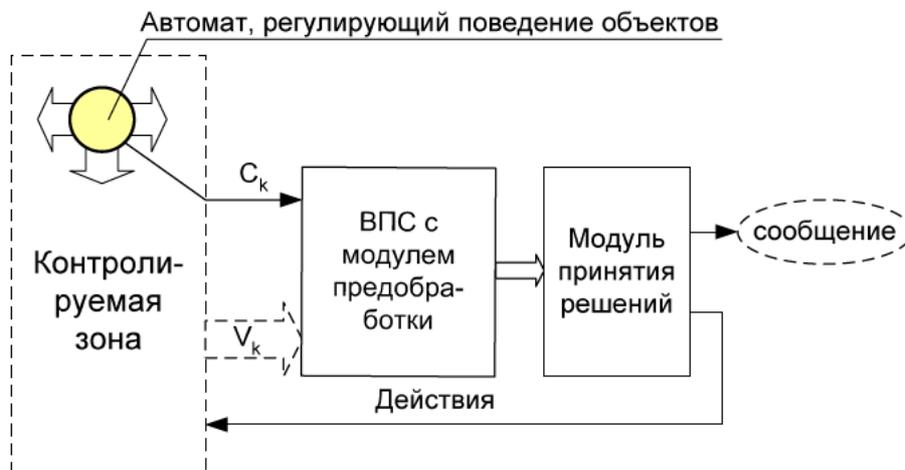


Рис. 1. Структура системы

Предполагается, что контролируемая зона имеет четко очерченные границы, движение различных объектов по ней может быть в обе стороны, число классов объектов – сравнительно небольшое (до 5 – 10), размеры зоны позволяют использовать для наблюдения всего одну видеокамеру.

Предварительная обработка получаемых от видеокамеры некоторой последовательности изображений, содержащейся в специальном буфере, организованном по принципу FIFO, заключается: 1) в выделении подвижных объектов, например, методом покадровых сравнений [2]; 2) в выделении из множества подвижных объектов интересующих объектов, например, методом сегментации [3] и сравнения площади сегментированной поверхности с площадями образов интересующих объектов; 3) в вычислении параметров движения интересующих объектов и некоторых признаков, характеризующих ситуации, появление которых возможно в контролируемой зоне.

Вся информация, вырабатываемая в ВПСМ, содержится в непрерывно обновляемой базе данных, из которой она извлекается модулем принятия решений. Работа модуля ВПСМ предполагает инициализацию, которая заключается в следующем.

1. Формируется начальная модель фона наблюдаемой сцены

$$B_0 = \bigcap_{j=1}^n I_j,$$

где  $I_{k-j}$  –  $j$ -е множество пикселей изображения наблюдаемой сцены;  $n$  – размер окна фильтрации изображений.

2. На фон накладывается маска, т.е. делается разметка наблюдаемой зоны  $Z$ , разграничивающая отдельные участки  $z_i$ , различающиеся правилами поведения в них подвижных объектов. Для этого каждый участок снабжается соответствующими атрибутами:  $z_i(\zeta_1^{(i)}, \zeta_2^{(i)}, \dots)$ , которые сохраняются в памяти базы правил модуля принятия решений.

3. Задаются множество  $\Sigma$  возможных ситуаций, для распознавания которых предназначается система, и их признаки  $\alpha = \{\alpha_1, \dots, \alpha_n\}$ .

В рабочем режиме модуля ВПСМ для каждого интересующего образа объекта  $h_j \in H_k$  различаются три фазы: 1) появление (рождение) образа  $h_j$  в наблюдаемой зоне; 2) сопровождение образа  $h_j$ ; 3) исчезновение (уход) образа  $h_j$ .

В фазе «появление»:

1) матрица фона периодически обновляется

$$B_k = B_{k-1} \cap \Phi \left( \bigcap_{j=k}^{k-n} I_j \right), \quad (1)$$

где  $k$  – текущий момент дискретного времени;  $\Phi$  – оператор медианной фильтрации;

2) выделяется множество подвижных объектов  $F_k$  методом вычитания фона  $\Omega_k = I_k - B_k$  и последующей фильтрации результатов;

3) из множества  $\Omega_k$  выделяется множество  $H_k$  интересующих объектов следующим образом.

В каждой полученной матрице  $\Omega_k$  методом сегментации [3] выделяются объекты  $a_i(s_i)$ , основной характеристикой которых является относительная площадь  $s_i$ , которую занимает объект  $a_i(s_i)$  на наблюдаемой сцене. В базе правил ВПСМ хранятся шаблоны  $\hat{a}_i(\bar{s}_i) \in \Omega'$  и правила выделения интересующих объектов:

$$|s_i \nabla \bar{s}_i| \leq \delta \rightarrow a_i(s_i) = h_i \in H_k, \quad a_i(s_i) \in \Omega_k, \quad \hat{a}_i(\bar{s}_i) \in \Omega', \quad (2)$$

где знак  $\nabla$  означает симметрическую разность двух множеств пикселей, одно  $s_i$  – сегментированная область изображения, второе  $\bar{s}_i$  – область шаблона  $\hat{a}_i(\bar{s}_i) \in \Omega'$ ;

4) затем при наличии в множестве  $H_k$  нескольких образов  $h_i(s_i)$ , принадлежащих одному классу, т.е. которым соответствует один и тот же шаблон  $\hat{a}_i(\bar{s}_i) \in \Omega'$ , выполняется идентификация образов объектов, для того чтобы различать их поведение в наблюдаемой зоне. Для этого для каждой пары схожих образов определяются и последовательно сравниваются одни и те же параметры: форма сегментированных областей, цвет, яркость, направление движения и др. После нахождения параметра различия  $p_j$  сравнение прекращается и каждому образу присваивается свой идентификатор  $h_j(s_j, p_j)$ :

$$\left( h_j(s_j), h_m(s_m) \mid s_j \cong s_m \right) \xrightarrow{\Pi(p_j \neq p_m \in P)} j, \quad h_j(s_j, p_j) \in H_k, \quad (3)$$

где  $\Pi(p_i \neq p_j \in P)$  – процедура поиска различных параметров образа объектов  $h_j(s_j), h_m(s_m)$ .

Если же в матрице  $H_k$  нет схожих образов  $h_j(s_j), h_m(s_m) \mid s_j \cong s_m$ , этот этап опускается. Оба правила (1) и (2) выполняются до тех пор, пока в множестве  $\Omega_k$  не обнаружится ни одного нового объекта.

В фазе «сопровождение» каждому новому идентифицированному образу интересующего объекта назначается агент  $q(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$  с определенным набором атрибутов  $\alpha$ . Агент – программный модуль, реализующий алгоритм рефлексного типа с использованием модели [4]. Каждый агент  $q_j(\alpha^{(i)})$  вычисляет координаты нахождения соответствующего объекта в процессе движения в наблюдаемой зоне и определяются значения атрибутов  $\alpha$ .

Каждый атрибут  $\alpha_m^{(i)} \in \alpha$  отображает значение одного из признаков ситуации  $\sigma \in \Sigma$ , возможной в наблюдаемой зоне. Определяются и вычисляются значения этих атрибутов. Все признаки определяются по ограниченной последовательности изображений наблюдаемой сцены, обновляемой в реальном времени в режиме «скользящего окна».

Каждому агенту  $q_j(\alpha^{(i)})$  соответствует строка в таблице базы данных АГЕНТЫ, в столбцах таблицы размещаются значения атрибутов  $\alpha_m^{(i)}, m=1, \dots, n$  агентов. Эта база данных является источником входной информации для МПР.

В фазе «исчезновение (уход) объекта», которая наступает с момента, когда координаты агента выходят за пределы контролируемой зоны, агент возвращается в базу агентов, а соответствующая строка в базе данных АГЕНТЫ обнуляется.

В основе модуля принятия решений используется база знаний, включающая базу правил классификации нештатных ситуаций, которая в общем случае имеет вид

$$\rho_l: \exists k \exists b_j \in \beta_1 \left( q_j \left( \alpha_m^{(i)} \right) \alpha_m^{(i)}(k) \right) \rightarrow \sigma_l(k), \quad l=1,2,\dots,u; m \in \{1,\dots,n\}. \quad (4)$$

«Срабатывание» одного из этих правил происходит при получении значения ИСТИНА соответствующего предиката, что указывает на тип появившейся в момент времени  $k$  нештатной ситуации  $\sigma_k \in \Sigma$ .

Примером задач, решаемых подобными системами, может служить задача обнаружения и классификации НС, возникающих в контролируемой зоне в результате поведения некоторого множества интересующих объектов определенных классов (интересующих объектов), по результатам обработки последовательности видеоизображений, получаемой от подсистемы видеонаблюдения.

Задача формулируется следующим образом.

ВПСМ формирует из поступающего на вход видеопотока скользящее «окно» – последовательность кадров  $\{\omega_k, k=1,2,3,\dots,N\}$  (временной срез видеопотока) с изображениями контролируемой зоны.

Образ контролируемой зоны  $Z$  в видеопамяти ВПСМ предварительно разбит на три части (рис. 2):  $z_1, z_2, z_3$ . Зоны  $z_1$  и  $z_2$  предназначены для движения транспортных средств, зона  $z_3$  – для движения пешеходов.

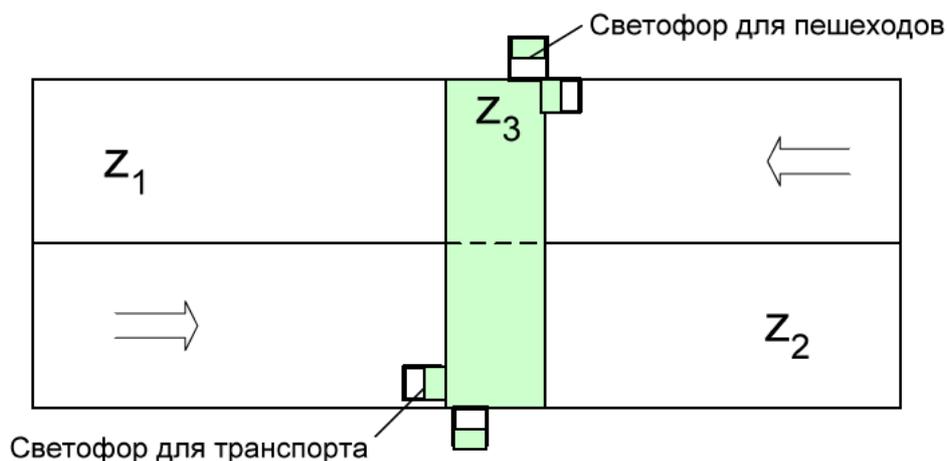


Рис. 2. Образ контролируемой зоны

Каждая зона снабжается следующим набором атрибутов:  $\zeta_1^{(i)}$  – допустимое направление движения в данной зоне, разрешенное ( $\zeta_2^{(i)}(k)=1$ ) или запрещенное ( $\zeta_2^{(i)}(k)=0$ ) движение в  $k$ -й момент времени в данной зоне. Значения атрибутов  $\zeta_2^{(i)}(k)$  определяются регуляторами

$$\zeta_2^{(i)}(k) = \begin{cases} 1, & \text{если } C_k^{(i)} = 1, \\ 0, & \text{если } C_k^{(i)} = 0, \end{cases}$$

где  $i$  – идентификатор класса интересующих объектов;  $C_k^{(i)}$  – сигнал от автомата, регулирующего поведение интересующих объектов (светофора):  $C_k^{(i)} = 1$  – движение разрешено,  $C_k^{(i)} = 0$  – движение запрещено.

На последовательности кадров  $\{\omega_k, k = 1, 2, 3, \dots, N\}$ , составляющих «окно» в ВПСМ, выделяется множество подвижных объектов  $A_k = \{a_i, i = 1, \dots, m_k\}$ , методом сегментации и сравнения получаемых площадей с площадями шаблонов проекций объектов выделяется подмножество интересующих объектов  $H_k = \{h_j, j = 1, \dots, l_k\} \subseteq A_k$ . Здесь  $j$  идентификатор объекта. Последовательность  $\{\omega_k, k = 1, 2, 3, \dots, N\}$  хранится в некотором FIFO-буфере, содержимое которого с каждым дискретным моментом времени  $k$  обновляется на граничных участках.

Множество интересующих объектов  $H$  разбивается на два класса:  $\beta_1$  – средства легкового и грузового транспорта и  $\beta_2$  – пешеходы,  $H = \beta_1 \cup \beta_2$ . Для каждого класса определены правила допустимого поведения в наблюдаемой зоне  $Z$ .

В первых двух зонах  $z_1, z_2 \in Z$  (рис .2) на каждой из них для  $h_j \in \beta_1$  разрешено движение только в одну сторону (это правило  $r_{\beta_1}^{(1)}$ ) со скоростью, не превышающей допустимую  $\max_{h_j \in \beta_1} v_{\beta_1}$  (это правило  $r_{\beta_1}^{(2)}$ ), и на расстоянии одного объекта от другого не меньше допустимого  $\min_{h_j \in \beta_1} d_{\beta_1}$  (это правило  $r_{\beta_1}^{(3)}$ ); при этом не пересекать третью часть зоны  $z_3$ , ограничивающей пешеходный переход зон  $z_1$  и  $z_2$ , при запрещающем (красном) сигнале светофора (это правило  $r_{\beta_1}^{(4)}$ ). В третьей зоне  $z_3$  разрешено объектам  $h_j \in \beta_2$  движение в обоих направлениях, но только при разрешающем (зеленом) сигнале светофора (это правило  $r_{\beta_2}^{(1)}$ ); запрещено движение в поперечном направлении по зонам  $z_1$  и  $z_2$  при любом сигнале светофора (это правило  $r_{\beta_2}^{(2)}$ ).

Для каждой НС определяется соответствующее правило:

$r_1$  – появление в зоне  $z_1$  или  $z_2$  объекта  $h_j \in \beta_1$  с атрибутом нарушения правил:

$$\rho_1: \exists k \exists h_j \in \beta_1 \left( q_j \left( \alpha_1^{(i)} \right) \alpha_1^{(i)}(k) \neq \zeta_1^{(i)} \right) \rightarrow \sigma_1(k),$$

где  $\sigma_1$  – ситуация “выезд объекта  $h_j$  на встречную полосу движения”;  
 $\rho_2$  – появление в зоне  $z_1$  или  $z_2$  объекта  $h_j \in \beta_1$  с атрибутом нарушения правил;

$$\rho_2: \exists k \exists h_j \in \beta_1 \left( q_j \left( \alpha_2^{(i)} \right) \alpha_2^{(i)}(k) > \max_{\forall j} v_{\beta_1} \right) \rightarrow \sigma_2(k),$$

где  $\sigma_2$  – ситуация “превышение объектом  $h_j \in \beta_1$  допустимой скорости движения”;  $\rho_3$  – появление в зоне  $z_1$  или  $z_2$  объектов  $h_j \in \beta_1$  и  $h_m \in \beta_1$  с атрибутом нарушения правил;

$$\rho_3: \exists k \exists h_j, h_m \in \beta_1 \left( q_j \left( \alpha_3^{(i)} \right) \alpha_3^{(i)}(k) < \min_{\substack{\forall j \forall m \\ m \neq j}} d_{\beta_1} \right) \rightarrow \sigma_3(k),$$

где  $\sigma_3$  – ситуация “сближение объекта  $h_j \in \beta_1$  с другим объектом  $h_m \in \beta_1$ ”;  $\rho_4$  – появление в зоне  $z_1$  или  $z_2$  объектов  $h_j \in \beta_1$  и  $h_m \in \beta_1$  с атрибутом нарушения правил;

$$\rho_4: \exists k \exists h_j, h_m \in \beta_1 \left( q_j \left( \alpha_4^{(i)} \right) \alpha_4^{(i)}(k) > \min_{\substack{\forall j \forall m \\ m \neq j}} (w_{j_1}, d_{j_m}) \right) \rightarrow \sigma_4(k),$$

где  $\sigma_4$  – ситуация “«подрезание объектом  $h_j \in \beta_1$  объекта  $h_m \in \beta_1$ ” ;  $\rho_5$  – появление в зоне  $z_1$  или  $z_2$  объектов  $h_j \in \beta_1$  и  $b_m \in \beta_1$  с атрибутами нарушения правил;

$$\rho_5: \exists k \exists h_j, h_m \in \beta_1 \left( q_j \left( \alpha_2^{(i)} \right) \left( \zeta_2^{(i)}(k) \wedge \left( \alpha_2^{(i)}(k) \neq 0 \right) \right) \right) \rightarrow \sigma_5(k),$$

где  $\sigma_5$  – ситуация “проезд  $h_j \in \beta_1$  на запрещающий сигнал светофора”;  
 $\rho_6$  – появление в зоне  $z_3$  объекта  $b_j \in \beta_1$  с атрибутом нарушения правил;

$$\rho_6: \exists k \exists h_j \in \beta_1 \left( q_j \left( \alpha_2^{(i)} \right) \left( \zeta_2^{(3)}(k) = 1 \right) \wedge \left( \alpha_2^{(3)}(k) \neq 0 \right) \right) \rightarrow \sigma_6(k),$$

где  $\sigma_6$  – ситуация “появление объекта  $h_j \in \beta_1$  в пешеходной зоне ( $z_3$ ) при разрешенном движении в зоне  $z_3$ ”;  $\rho_7$  – появление в зоне  $z_1$  или  $z_2$  объекта  $h_j \in \beta_1$  с атрибутами нарушения правил;

$$\rho_7: \exists k \exists h_j \in \beta_2 \left( q_j \left( \alpha_2^{(i)} \right) \left( h_j \triangleright [z_1 \vee z_2] \right) \wedge \left( \alpha_2^{(i)}(k) \neq 0 \right) \right) \rightarrow \sigma_7(k),$$

где  $\sigma_7$  – ситуация “появление объекта  $b_j \in \beta_2$  зоне  $z_1$  или  $z_2$  при разрешенном движении транспорта в зонах  $z_1$  и  $z_2$ ”,  $h_j \triangleright z_i$  – обозначение присутствия объекта  $h_j$  в зоне  $z_i$ ;  $\rho_8$  – появление в зоне  $z_1$  или  $z_2$  объектов  $h_j \in \beta_1$  и  $h_m \in \beta_1$  с атрибутами нарушения правил;

$$\rho_8: \exists k \exists h_j, h_m \in \beta_1 \left( q_j(\alpha_2^{(i)}, \alpha_3^{(i)}) \left( \alpha_3^{(i)}(k) < \min_{\substack{\forall j \forall m \\ m \neq j}} d_{\beta_1} \right) \wedge (\alpha_2^{(i)}(k) = 0) \right) \rightarrow \sigma_8(k),$$

где  $\sigma_8$  – ситуация “столкновение объектов  $h_j \in \beta_1$  и  $h_m \in \beta_1$ ”.

То есть основная таблица базы данных АГЕНТЫ представляет собой матрицу  $M$  размером  $\mu$  (максимальное число агентов)  $\times$   $\lambda$  (число атрибутов для каждой зоны:  $i=1,2,3$ ), в клетках которой располагаются значения предикатов (левой части правил  $\rho_j$ ).

В этом случае правило распознавания ситуации сводится к следующему: если в матрице  $M$  появилась хотя бы одна единица (соответствующий предикат становится истинным), то это свидетельствует о наступлении НС вызванным объектом, идентификатор которого определяется номером строки матрицы  $M$ , а тип НС определяется номером  $l$  «сработавшего» правила.

В заключение можно отметить следующее.

В статье рассмотрен подход к построению системы обнаружения и классификации нештатных ситуаций, причиной которых может быть неправильное поведение подвижных объектов. Предложенные алгоритмы видеоаналитики обладают особенностями, позволяющими их рассматривать как основу системы обнаружения и классификации различных аномалий в поведении объектов. Основным достоинством предложенных алгоритмов является их сравнительно невысокая сложность. Это обеспечивает системе высокую оперативность при практическом отсутствии ложных «срабатываний».

Полученные при апробации рассмотренных в настоящей работе решений результаты подтвердили их эффективность и возможность использования в более широком классе задач.

## Список литературы

1. Математические методы распознавания образов: 15-я Всероссийская конференция: сборник докладов. г. Петрозаводск, 11 – 17 сентября 2011 г. М.: МАКС Пресс, 2012.

2. Leo Grady and Eric L. Isoperimetric Graph Partitioning for Image Segmentation IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2006. Vol. 28. No. 3. P. 469 – 475.

3. Лукьяница А.А., Шишкин А.Г. Цифровая обработка видеоизображений. М.: Изд-во «Ай-Эс-Эс Пресс», 2009. 518 с.

4. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект. Современный подход. 2-е изд. М.: ИД «Вильямс», 2006. 1408 с.

*Токарев Вячеслав Леонидович, д-р техн. наук, доц. [tokarev22@yandex.ru](mailto:tokarev22@yandex.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

*Абрамов Дмитрий Александрович, асп., [sipai-dima@mail.ru](mailto:sipai-dima@mail.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет*

**ALGORITHMS VIDEO ANALYTICS FOR DETECTION AND CLASSIFICATION OF EMERGENCY SITUATIONS**

*V.L. Tokarev, D.A. Abramov*

*The problem of mathematical software of automatic detection and classification of emergency situations is considered. The option algorithmic support system, the main meter of which is the camera is proposed.*

*Key words: video analytics, classification of emergency situations.*

*Tokarev Vjacheslav Leonydovich, doctor of technical science, docent, [tokarev22@yandex.ru](mailto:tokarev22@yandex.ru), Russia, Tula, Tula State University,*

*Abramov Dmeetry Alecsandrovich, postgraduate, [sipai-dima@mail.ru](mailto:sipai-dima@mail.ru), Russia, Tula, Tula State University*

## ОТБОР ПРИЗНАКОВ В ЗАДАЧЕ КЛАССИФИКАЦИИ ПРИ СМЕЩЕНИИ КОНЦЕПТА ДЛЯ ПОТОКОВ ДАННЫХ

П.А. Турков, О.В. Красоткина, В.В. Моттль, А.А. Сычугов

*Представлен новый байесовский инструмент для отбора признаков в задаче распознавания образов на потоках данных. Предлагается иерархическая вероятностная модель с разреженной регуляризацией для оценки параметров решающего правила. Предложенный подход дает строгую байесовскую формулировку критерия для выбора предсказателя. Экспериментальные результаты показывают, что предложенный инструмент превосходит другие методы анализа смещения концепта.*

*Ключевые слова: отбор признаков, смещение концепта, изменение генеральной совокупности, классификация на потоках данных, обучение с учителем, распознавание образов.*

При сегодняшнем развитии аппаратных и программных технологий потоки данных используются повсеместно, что ставит сложную задачу хранения, анализа и визуализации подобных больших и быстрых объемов данных. Одной из значительных проблем в области потоков данных является задача их классификации. Классические алгоритмы классификации требуется адаптировать для работы в потоковой среде из-за основных ресурсных ограничений по используемой памяти и времени работы. Существуют по меньшей мере три особенности классификации на потоках данных: большая длина, смещение концепта и отбор признаков. Смещение концепта является общим атрибутом потоков данных, который присутствует в случае изменения исследуемого объекта. Отбор признаков был подробно изучен с традиционной точки зрения анализа данных, но на потоках данных указанная особенность является более сложной проблемой. Смещение концепта и большой размер делают невозможным применение классических методов отбора признаков в ходе процедуры обучения.

Большинство предыдущих и текущих исследований в области анализа потоков данных проводится в стационарной среде, когда алгоритму обучения предоставлен весь набор данных. За прошедшие годы было разработано много решений для статической классификации, а несколько довольно точных классификаторов могут использоваться для данных больших объемов. Тем не менее, в некоторых из последних приложений алгоритмы обучения работают в динамических средах. Управление дорожным движением, сенсорные сети, мониторинг, анализ логов веб-активности или телекоммуникации являются примерами таких приложений. Смещение концепта происходит, когда исследуемое явление, о котором были собраны данные, изменяется с течением времени. Такие изменения отражаются в поступающих объектах и снижают точность классификаторов, построенных на ранее полученных учебных объектах. В задачах такого рода и ха-

ракти, и сам факт изменений часто скрыты от непосредственного наблюдения, что делает обучение еще более трудным [1]. Реальными примерами наличия смещения концепта являются системы мониторинга, обнаружение финансового мошенничества, определение спама, потенциально вредоносного трафика в сетевом взаимодействии, прогнозы погоды и предпочтения клиентов [2]. Вопрос о разработке легкого алгоритма обучения на потоках данных стал важным пунктом исследований. Были разработаны различные подходы к анализу потоков данных со смещением концепта, включающие в себя методы отбора объектов, обнаружения смещения, ансамбли классификаторов, условные деревья и использование границы Хёфдинга для оценки производительности [3 - 7].

К сожалению, большинство существующих методов классификации на потоках данных сконцентрированы только на проблемах бесконечной длины и смещения концепта, в то время как огромный объем данных, который необходимо собрать и обработать, является одной из главных причин низкой скорости и больших накладных расходов. По этой причине алгоритмы обработки данных должны уменьшить количество обрабатываемых признаков [8]. Существуют три основных подхода к отбору признаков: фильтрация, обертка и встроенные методы. Фильтрационный подход заключается в удалении нерелевантных признаков из исходного набора перед их передачей в алгоритм обучения. Как правило, первоначальный набор данных анализируется для выделения подмножества релевантных признаков, которых будет достаточно для успешной классификации. В методах-обертках подмножество релевантных признаков выбирается с помощью применяемого классификатора. Обертки используют подходящий поисковый алгоритм в пространстве возможных признаков и оценивают каждое потенциальное подмножество, запуская целевой классификатор [10, 9]. Целью метода является нахождение подмножества признаков, которое обеспечивает наилучшее качество классификации. Во встроенных методах поиск оптимального подмножества признаков встроен в сам классификатор, и может быть рассмотрен как поиск в комбинированном пространстве подмножеств признаков и гипотез [11, 12, 13, 14, 15, 16]. Встроенные методы имеют то преимущество, что они включают в себя взаимодействие с классификационной моделью, на самом деле эти методы работают одновременно с классификацией объектов и поиском признаков.

Обнаружение информативного подмножества признаков в большом объеме потока данных является весьма трудной задачей. Во-первых, поток данных является бесконечным, так что любой офф-лайн алгоритм выбора признаков, который сохраняет весь поток данных для анализа, будет вызывать переполнение памяти. Во-вторых, важность признаков динамически изменяется с течением времени из-за смещения концепта, т.е. ранее важные особенности могут стать незначительными, и наоборот. И в-третьих, для онлайн-приложений важно получать подмножество признаков за вре-

мя, близкое к реальному. В целом, можно отметить, что все существующие алгоритмы для отбора признаков, как использующие пакеты данных [17], так и одиночные объекты [18, 20], не могут обрабатывать большие потоки данных эффективно из-за ограничений по времени и памяти.

В данной статье предлагается иерархическая вероятностную модель для оценки изменения параметров правила решения с разреженной регуляризацией. Предлагаемый подход дает строгую Байесовскую формулировку критерия для выбора предсказателя. В наших предыдущих работах для ранговой регрессии [21] и регрессии Кокса [22], было показано, что такой тип оценки является несмещенной, имеет обобщающие и оракульные свойства, его максимальный риск сходится к конечному значению. Экспериментальные результаты показывают, что предлагаемая система превосходит существующие методы анализа смещения концепта как на модельных данных, так и на публично доступном множестве реальных данных.

### 1. Иерархическая вероятностная модель с отбором признаков для задачи распознавания образов при смещении концепта

1.1. Байесовский подход к отбору признаков в задаче распознавания образов. Начнем с рассмотрения задачи отбора признаков в распознавании образов без смещения концепта. Пусть каждый объект генеральной совокупности  $\omega \in \Omega$  будет представлен точкой в линейном признаковом пространстве  $\mathbf{x}(\omega) = (x^1(\omega), \dots, x^n(\omega)) \in X = \mathbb{R}^n$ , а его скрытая принадлежность к одному из двух классов будет определяться индексом класса  $y(\omega) = Y \in \{1, -1\}$ . Функция

$$(\mathbf{x}(\omega), y(\omega)) : \Omega \rightarrow X \times Y \quad (1)$$

известна в пределах конечного обучающего множества  $\{(\mathbf{x}(\omega_j), y(\omega_j)) = (\mathbf{x}_j, y_j), j = 1, \dots, N\}$  где  $N$  - число наблюдений. Необходимо продолжить функцию (1) на весь набор  $\Omega$  таким образом, чтобы можно было оценить класс новых объектов  $\omega \in \Omega$ , не представленных в обучающей совокупности. Допустим, что существует вероятностное пространство  $\Xi \times \Psi$  с некоторой функцией вероятности  $\varphi(\mathbf{x}, y)$ . В качестве вероятностной модели источника данных рассмотрим два параметрических семейства распределений  $\varphi_1(\mathbf{x} | \mathbf{a}, b)$  и  $\varphi_{-1}(\mathbf{x} | \mathbf{a}, b)$ ,  $\mathbf{a} \in \mathbb{R}^n$ ,  $b \in \mathbb{R}$ , связанных с индексами классов  $y = \pm 1$ . Эти два условных распределения вероятности сосредоточены главным образом по разные стороны неизвестной дискриминантной гиперплоскости  $\mathbf{a}^T \mathbf{x} + b = 0$ :

$$\varphi(\mathbf{x} | y, \mathbf{a}, b, c) \propto \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{2}{\sigma^2} y(\mathbf{a}^T \mathbf{x} + b)\right)}. \quad (2)$$

В строгом смысле эти функции не являются плотностями распределения вероятности, так как их интегралы по  $P^n$  не равны какому-либо конечному числу. Но мы используем терминологию Морриса Де Гроота, который называет такие функции плотности распределения несобственными плотностями [23]. Эта пара несобственных плотностей полностью определяет вероятностную модель источника данных. Оба распределения (2) являются «равномерными» вдоль бесконечных осей, параллельных гиперплоскости, а также в бесконечных областях  $\mathbf{a}^T \mathbf{x} + b > 1$  для объектов класса  $y = 1$ , и  $\mathbf{a}^T \mathbf{x} + b < -1$  для противоположного класса  $y = -1$ .

На самом деле условные распределения (2) в вероятностной форме выражают суть знаменитого метода логистической регрессии, чья основная идея заключается в описании вероятностной принадлежности объектов классам с помощью логистической функции вида  $\sigma(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}}$ .

Полагаем, что случайные векторы признаков отдельных объектов в обучающем наборе являются условно независимыми, таким образом, совместная плотность распределения для индексов фиксированного класса – это произведение

$$\Phi(\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N | y_1, \dots, y_N, \mathbf{a}, b, c) = \prod_{j=1}^N \varphi_{y_j}(\mathbf{x}_j | \mathbf{a}, b, c). \quad (3)$$

Пусть дополнительно направляющий вектор  $\mathbf{a} = (a_1, \dots, a_n) \in P^n$  разделяющей гиперплоскости  $\sum_{i=1}^n a_i x_i + b \neq 0$  будет рассматриваться как вектор независимых случайных величин с нулевым математическим ожиданием и, в общем случае, с разными дисперсиями  $\mathbf{r} = (r_1, \dots, r_n)$ :

$$\psi(a_i | r_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi r_i}} \exp(-1/2 r_i a_i^2).$$

Относительно смещения гиперплоскости  $b$  никакой априорной информации не предполагается, следовательно,

$$\Psi(\mathbf{a}, b | \mathbf{r}) \propto \Psi(\mathbf{a} | \mathbf{r}) \propto \prod_{i=1}^n (1/r_i)^{-1/2} \exp\left(-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{r_i} a_i^2\right). \quad (4)$$

И, наконец, будем рассматривать независимые априорные гамма-распределения величин, обратных дисперсиям  $\gamma(1/r_i | \alpha, \beta) \propto (1/r_i)^{\alpha-1} \exp[-\beta(1/r_i)]$  с одинаковыми математическими ожиданиями  $E(1/r_i) = \alpha/\beta$  и дисперсиями  $Var(1/r_i) = \alpha/\beta^2$ . Чтобы избавиться от двойной параметризации, зададим  $\alpha = 1 + 1/(2\mu)$  и  $\beta = 1/(2\mu)$ . Теперь имеем параметрическое семейство гамма-распределений, определяемых только одним параметром  $\mu \geq 0$ , таким что  $E(1/r_i) = 1 + 2\mu$  и  $Var(1/r_i) = 2\mu(1 + 2\mu)$ :

$$\gamma(1/r_i | \mu) \propto (1/r_i)^{1/(2\mu)} \exp[-(1/2\mu)(1/r_i)]. \quad (5)$$

Априорная совместная плотность дисперсии вектора  $\mathbf{r} = (r_1, \dots, r_n)$  является произведением:

$$G(\mathbf{r} | \mu) \propto \prod_{i=1}^n \left\{ (1/r_i)^{1/(2\mu)} \exp[-(1/2\mu)(1/r_i)] \right\} \quad (6)$$

Совместная апостериорная плотность распределения параметров гиперплоскости  $(\mathbf{a} = (a_1, \dots, a_n), b)$  и дисперсий  $\mathbf{r} = (r_1, \dots, r_n)$  (4) будет определяться формулой Байеса

$$\begin{aligned} p((\mathbf{a}, b), \mathbf{r} | \mathbf{x}_j, y_j, j = 1, \dots, N, c, \mu) &\propto \\ &\propto \Psi(\mathbf{a} | \mathbf{r}) G(\mathbf{r} | \mu) \Phi(\mathbf{x}_j, j = 1, \dots, N | y_j, j = 1, \dots, N, \mathbf{a}, b, c). \end{aligned} \quad (7)$$

Байесовская оценка параметров гиперплоскости  $(\mathbf{a}, b)$  совместно с дисперсиями  $\mathbf{r}$  в соответствии с (7) и (6) приводит к адаптивному критерию обучения

$$\begin{aligned} ((\hat{\mathbf{a}}, \hat{b}), \hat{\mathbf{r}} | c, \mu) = \operatorname{argmax} p(\mathbf{a}, b | \mathbf{x}_j, y_j, j = 1, \dots, N, c) = \operatorname{argmax} [\ln \Psi(\mathbf{a} | \mathbf{r}) + \\ + \ln G(\mathbf{r} | \mu) + \ln \Phi(\mathbf{x}_j, j = 1, \dots, N | y_j, j = 1, \dots, N, \mathbf{a}, b, c)]. \end{aligned} \quad (8)$$

Плотность  $\Psi(\mathbf{a} | \mathbf{r})$  (4) является нормальным условным априорным распределением направляющего вектора относительно фиксированных дисперсий, а  $G(\mathbf{r} | \mu)$  (6) – априорное гамма-распределение условий. Рассмотрим произведение  $\Psi(\mathbf{a} | \mathbf{r}) G(\mathbf{r} | \mu)$  и его логарифм  $\ln \Psi(\mathbf{a} | \mathbf{r}) + \ln G(\mathbf{r} | \mu)$  как иерархическую априорную модель скрытого направляющего вектора  $\mathbf{a}$ , в данном случае с двумя уровнями иерархии.

Именно эта иерархическая априорная модель обеспечивает селективное свойство байесовской оценки (8), выделяя элементы направляющего вектора, которые являются «адекватными» обучающим данным  $0 < \hat{r}_i < \infty$ , т.е.,  $\hat{a}_i^2 > 0$  (4), и подавляя  $\hat{r}_i \rightarrow \infty$  до пренебрежимо малых значений  $\hat{a}_i^2 \rightarrow 0$  «лишние».

В самом деле, если  $\mu \rightarrow 0$  в (5), случайные значения  $1/r_i$  стремятся к неслучайному равенству  $1/r_i \cong \dots \cong 1/r_n \cong 1$ , так как  $[E(1/r_i) \rightarrow 1, \operatorname{Var}(1/r_i) \rightarrow 0]$ , и все квадраты элементов направляющего вектора  $a_i^2$  одинаково штрафуются в (4) в соответствии с ограничением  $\ln \Psi(\mathbf{a} | \mathbf{r}) \rightarrow \max$ . Но растущий параметр  $\mu \rightarrow \infty$  позволяет независимым неотрицательным значениям  $1/r_i$  произвольно отличаться друг от друга  $[E(1/r_i) \rightarrow \infty, \operatorname{Var}(1/r_i) \rightarrow \infty]$ , а требования  $[\ln G(\mathbf{r} | \mu) \rightarrow \max, \ln \Psi(\mathbf{a} | \mathbf{r}) \rightarrow \max]$  обеспечивают их рост  $1/r_i \rightarrow \infty$ .

В результате оцениваемая разделяющая гиперплоскость  $\sum_{i=1}^n \hat{a}_i x_i + \hat{b} > 0$  будет принимать во внимание только подмножество наиболее информативных признаков  $x_i$  и практически игнорировать остальные [26].

Параметр  $0 < \mu < \infty$  служит в качестве параметра селективности. Если  $\mu=0$  критерий обучения (8) становится классическим критерием логистической регрессии без возможности выбора признаков, а если  $\mu \rightarrow \infty$ , то он становится крайне селективным.

Таким образом, данный метод является вероятностным обобщением традиционного метода логистической регрессии, которое наделяет его способностью подавлять избыточные признаки на заданном уровне селективности.

1.2. *Вероятностная модель смещения концепта, основанная на марковском свойстве дрейфующей разделяющей гиперплоскости.* Будем использовать комбинированные обозначения  $\mathbf{w} = (\mathbf{a}, b) \in \mathbb{R}^{n+1}$  для параметров разделяющей гиперплоскости, а именно, ее направляющий вектор  $\mathbf{a} \in \mathbb{R}^n$  и параметр положения  $b \in \mathbb{R}$ , и, соответственно, расширенная нотация  $\mathbf{x} = (\mathbf{x}, 1) \in \mathbb{R}^{n+1}$  для вектора признаков. Таким образом, уравнение гиперплоскости будет иметь вид  $\mathbf{w}^T \mathbf{x} \neq 0$ .

Ключевым элементом нашего байесовского подхода к проблеме смещения концепта является понимание изменяющегося во времени вектора параметров дрейфующей разделяющей гиперплоскости

$$\mathbf{w}_t = (\mathbf{a}_t, b_t) = (w_{1,t}, \dots, w_{n+1,t}) \in \mathbb{R}^{n+1}, w_{i,t} = a_{i,t}, i=1, \dots, n, w_{n+1,t} = b_t \quad (9)$$

как векторного случайного процесса с независимыми компонентами, обладающего марковским свойством [27]:

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_t &= q\mathbf{w}_{t-1} + \boldsymbol{\xi}_t \in \mathbb{R}^{n+1}, E(\boldsymbol{\xi}_t) = \mathbf{0}, E(\boldsymbol{\xi}_t \boldsymbol{\xi}_s^T) = \mathbf{Diag}(d_1, \dots, d_{n+1}), \\ d_i &= (1-q^2)r_i, i=1, \dots, n, d_{n+1} = 1-q^2. \end{aligned} \quad (10)$$

где  $\boldsymbol{\xi}_t = (\xi_{i,t}, i=1, \dots, n+1)$  – векторный «белый шум» ( $E(\xi_i \xi_s^T) = 0, s \neq t$ ) с нулевым математическим ожиданием независимых элементов, каждый из которых имеет свою независимую дисперсию  $d_i > 0, i=1, \dots, n+1$ . Будем использовать обозначения  $\mathbf{r} = (r_1, \dots, r_n)$  предполагая, что коэффициент  $q$  в (10) остается постоянным.

Если  $|q| < 1$ , каждый элементарный случайный процесс  $w_{i,t}$  является стационарным и эргодичным на бесконечной оси дискретного времени  $t = \dots, 1, 2, 3, \dots$ . Математическое ожидание каждого случайного процесса равно нулю, а его асимптотическая стационарная дисперсия полностью определяется параметрами марковского уравнения

$$\begin{aligned} E(w_{1,t}) = E(w_{n+1,t}) &= 0, \text{Var}(w_{i,t}) = \text{Var}(a_{i,t}) = \frac{d_i}{1-q^2} = r_i, i=1, \dots, n, \\ \text{Var}(w_{n+1,t}) &= \text{Var}(b_t) = \frac{d_{n+1}}{1-q^2} = 1. \end{aligned} \quad (11)$$

Дополнительно предположим, что коэффициент  $q$  удовлетворяет ограничениям  $0 \leq q < 1$ . Этот коэффициент остается неизменным в течение всего векторного процесса  $\mathbf{w}_t = (\mathbf{a}_t, b_t) \in \mathbb{R}^{n+1}$  и определяет предполагаемую

скрытую динамику разделяющей гиперплоскости. Чем меньше разница  $1-q>0$ , тем медленнее допустимое смещение, но все независимые случайные процессы  $w_{i,t}$  остаются эргодическими, а их стационарные дисперсии  $Var(w_{i,t})=r_i$ ,  $Var(w_{n+1,t})=1$ . Равенство  $q=0$  не представляет интереса, так как в этом случае направляющий вектор будет хаотически меняться со временем вместо того, чтобы постепенно смещаться. Но если  $q=1$ , марковское уравнение (10) превращается в строгое равенство  $\mathbf{w}_t=\mathbf{w}_{t-1}$ , и сохраняет вероятностный смысл только в сочетании с некоторым предположением о распределении одного из значений, например  $\mathbf{w}_0$ .

В дальнейшем будем рассматривать стационарные отклонения  $\mathbf{r}=(r_1>0, \dots, r_n>0)$  из первых  $n$  случайных процессов  $(w_{1,t}, \dots, w_{n,t})$  (11), т.е. элементов направляющего вектора  $\mathbf{a}_t=(a_{1,t}, \dots, a_{n,t})$ . Их оценка будет инструментом отбора признаков в нашей технике обработки потока данных. Чем меньше  $Var(w_{i,t})=r_i$ , тем меньше будут все расчетные значения  $i$ -го элемента смещенного направляющего вектора  $(\hat{a}_{i,t}, t = \dots, 1, 2, 3, \dots)$ , и меньше вес  $i$ -го признака  $(x_{i,t}, t = \dots, 1, 2, 3, \dots)$  в классификации объекта  $\hat{\mathbf{a}}_t^T \mathbf{x}_t + b_t = \sum_{i=1}^n \hat{a}_{i,t} x_{i,t} + b_t / 0$ . Если  $r_i \rightarrow 0$ , соответствующий признак почти полностью подавляется.

Напротив, стационарная дисперсия последнего случайного процесса  $w_{n+1,t}$ , т.е. параметра положения гиперплоскости  $b_t$ , предполагается предопределенной  $Var(w_{n+1})=1$ . Это означает, что смещение параметра положения всегда остается активным.

Обучающий набор – это конечная последовательность конечных учебных пакетов  $\{(\mathbf{X}_t, \mathbf{Y}_t), t = 1, \dots, T\}$ , каждый из которых состоит из конечного числа объектов обучения  $(\mathbf{X}_t, \mathbf{Y}_t) = \{(\mathbf{x}_{j,t}, y_{j,t}), j = 1, \dots, N_t\}$ , ассоциированных с соответствующим моментом дискретного времени  $t = 1, \dots, T$ . Если все направляющие вектора  $(\mathbf{w}_t, t = 1, \dots, T)$  являются фиксированными, вектора признаков  $\mathbf{X}_t = (\mathbf{x}_{j,t}, j = 1, \dots, N_t)$  внутри и на протяжении пакетов будут условно независимы и распределены в соответствии с (3):

$$\Phi(\mathbf{X}_t, t=1, \dots, T | \mathbf{Y}_t, \mathbf{w}_t, t=1, \dots, T, c) = \prod_{t=1}^T \prod_{j=1}^{N_t} \varphi_{y_{j,t}}(\mathbf{x}_{j,t} | y_{j,t}, \mathbf{w}_t, c). \quad (12)$$

Предполагая, что «белый шум» в марковском уравнении (10) является нормально распределенным, условная плотность вероятности каждого вектора параметров гиперплоскости  $\mathbf{w}_t$  относительно его непосредственного предыдущего значения  $\mathbf{w}_{t-1}$  будет также нормальной:

$$\begin{aligned} \Psi(\mathbf{w}_t | \mathbf{w}_{t-1}, \mathbf{r}) &\propto \mathbf{N}(\mathbf{w}_t | q\mathbf{w}_{t-1}, \mathbf{D}_r) = \\ &= \frac{1}{|\mathbf{D}_r|^{1/2} (2\pi)^{n/2}} \exp\left(-\frac{1}{2}(\mathbf{w}_t - q\mathbf{w}_{t-1})^T \mathbf{D}_r^{-1}(\mathbf{w}_t - q\mathbf{w}_{t-1})\right). \end{aligned} \quad (13)$$

Если дополнительно предположим, что не существует никакой априорной информации о первом значении вектора параметров  $\mathbf{w}_1$ , то априорная плотность распределения скрытой последовательности параметров гиперплоскости по всему интервалу наблюдения ( $\mathbf{w}_t, t=1, \dots, T$ ) будет произведением этих условных плотностей:

$$\Psi(\mathbf{w}_t, t=1, \dots, T | \mathbf{r}) = \prod_{t=2}^T \Psi(\mathbf{w}_t | \mathbf{w}_{t-1}, \mathbf{r}). \quad (14)$$

Априорная совместная плотность вектора дисперсий  $G(\mathbf{r} | \mu)$  остается такой же, как и в случае отсутствия смещения (6).

*1.3. Критерий обучения.* Совместная апостериорная плотность распределения всей скрытой последовательности параметров гиперплоскости и вектора дисперсий будет пропорциональна произведению (6), (12) и (14):

$$\begin{aligned} p(\mathbf{w}_t, t=1, \dots, T, \mathbf{r} | (\mathbf{X}_t, \mathbf{Y}_t), t=1, \dots, T | c, \mu) &\propto \\ &\propto \Psi(\mathbf{w}_t, t=1, \dots, T | \mathbf{r}) G(\mathbf{r} | \mu) \Phi(\mathbf{X}_t, t=1, \dots, T | \mathbf{Y}_t, \mathbf{w}_t, t=1, \dots, T, c). \end{aligned} \quad (15)$$

Максимизация совместной плотности распределения приводит к обобщению байесовского критерия обучения (8) для случая смещения параметров гиперплоскости в отношении (12) и (14):

$$\begin{aligned} (\hat{\mathbf{w}}_t, t=1, \dots, T, \hat{\mathbf{r}} | c, \mu) &= \operatorname{argmax}_{\mathbf{w}_t, t=1, \dots, T, \mathbf{r}} p(\mathbf{w}_t, t=1, \dots, T, \mathbf{r} | (\mathbf{X}_t, \mathbf{Y}_t), t=1, \dots, T, c, \mu) = \\ &= \operatorname{argmax}_{\mathbf{w}_t, t=1, \dots, T, \mathbf{r}} [\ln \Psi(\mathbf{w}_t, t=1, \dots, T | \mathbf{r}) + \ln G(\mathbf{r} | \mu) + \ln \Phi(\mathbf{X}_t, t=1, \dots, T | \mathbf{Y}_t, \mathbf{w}_t, t=1, \dots, T, c)]. \end{aligned} \quad (16)$$

Пара  $\Psi(\mathbf{w}_t, t=1, \dots, T | \mathbf{r}) G(\mathbf{r} | \mu)$  в (15) и  $\ln \Psi(\mathbf{w}_t, t=1, \dots, T | \mathbf{r}) + \ln G(\mathbf{r} | \mu)$  в (16) является прямым обобщением двух-уровневой иерархической модели для статичной скрытой гиперплоскости  $\mathbf{w}=(\mathbf{a}, \mathbf{b})$  (подразд. 1.1) в случае смещения  $\mathbf{w}_t=(\mathbf{a}_t, \mathbf{b}_t)$ . Совместная плотность  $\Psi(\mathbf{w}_t, t=1, \dots, T | \mathbf{r})$  (14) является априорной условной нормальной моделью смещающейся разделяющей гиперплоскости с фиксированными стационарными дисперсиями  $[Var(a_{i,t})=r_i, (r_1, \dots, r_n)=\mathbf{r}]$  (11) элементов направляющего вектора, а априорная гамма-модель этих дисперсий  $G(\mathbf{r} | \mu)$  остается такой же, как в (6).

Подставляя плотности распределения (2), (13) и (14) в (16), получаем следующий критерий обучения:

$$\begin{aligned} (\hat{\mathbf{w}}_t, t=1, \dots, T, \hat{\mathbf{r}} | c, \mu) &= \operatorname{argmin}_{\mathbf{w}_t, t=1, \dots, T, \mathbf{r}} J(\mathbf{w}_t, t=1, \dots, T, \mathbf{r} | c, \mu), \\ J(\mathbf{w}_t, t=1, \dots, T, \mathbf{r} | c, \mu) &= (T-1) \ln |\mathbf{D}_r| + \sum_{t=2}^T (\mathbf{w}_t - q\mathbf{w}_{t-1})^T \mathbf{D}_r^{-1} (\mathbf{w}_t - q\mathbf{w}_{t-1}) - \\ &- 2 \ln G(\mathbf{r} | \mu) + 2c \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{N_t} \ln \left( 1 + \exp \left( -\frac{2}{\sigma^2} y_{t,j} \mathbf{w}_t^T \mathbf{x}_{t,j} \right) \right). \end{aligned}$$

Метод покоординатного спуска используем для двух групп переменных, а именно параметров гиперплоскости  $(\mathbf{w}_t, t=1, \dots, T)$  и дисперсий  $\mathbf{r}=(1, \dots, n)$ . Когда одна из этих групп фиксируется, возникают следующие две задачи частичной оптимизации из итерационной процедуры:

$$J(\mathbf{w}_t, t=1, \dots, T | \mathbf{r}, c) = \sum_{t=2}^T (\mathbf{w}_t - q\mathbf{w}_{t-1})^T \mathbf{D}_{\mathbf{r}}^{-1} (\mathbf{w}_t - q\mathbf{w}_{t-1}) + 2c \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{N_t} \ln \left( 1 + \exp \left( -\frac{2}{\sigma^2} y_{t,j} \mathbf{w}_t^T \mathbf{x}_{t,j} \right) \right). \quad (17)$$

$$J(\mathbf{r} | \mathbf{w}_t, t=1, \dots, T, \mu) = (T-1) \ln |\mathbf{D}_{\mathbf{r}}| + \sum_{t=2}^T (\mathbf{w}_t - q\mathbf{w}_{t-1})^T \mathbf{D}_{\mathbf{r}}^{-1} (\mathbf{w}_t - q\mathbf{w}_{t-1}) - 2 \ln G(\mathbf{r} | \mu). \quad (18)$$

Эти чередующиеся задачи оптимизации являются выпуклыми.

## 2. Оценка параметров в иерархической вероятностной модели

2.1. *Приближенная процедура динамического программирования для оценки смещающейся гиперплоскости при зафиксированных весах признаков. Идея динамического программирования.* Целевая функция (17) зависит от  $T$  переменных  $(\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_T)$ , упорядоченных относительно временной оси, каждая из которых представляет собой вектор размерности  $(n+1)$  —  $\mathbf{w}_t \in \mathbb{R}^{n+1}$  (9). Несмотря на то, что общее число переменных равно  $T(n+1)$ , структура критерия обладает специфическим свойством, которое позволяет минимизировать его, по крайней мере, теоретически, всего за  $T$  шагов.

Критерий (17) является парно-сепарабельным, т.е. может быть представлен как сумма элементарных функций, каждая из которых зависит от одной  $\mathbf{w}_t$  или двух векторных переменных  $(\mathbf{w}_{t-1}, \mathbf{w}_t)$  в соседние дискретные моменты времени. Наиболее подходящим способом решения задач оптимизации такого рода является хорошо известный принцип динамического программирования [28, 29].

Основное понятие динамического программирования состоит в последовательности функций Беллмана. Рассмотрим критерий (17) относительно только начальной части всего временного интервала  $s=1, \dots, t$ :

$$J_t(\mathbf{w}_s, s=1, \dots, t | \mathbf{r}, c) = \sum_{s=2}^t (\mathbf{w}_s - q\mathbf{w}_{s-1})^T \mathbf{D}_{\mathbf{r}}^{-1} (\mathbf{w}_s - q\mathbf{w}_{s-1}) + 2c \sum_{s=1}^t \sum_{j=1}^{N_s} \ln \left( 1 + \exp \left( -\frac{2}{\sigma^2} y_{s,j} \mathbf{w}_s^T \mathbf{x}_{s,j} \right) \right). \quad (19)$$

Если мысленно зафиксируем последний аргумент  $\mathbf{w}_t \in \mathbb{R}^{n+1}$  и мысленно минимизируем этот критерий (17) по всем целевым переменным  $(\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_{t-1})$ , результатом будет функция от  $\mathbf{w}_t$ :

$$\tilde{J}_t(\mathbf{w}_t | \mathbf{r}, c) = \min_{\mathbf{w}_s, s=1, \dots, t-1} J_t(\mathbf{w}_s, s=1, \dots, t | \mathbf{r}, c) = \min_{\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_{t-1}} J_t(\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_{t-1}, \mathbf{w}_t | \mathbf{r}, c). \quad (20)$$

Таковы функции Беллмана  $\tilde{J}_t(\mathbf{w}_t | \mathbf{r}, c)$ ,  $\mathbb{R}^{n+1} \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $t=0, \dots, T$ ,  $\tilde{J}_0(\mathbf{w}_0 | \mathbf{r}, c) \equiv 0$ , полностью определяемые заданным обучающим множеством  $\{(\mathbf{X}_t, \mathbf{Y}_t), t=1, \dots, T\}$ .

Фундаментальным свойством функций Беллмана является следующее рекуррентное соотношение, которое практически очевидно следует из их определения (19) – (20):

$$\begin{aligned} \tilde{J}_0(\mathbf{w}_0 | \mathbf{r}, c) &\equiv 0, \mathbf{w}_0 \in \mathbb{R}^{n+1}, t=0, \\ \tilde{J}_t(\mathbf{w}_t | \mathbf{r}, c) &= 2c \sum_{j=1}^{N_t} \ln \left( 1 + \exp \left( -\frac{2}{\sigma^2} y_{t,j} \mathbf{w}_t^T \mathbf{x}_{t,j} \right) \right) + \\ &+ \min_{\mathbf{w}_{t-1} \in \mathbb{R}^{n+1}} [(\mathbf{w}_t - q\mathbf{w}_{t-1})^T \mathbf{D}_r^{-1} (\mathbf{w}_t - q\mathbf{w}_{t-1}) + \tilde{J}_{t-1}(\mathbf{w}_{t-1} | \mathbf{r}, c)], \quad (21) \\ &\mathbf{w}_t \in \mathbb{R}^{n+1}, t=1, \dots, T. \end{aligned}$$

Если компьютер имеет «достаточно большой» объем памяти и «достаточно большую» скорость вычислений, и, кроме того, есть доступный «достаточно эффективный» метод решения задачи оптимизации в (21), можно рекуррентно вычислить все функции Беллмана и хранить их в памяти. Впоследствии последняя из них будет полностью определять оптимальное значение параметров гиперплоскости в последний момент времени  $(\hat{\mathbf{w}}_T | \mathbf{r}, q, c)$ :

$$(\hat{\mathbf{w}}_T | \mathbf{r}, q, c) = \min_{\mathbf{w}_T \in \mathbb{R}^{n+1}} \tilde{J}_T(\mathbf{w}_T | \mathbf{r}, q, c). \quad (22)$$

Все остальные элементы искомого решения  $[(\hat{\mathbf{w}}_1 | \mathbf{r}, q, c), \dots, (\hat{\mathbf{w}}_T | \mathbf{r}, q, c)]$  задачи (17) можно найти по обратному рекуррентному соотношению, которое практически очевидно следует из (21):

$$\hat{\mathbf{w}}_{t-1} = \operatorname{argmin}_{\mathbf{w}_{t-1} \in \mathbb{R}^{n+1}} [(\hat{\mathbf{w}}_t - q\mathbf{w}_{t-1})^T \mathbf{D}_r^{-1} (\hat{\mathbf{w}}_t - q\mathbf{w}_{t-1}) + \tilde{J}_{t-1}(\mathbf{w}_{t-1} | \mathbf{r}, c)], \quad t=T, T-1, \dots, 2. \quad (23)$$

Для обучающей совокупности  $\{(\mathbf{X}_t, \mathbf{Y}_t), t=1, \dots, T\}$  второе слагаемое в рекуррентном представлении последовательности функций Беллмана (21)

$$F_t(\mathbf{w}_t | \mathbf{r}, c) = \min_{\mathbf{w}_{t-1} \in \mathbb{R}^{n+1}} [(\mathbf{w}_t - q\mathbf{w}_{t-1})^T \mathbf{D}_r^{-1} (\mathbf{w}_t - q\mathbf{w}_{t-1}) + \tilde{J}_{t-1}(\mathbf{w}_{t-1} | \mathbf{r}, c)] \quad (24)$$

является непрерывным и кусочно-квадратичным, если предыдущая функция Беллмана, а именно  $\tilde{J}_{t-1}(\mathbf{w}_{t-1} | \mathbf{r}, c)$  является непрерывной и кусочно-квадратичной. Исходная функция  $\tilde{J}_0(\mathbf{w}_0 | \mathbf{r}, c) \equiv 0$  может быть рассмотрена как квадратичная, и, следовательно, все функции Беллмана будут непрерывными и кусочно-квадратичными в  $\mathbb{R}^{n+1}$ .

Но из-за логарифмического первого слагаемого в (21) функции Беллмана сами не являются квадратичными, и поэтому не существует параметрического способа эффективно вычислять и компактно хранить их в памяти.

Для того, чтобы сохранить вычислительные преимущества процедуры динамического программирования, прибегнем к следующей операции: эвристически заменим подлинные кусочно-квадратичные функции Беллмана  $\tilde{J}_t(\mathbf{w}_t | \mathbf{r}, c)$  на их подходящие квадратичные аппроксимации  $\tilde{J}'_t(\mathbf{w}_t | \mathbf{r}, c)$ :

$$\tilde{J}'_t(\mathbf{w}_t | \mathbf{r}, c) = (\mathbf{w}_t - \tilde{\mathbf{w}}'_t)^T \tilde{\mathbf{Q}}'_t (\mathbf{w}_t - \tilde{\mathbf{w}}'_t) + const_t \cong \tilde{J}_t(\mathbf{w}_t | \mathbf{r}, c). \quad (25)$$

Тогда каждая функция Беллмана  $\tilde{J}_t(\mathbf{w}_t | \mathbf{r}, c)$  будет приближенно представляться своей матрицей Гессе  $\tilde{\mathbf{Q}}'_t$  ( $(n+1) \times (n+1)$ ) и точкой минимума  $\tilde{\mathbf{w}}'_t \in \mathbb{R}^{n+1}$ . Так как слагаемое  $const_t$  является константой, можем его игнорировать.

Такая идея предполагает квадратичное представление исходной функции Беллмана  $\tilde{J}'_0(\mathbf{w}_0)$  как  $\tilde{\mathbf{Q}}'_0 = \mathbf{0}$  и, например,  $\tilde{\mathbf{w}}'_0 = \mathbf{0}$ .

Пусть предыдущая функция Беллмана рассматривается как приблизительно квадратичная  $\tilde{J}'_{t-1}(\mathbf{w}_{t-1} | \mathbf{r}, c) = (\mathbf{w}_{t-1} - \tilde{\mathbf{w}}'_{t-1})^T \tilde{\mathbf{Q}}'_{t-1} (\mathbf{w}_{t-1} - \tilde{\mathbf{w}}'_{t-1})$  без постоянного слагаемого, тогда функция  $F_t(\mathbf{w}_t | \mathbf{r}, c)$  (24) в (21) также может быть представлена в квадратичной форме:

$$F_t(\mathbf{w}_t | \mathbf{r}, c) = (\mathbf{w}_t - q\tilde{\mathbf{w}}'_{t-1})^T (\mathbf{D}_r + q^2 \tilde{\mathbf{Q}}'_{t-1})^{-1} (\mathbf{w}_t - q\tilde{\mathbf{w}}'_{t-1}).$$

В соответствии с (21) следующая функция Беллмана  $\tilde{J}_t(\mathbf{w}_t)$  может быть приближенно представлена как сумма следующего вида

$$\tilde{J}_t(\mathbf{w}_t | \mathbf{r}, c) = 2c \sum_{j=1}^{N_t} \max(0, 1 - y_{j,t} \mathbf{w}_t^T \mathbf{x}_{j,t}) + (\mathbf{w}_t - q\tilde{\mathbf{w}}'_{t-1})^T (\mathbf{D}_r + q^2 \tilde{\mathbf{Q}}'_{t-1})^{-1} (\mathbf{w}_t - q\tilde{\mathbf{w}}'_{t-1}). \quad (26)$$

Однако неквадратичная функция связи в качестве первого слагаемого приводит всю функцию Беллмана к неквадратичной форме.

Данная Эвристическая идея состоит в замене неквадратичных функций  $\tilde{J}_t(\mathbf{w}_t | \mathbf{r}, c)$  подходящими квадратичными

$$\tilde{J}'_t(\mathbf{w}_t | \mathbf{r}, c) = (\mathbf{w}_t - \tilde{\mathbf{w}}'_t)^T \tilde{\mathbf{Q}}'_t (\mathbf{w}_t - \tilde{\mathbf{w}}'_t) \cong \tilde{J}_t(\mathbf{w}_t | \mathbf{r}, c)$$

при ограничениях

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{w}}'_t = \operatorname{argmin} \tilde{J}'_t(\mathbf{w}_t | \mathbf{r}, c), \\ \tilde{\mathbf{Q}}'_t = \nabla_{\mathbf{w}_t}^2 \tilde{J}'_t(\mathbf{w}_t | \mathbf{r}, c) \text{ at } \mathbf{w}_t = \tilde{\mathbf{w}}'_t. \end{cases} \quad (27)$$

Для определения вектора  $\tilde{\mathbf{w}}'_t$  достаточно решить задачу выпуклой оптимизации  $\tilde{J}'_t(\mathbf{w}_t | \mathbf{r}, c) \rightarrow \min(\mathbf{w}_t \in \mathbb{R}^{n+1})$  (26) относительно следующего пакета данных  $(\mathbf{X}_t, \mathbf{Y}_t)$ :

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{w}}'_t = \operatorname{argmin}_{\mathbf{w}_t \in \mathbb{R}^{n+1}} & \left[ 2c \sum_{j=1}^{N_t} \ln \left( 1 + \exp \left( - \frac{2}{\sigma^2} y_{s,j} \mathbf{w}_s^T \mathbf{x}_{s,j} \right) \right) \right] + \\ & + (\mathbf{w}_t - q\tilde{\mathbf{w}}'_{t-1})^T (\mathbf{D}_r + q^2 \tilde{\mathbf{Q}}'_{t-1})^{-1} (\mathbf{w}_t - q\tilde{\mathbf{w}}'_{t-1}) \end{aligned} \quad (28)$$

Это «почти» обычная задача логистической регрессии, решаемая стандартными средствами выпуклой оптимизации. После чего матрица Гессеана определяется следующим образом:

$$\tilde{\mathbf{Q}}'_t = q^2 \mathbf{D}_r + \tilde{\mathbf{Q}}'_{t-1} + c^2 \mathbf{G}_{t-1}^T \mathbf{H}_{t-1} \mathbf{G}_{t-1}$$

где  $\mathbf{H}_{t-1} = \text{diag} \left( \frac{\exp(-c y_{t-1,j} \mathbf{w}_{t-1} \mathbf{x}_{t-1,j})}{(\exp(-c y_{t-1,j} \mathbf{w}_{t-1} \mathbf{x}_{t-1,j}) + 1)^2} \right)$ ,  $\mathbf{G}_{t-1} = \begin{bmatrix} y_{t-1,1} \mathbf{x}_{t-1,1} \\ y_{t-1,2} \mathbf{x}_{t-1,2} \\ \dots \\ y_{t-1,N_{t-1}} \mathbf{x}_{t-1,N_{t-1}} \end{bmatrix}$ .

**Квадратичное динамическое программирование.** Таким образом, эвристически заменили все функции Беллмана в (21) их квадратичными аппроксимациями  $\tilde{J}'_t(\mathbf{w}_t | \mathbf{r}, c) = (\mathbf{w}_t - \tilde{\mathbf{w}}'_t)^T \tilde{\mathbf{Q}}'_t (\mathbf{w}_t - \tilde{\mathbf{w}}'_t)$  (25), каждая из которых параметрически представлена точкой минимума  $\hat{\mathbf{w}}'_t$  (28) и Гессианом  $\tilde{\mathbf{Q}}'_t$ .

Пусть  $\{(\mathbf{X}_1, \mathbf{Y}_1), \dots, (\mathbf{X}_T, \mathbf{Y}_T)\}$  – доступная обучающая последовательность пакетов данных,  $\mathbf{r} = (r_1, \dots, r_n)$  – зафиксированный вектор, если веса признаков (10). Квадратичная версия процедуры динамического программирования (21) состоит в рекуррентном пересчете параметров  $\tilde{\mathbf{w}}'_t \in \mathbb{R}^{n+1}$  и  $\tilde{\mathbf{Q}}'_t [(n+1) \times (n+1)]$  квадратичных функций Беллмана:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{w}}'_0 &= \mathbf{0}, \tilde{\mathbf{Q}}'_0 = \mathbf{0}, t = 0; \\ \tilde{\mathbf{w}}'_t &= [\text{решение задачи логистической регрессии (28) для } (\mathbf{X}_t, \mathbf{Y}_t)], \\ \tilde{\mathbf{Q}}'_t &= \mathbf{Z}_t^T (\mathbf{D}_r + q^2 \tilde{\mathbf{Q}}'^{-1}_{t-1})^{-1} \mathbf{Z}_t. \end{aligned} \quad (29)$$

В соответствии с (22) последний результат  $\tilde{\mathbf{w}}'_T$  является приблизительной оценкой вектора параметров гиперплоскости ( $\hat{\mathbf{w}}_T | \mathbf{r}, q, c$ ) для последнего пакета данных обучающей совокупности. Квадратичная форма обратного рекуррентного соотношения (23) описывает оставшиеся оценки  $[(\hat{\mathbf{w}}_1 | \mathbf{r}, q, c), \dots, (\hat{\mathbf{w}}_{T-1} | \mathbf{r}, q, c)]$

$$\hat{\mathbf{w}}_{t-1} = (q^2 \mathbf{D}_r^{-1} + \tilde{\mathbf{Q}}'^{-1}_{t-1})^{-1} (q \mathbf{D}_r^{-1} \hat{\mathbf{w}}_t + \tilde{\mathbf{Q}}'^{-1}_{t-1} \tilde{\mathbf{w}}'_{t-1}), t = T, T-1, \dots, 1.$$

**2.2. Оценивание весов признаков для фиксированного смещения гиперплоскости.** Пусть задача (17) была решена, и  $((\hat{\mathbf{w}}_t | \mathbf{r}, c), t=1, \dots, T)$  является ее решением при фиксированном векторе дисперсий  $\mathbf{r} = (r_1, \dots, r_n)$ . В предыдущем разделе показано, как это решение может быть приближенно найдено с помощью простого алгоритма динамического программирования.

Если длина обучающей последовательности является достаточно большой  $T \rightarrow \infty$ , критерий (18) может быть представлен в виде

$$J(\mathbf{r} | \mathbf{w}_t, t=1, \dots, T, \mu) \xrightarrow{T \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \left[ \left( T-1 + \frac{1}{\mu} \right) \ln \frac{1}{r_i} + \frac{1}{r_i} \left( \sum_{t=2}^T (w_{i,t})^2 + \frac{1}{\mu} \right) \right].$$

Слагаемые являются выпуклыми функциями, а их частные производные  $\partial/\partial(1/r_i)[\dots] = 0$  дают простые формулы для решения  $(\hat{\mathbf{r}} | \mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_T, \mu)$  задачи (18)

$$(\hat{r}_i | \mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_T, \mu) = \frac{\sum_{t=2}^T (w_{i,t})^2 + (1/\mu)}{T-1 + (1/\mu)}, i=1, \dots, n. \quad (30)$$

2.3. *Итерационная процедура оценки параметров и влияния отбора признаков.* Как предполагалось в подразд. 1.2, элементы вектора  $\mathbf{r}=(r_1, \dots, r_n)$  описывают априорные стационарные дисперсии элементов смещающегося направляющего вектора  $\mathbf{a}_i=(a_{i,t}, i=1, \dots, n)$  (11) и подлежат оценке в процессе обучения. Пусть итерационная процедура начинается с некоторых начальных значений  $\mathbf{r}^0=(r_1^0, \dots, r_n^0)$ , например  $r_1^0 = \dots = r_n^0 = 1$ .

На  $k$ -м шаге вектор  $\mathbf{r}^k=(r_1^k, \dots, r_n^k)$  полностью определяет процедуру квадратного динамического программирования (29) результатом которой является оценка смещения разделяющей гиперплоскости  $[(\hat{\mathbf{w}}_1^k | \mathbf{r}^k, q, c), \dots, (\hat{\mathbf{w}}_T^k | \mathbf{r}^k, q, c)]$ ,  $\hat{\mathbf{w}}_i^k=(\hat{\mathbf{a}}_i^k, \hat{b}_i^k)$ . В свою очередь, рассчитанное смещение гиперплоскости дает новую оценку вектора  $\hat{\mathbf{r}}^{k+1}=(\hat{r}_1^{k+1}, \dots, \hat{r}_n^{k+1})$  (30), и так далее. Опыт показывает, что эта итерационная процедура сходится за 10–15 шагов.

### 3. Экспериментальные результаты

3.1. *Модельные данные.* Для экспериментального исследования разработанного метода были использованы искусственные данные, сгенерированные с помощью двух двумерных нормальных распределений с дисперсиями 0.5 и математическими ожиданиями -1 и 1 соответственно. В этих данных множества двух классов являются равнонаполненными, метки классов принимают значения из множества  $\{-1, 1\}$ . Каждый созданный объект имеет 100 признаков, из которых первые два сгенерированы с помощью упомянутых выше распределений и являются соответственно релевантными, для получения остальных использовалось еще одно нормальное распределение с нулевым математическим ожиданием. После генерации каждых 20 объектов распределения поворачивались относительно начала координат на угол 0.0314 радиана, всего было получено 2000 объектов. Проверка качества оцениваемых параметров осуществлялась по контрольной выборке, которой служило еще одно сгенерированное множество при тех же параметрах модельных распределений.

Для подбора оптимальных значений параметров  $\mu$ ,  $d$  и  $q$  была проведена серия экспериментов с их различными значениями. Так, параметры  $\mu$  и  $d$  варьировались от -3 до 3 с шагом 1 по шкале десятичных логарифмов,  $q$  – от 0,1 до 0,9 с шагом 0,1.

Для сравнения использовались некоторые алгоритмы для распознавания при смещении решающего правила из программного пакета Massive Online Analysis (MOA) [30].

- *OzaBagAdwin* – bagging с использованием метода ADWIN [31], который позволяет обнаруживать и оценивать происходящие в генеральной совокупности изменения. Составляющими ансамбля являются деревья решений для потоковых данных, листья которых представляют собой адаптивные байесовские классификаторы. Для определения оптимального значения числа компонентов ансамбля была проведена серия экспериментов, оптимальное значение выбиралось по минимуму ошибки.

- *SingleClassifierDrift* – одиночный классификатор в форме дерева решений с адаптивным байесовским правилом с обнаружением изменений концепта методом EDDM [32].

- *AdaHoeffdingOptionTree* представляет собой адаптивное дерево решений с дополнительными (option) узлами; максимальное количество таких узлов – 50.

Итоговые результаты приведены в табл. 1, где последняя строка соответствует результату для предложенного метода (*LrFeatureSelection*).

**Таблица 1**

**Экспериментальные результаты: модельные данные**

Алгоритм	Доля верно классифицированных объектов, %
<i>OzaBagAdwin</i>	85,38
<i>SingleClassifierDrift</i>	84,72
<i>AdaHoeffdingOptionTree</i>	85,24
<b><i>LrFeatureSelection</i></b>	86,26

В табл. 2 показаны итоговые значения вектора дисперсии.

**Таблица 2**

**Экспериментальные результаты: вектор дисперсий**

Номер признака	1	2	3	...	100
Дисперсия	47,6407	48,1681	0,7355	...	0,0052

Как можно видеть, первые две компоненты вектора являются на несколько порядков большими, чем остальные, что означает отбор первых двух признаков в качестве значащих.

3.2. *Реальные данные.* Программное обеспечение для обнаружения сетевых вторжений защищает компьютерную сеть от несанкционированных пользователей. Задачей обучения детектора вторжений является построение прогнозной модели (т.е. классификатора), способной различать «плохие» соединения, называемые вторжениями или атаками, и «хорошие», т.е. обычные нормальные соединения.

В качестве реальных данных был использован набор данных KDDCup'99 [33], который представляет собой набор TCP дампов, собранных на протяжении девяти недель в рамках программы DARPA по обнаружению вторжений в 1998 году. В этой программе локальная вычислительная сеть (LAN) моделировала типичную LAN военно-воздушных сил США, записывая все соединения. Соединение представляет собой последовательность TCP-пакетов, начатую и законченную в некоторое четко определенное время, содержащую поток данных между исходным и конечным IP-адресами по четко определенному протоколу. Каждое соединение имеет 41 признак и помечено либо как обычное, либо как нападение с указанием конкретного типа атаки, но так как мы решаем задачу классификации на два класса, то конкретный тип атаки не имеет значения. Этот набор данных существует в двух вариантах: полный – около 5 миллионов записей и его 10-процентное подмножество. В данной работе использовали 10-процентный набор данных, которые были нормализованы и разделены на 49 пакетов, каждый из которых содержит 10000 соединений.

Как и в предыдущем разделе, мы сравнили результаты, полученные с помощью метода, с результатами трех алгоритмов из программного пакета MOA. Контроль осуществлялся по принципу «interleaved-test-then-train», который состоит в предварительном расчете качества классификации на новой группе объектов, перед тем как использовать эту группу для обучения. Усредненные результаты представлены в табл. 3.

**Таблица 3**  
**Экспериментальные результаты: данные KDDCup'99**

Алгоритм	Доля верно классифицированных объектов, %
OzaBagAdwin	93.856
SingleClassifierDrift	92.88
AdaHoeffdingOptionTree	98.944
LrFeatureSelection	99.56

**Заключение.** Основной идеей данной статьи является новый метод отбора признаков для задач смещения концепта при анализе потоков данных. В центре внимания – иерархическая байесовская модель с регулируемой селективностью, которая позволяет получить несмещенные асимптотические оценки параметров, обладающих оракульными и обобщающими свойствами. Методологическая применимость предложенного алгоритма смещения концепта с регулируемой селективностью демонстрируется с помощью проведенных экспериментальных исследований на модельных и реальных данных. По сравнению с тремя распространенными алгоритмами смещения концепта предложенный метод показывает гораздо большую се-

лективность при выборе информативных признаков. В результате он имеет значительно меньшую абсолютную погрешность ошибки распознавания класса.

Даная работа поддержана грантами РФФИ №16-07-01008 (Ц2115.1 ГРФ), 14-07-00964, 14-07-00661.

### **Список литературы**

1. Widmer G., Kubat M. Learning in the presence of concept drift and hidden contexts // *Machine Learning*. 1996. 23 (1). P. 69 – 101.
2. P. Dongre, L. Malik. Stream Data Classification and Adapting to Gradual Concept Drift // *International Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies*. March 2014. Volume 2. Issue 3. P. 125 – 129.
3. Chen, S., Wang, H., Zhou, S., Yu, P. Stop chasing trends: Discovering high order models in evolving data // *Proc. ICDE*. 2008. P. 923 – 932.
4. Hulten G., Spencer L., Domingos P. Mining time-changing data streams // *SIGKDD*, San Francisco, CA, USA, August 2001. P. 97 – 106.
5. Yang Y., Wu X., Zhu X. Combining proactive and reactive predictions for data streams // *Proc. SIGKDD*, 2005. P. 710 – 715.
6. Kolter J., Maloof M. Using additive expert ensembles to cope with concept drift // *ICML*. Bonn, Germany, August 2005. P. 449 – 456.
7. Wang H., Fan W., Yu P.S., Han J. Mining concept-drifting data streams using ensemble classifiers // *KDD 2003*. P. 226 – 235.
8. Zhou X., Li S., Chang C., Wu J., Liu K. Information-value-based feature selection algorithm for anomaly detection over data streams // *Tehnicki vjesnik*. 2014. 21(2). P. 223 – 232.
9. Sauerbrei W. The use of resampling methods to simplify regression models in medical statistics // *Journal of the Royal Statistical Society, Series C (Applied Statistics)*. 1999. Vol. 48. Issue 3. P. 313 – 329.
10. Sauerbrei W., Schumacher M. A bootstrap resampling procedure for model building: Application to the cox regression model // *Statistics in Medicine*. December 1992. 11(16). P. 2093 – 2109.
11. Zou H. Hastie T. Regularization and variable selection via the elastic net. *Journal of the Royal Statistical Society*, 2005, Vol. 67. P. 301 – 320.
12. Zou H. The adaptive lasso and its oracle properties // *Journal of the American Statistical Association*. 2006. Vol. 101. Issue 476. P. 1418 – 1429.
13. Zou H. Li R. One-step sparse estimates in nonconcave penalized likelihood models (with discussion). *Annals of Statistics*, 2008, 36. P. 1509-1566.
14. Seredin O., Kopylov A., Mottl V. Selection of Subsets of Ordered Features in Machine Learning // *Machine Learning and Data Mining in Pattern Recognition*, 6th International Conference, MLDM 2009. Leipzig, Germany, July 23 – 25, 2009. *Lecture Notes in Computer Science*. 5632. Springer, 2009. P. 16 – 28.

15. Seredin O., Mottl V., Tatarchuk A., Razin N., Windridge D. Convex Support and Relevance Vector Machines for selective multimodal pattern recognition // Proceedings of the 21th International Conference on Pattern Recognition, Tsukuba, Japan, November 11 – 15, 2012. P. 1647 – 1650.
16. Fan J., Samworth R., Wu Y. Ultrahigh Dimensional Feature Selection: Beyond The Linear Model // Journal of Machine Learning Research. 2009. Volume 10. P. 2013 – 2038.
17. Cai D., Zhang C., He X. Unsupervised Feature Selection for Multi-cluster Data // Proceedings of the 16th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining KDD '10, ACM New York, NY, USA, 2010. P. 333 – 342.
18. Yang H., Lyu M.R., King I. Efficient Online Learning for Multitask Feature Selection // ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data (TKDD). July 2013. Vol. 7. Issue 2. Article 6.
19. Song Q., Ni J., Wang G. A Fast Clustering-based Feature Subset Selection Algorithm for High-dimensional Data // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. Jan. 2013. Vol. 25. Issue 1. P. 1 – 14.
20. Maung C., Schweitzer H. Pass-efficient Unsupervised Feature Selection. Advances in Neural Information Processing Systems // Neural information processing systems foundation, 27th Annual Conference on Neural Information Processing Systems. NIPS 2013. P. 1628 – 1636.
21. Krasotkina O., Mottl V. A Bayesian approach to sparse learning-to-rank for search engine optimization // Proceedings of the 11th International Conference on Machine Learning and Data Mining (MLDM 2015). Hamburg, Germany, July 20-23, 2015. P. 382 – 394.
22. Krasotkina O., Mottl V. A Bayesian approach to sparse Cox regression in high-dimensional survival analysis // Proceedings of the 11th International Conference on Machine Learning and Data Mining (MLDM 2015). Hamburg, Germany, July 20-23, 2015. P. 425 – 437.
23. De Groot M. Optimal Statistical Decisions. McGraw-Hill Book Company, 1970.
24. Cortes C., Vapnik V. Support-Vector Networks // Machine Learning. 1995. 20. P. 273 – 297.
25. Vapnik V. Statistical Learning Theory. NY: J. Wiley, 1998.
26. Tatarchuk A., Mottl V., Eliseyev A., Windridge D. Selectivity supervision in combining pattern-recognition modalities by feature- and kernel-selective Support Vector Machines // Proceedings of the 19th International Conference on Pattern Recognition. 2008. Vol 1 – 6. IEEE. P. 2336 – 2339.
27. Markov M., Krasotkina O., Mottl V., Muchnik I. Time-varying regression model with unknown time-volatility for nonstationary signal analysis // Proceedings of the 8th IASTED International Conference on Signal and Image Processing. Honolulu, Hawaii, USA, August 14 – 16. 2006. P. 534 – 196.

28. Bellman R. Dynamic Programming. Princeton University Press, Princeton, NJ, 1957.

29. Sniedovich M. Dynamic Programming. Marcel Dekker, NY, 1991.

30. Bifet A., Holmes G., Kirkby R., Pfahringer B. MOA: Massive Online Analysis // Journal of Machine Learning Research (JMLR). 2010. <http://sourceforge.net/projects/moa-datastream/>.

31. Bifet A., Holmes G., Pfahringer B., Kirkby R., Gavalda R. New ensemble methods for evolving data streams // Proceedings of the 15th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining. Paris, France, June 28-July 1, 2009. P. 139 – 148.

32. Gama J., Medas P., Castillo G., Rodrigues P. Learning with drift detection. SBIA 2004 // The Brazilian Symposium on Artificial Intelligence. Lecture Notes in Computer Science. 2004. Volume 3171. P. 286 – 295.

33. KDD Cup 1999 Data. URL: <http://kdd.ics.uci.edu/databases/kddcup99>.

*Турков Павел Анатольевич, асп., [pavel.turkov@gmail.com](mailto:pavel.turkov@gmail.com), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

*Красоткина Ольга Вячеславовна, канд. физ.-мат. наук, доц., [o.v.krasotkina@yandex.ru](mailto:o.v.krasotkina@yandex.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

*Моттль Вадим Вячеславович, д-р техн. наук, проф., [v.v.mottl@yandex.ru](mailto:v.v.mottl@yandex.ru), Россия, Москва, Вычислительный центр им. А. А. Дородницына, РАН,*

*Сычугов Алексей Алексеевич, канд. техн. наук, директор института, [xru2003@list.ru](mailto:xru2003@list.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет*

#### **FEATURE SELECTION FOR HANDLING CONCEPT DRIFT IN THE DATA STREAM CLASSIFICATION**

*P.A. Turkov, O.V. Krasotkina, V.V. Mottl*

*This paper proposes a new Bayesian framework to feature selection in data streams pattern recognition problem. We suggest a hierarchical probabilistic model with sparse regularization for estimation of decision rule parameters. The proposed approach gives a strong Bayesian formulation of the shrinkage criterion for predictor selection. Experimental results show that the proposed framework outperforms other methods of concept drift analysis.*

*Key words: feature selection, concept drift, changing environment, data streams classification, supervised learning, pattern recognition.*

*Turkov Pavel Anatolievich, postgraduate, [pavel.turkov@gmail.com](mailto:pavel.turkov@gmail.com), Russia, Tula, Tula State University,*

*Krasotkina Olga Vyacheslavovna, doctorate of physico-mathematical sciences, docent, [o.v.krasotkina@yandex.ru](mailto:o.v.krasotkina@yandex.ru), Russia, Tula, Tula State University,*

*Mottl Vadim Vyacheslavovich, doctor of engineering sciences, professor, v.v.mottl@yandex.ru, Russia, Moscow, Dorodnicyn Computing Centre, RAS,*

*Sychugov Alexey Alexeevich, candidate of technical sciences, head of the Institute, xru2003@list.ru, Russia, Tula, Tula State University*

УДК 004.932

## **АЛГОРИТМЫ УТОЧНЕНИЯ ОСИ ЗЕРКАЛЬНОЙ СИММЕТРИИ, НАЙДЕННОЙ МЕТОДОМ СРАВНЕНИЯ ПОДЦЕПОЧЕК СКЕЛЕТНЫХ ПРИМИТИВОВ**

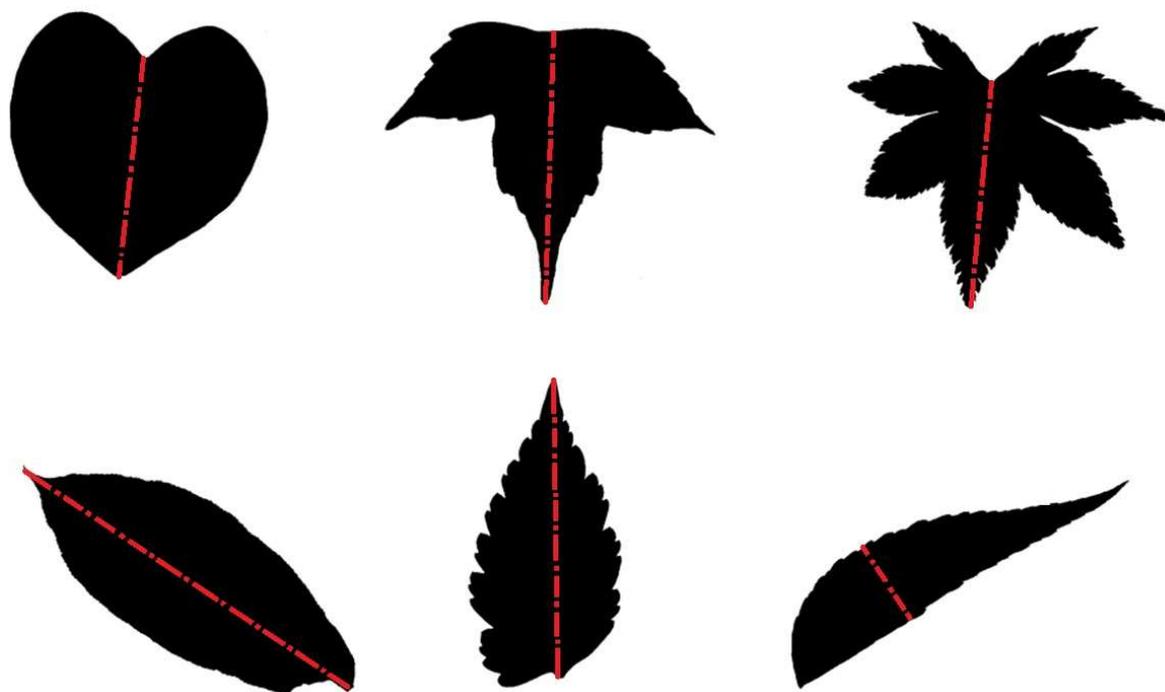
С.А. Федотова, О.С. Середин, О.А. Кушнир

*Метод поиска оси зеркальной симметрии бинарного изображения, основанный на функции сравнения подцепочек примитивов, кодирующих скелет фигуры, позволяет искать ось симметрии не только идеально симметричных, но и почти симметричных (квазисимметричных) изображений за время, близкое к реальному. Для оценки симметричности фигуры относительно некоторой оси используется теоретико-множественное подобие Жаккарда, применяемое к подмножествам пикселей фигуры при делении ее осью. Зачастую ось, найденная скелетным методом, отклоняется в большей или меньшей степени от эталонной оси симметрии, определенной переборным методом из всех возможных осей, пересекающих фигуру. Поэтому предлагаются алгоритмы, позволяющие уточнить найденную быстрым скелетным методом ось, путем поиска ближайшей к ней оси с большим по мере Жаккарда значением симметричности. Экспериментальные исследования на базе изображений Flavia показывают, что предложенные алгоритмы позволяют найти эталонную ось симметрии (или немало отличающуюся по мере от эталонной) за время, близкое к реальному.*

*Ключевые слова: зеркальная симметрия, бинарные растровые изображения, подцепочки скелетных примитивов, алгоритмы уточнения.*

**Введение.** При анализе форм бинарных изображений можно заметить, что ряду объектов как искусственного, так и природного происхождения присуща зеркальная (осевая) симметрия. Очевидно, что реальные изображения редко бывают идеально симметричны. Поэтому представляет интерес задача поиска приближенной симметрии и оценки степени симметричности изображения (рис. 1). Оценка симметричности фигур может применяться для решения многих задач, таких как анализ условий произрастания растений или обнаружения опухолей в медицинской обработке изображений.

Задача определения симметрии и нахождения меры симметричности для бинарных изображений известна, но существует достаточно небольшое число эффективных методов для ее решения, основывающихся на: 1) параметрическом представлении контура фигуры и разложении его в ряд Фурье; 2) представлении контура фигуры функцией поворота; 3) представлении контура фигуры критическими точками и вычислении сходства двух подконтуров при помощи векторов геодезических расстояний фигуры; 4) парном сравнении подцепочек скелетных примитивов. Все перечисленные методы базируются на известных алгоритмах вычисления различия (или сходства) форм фигур.



**Рис. 1. Примеры изображений с большей (вверху) или меньшей (внизу) степенью симметричности**

Перечисленные эффективные методы являются приближенными, следовательно, найденные ими оси симметрии можно уточнить. В качестве уточняемого алгоритма выбран быстрый метод для определения оси симметрии, использующий аппарат вычисления меры сравнения бинарных изображений на основе цепочек скелетных примитивов [11]. В данной статье описываются варианты уточняющих алгоритмов, основанных на точном алгоритме определения зеркальной симметрии.

Разработанные методы экспериментально исследованы на известной базе бинарных растровых изображений Flavia [10] и базе изображений бабочек, результаты экспериментов показаны в соответствующем разделе. В заключение приводятся некоторые рассуждения и выводы, а также дальнейшие направления работы.

**Обзор существующих методов определения симметрии.** В литературе известен ряд методов быстрого приближенного поиска оси зеркальной симметрии и меры симметричности на бинарных изображениях. Методы основаны на идее применения некоторой известной процедуры сравнения форм фигур к задаче нахождения симметрии. При этом процедура подвергается модификации, так как необходимо сравнивать не две разные фигуры, а две части одной фигуры между собой. Фигура делится на две части некоторой прямой, и сходство частей понимается как их зеркальное сходство относительно выбранной прямой. Наиболее похожие в результате сравнения части фигуры и будут ее зеркально симметричными частями, а прямая, которая делит фигуру, – искомой осью симметрии фигуры.

В работе [7] определение зеркальной симметрии фигур производится на основе параметрического представления контура. Предлагаются несколько вариантов периодического параметрического представления полигонального контура фигуры, сохраняющих информацию о форме. В качестве параметра используется так называемая нормированная длина дуги, т.е. нормированный на величину  $2\pi$  периметр контура. Далее параметрическое представление раскладывается в ряд Фурье, коэффициенты рядов Фурье разных контуров сравниваются между собой посредством вычисления расстояния между ними. На основе такого метода может вычисляться либо парная мера различия фигур (коэффициенты Фурье контуров двух фигур), либо степень асимметрии фигуры (коэффициенты Фурье двух частей контура одной фигуры).

В статье [8] предложен способ определения зеркальной симметрии фигур на основе вычисления функции поворота контура. В основу положен метод сравнения полигональных фигур, изложенный в [1], где контур фигуры, длина которого нормируется к единице, описывается при помощи функции поворота. Функция поворота является периодическим параметрическим описанием контура фигуры. Недостатком такого описания является его чувствительность к шумам на границе фигуры, поэтому перед сравнением фигур рекомендуется провести сглаживание их контуров. Приводится метрика различия для двух функций поворота, инвариантная к переносу, повороту и масштабированию фигур. На основе данной метрики определяется мера сходства фигур, при помощи которой можно определить меру симметричности фигуры как максимум меры сходства между ее контуром и тем же контуром, отраженным относительно некоторой прямой – оси симметрии.

В основу метода вычисления зеркальной симметрии, изложенного в [9], положен принцип определения самосходства частей контура фигуры на основе вычисления геодезических расстояний до главных точек. Контур фигуры представляется в виде набора нескольких (обычно не более 20) главных точек (critical points), найденных при помощи метода вычисления дискретной кривой [5] (Discrete Curve Evolution (DCE) method). По-

лученный контур делят на два примерно равных подконтуров, один из которых рассматривают в порядке по часовой стрелке, второй – против. Для каждой главной точки вычисляют вектор геодезических (внутренних по фигуре) расстояний (идея взята из [6]) от нее до каждой из точек контура. Далее вычисляют матрицу расстояний между векторами, принадлежащими двум подконтуром, и по матрице находят оптимальное выравнивание подконтуров и меру их различия. Для уточнения результата поиска наиболее похожих подконтуров всю процедуру проделывают 16 раз с количеством главных точек от 5 до 20.

Заметим, что перечисленные выше методы поиска зеркальной симметрии основываются на контурном представлении формы фигуры.

В работе [11] описан метод определения оси симметрии на основе скелетного представления формы фигуры [2] и процедуры парного сравнения скелетов бинарных растровых изображений, заданных цепочками примитивов, смысл которой изложен в работах [3,4,12]. Чтобы закодировать скелет цепочкой примитивов, надо провести обход скелета против часовой стрелки. Каждый примитив представляет ребро скелета в процессе обхода и состоит минимум из двух нормированных значений: длины ребра скелета и величины угла между текущим и следующим ребрами. Нормировка длины производится на диаметр минимальной окружности, описанной вокруг скелета, а нормировка угла – на  $2\pi$ .

Для более полного и точного представления формы фигуры рекомендуется расширять примитив третьим компонентом – вектором коэффициентов Лежандра [12]. Коэффициенты являются параметрическим описанием радиальной функции скелетного ребра. Цепочку примитивов получают при обходе скелета против часовой стрелки ребро за ребром. Данный способ представления скелета является инвариантным к переносу, масштабированию и ориентации (повороту) исходных бинарных растровых изображений [3].

Скелет изображения можно условно разделить на два подскелета – «левый» и «правый» и построить для них цепочки примитивов, обойдя левый против часовой стрелки, а правый – по часовой. Полученные таким образом левую и правую подцепочки можно сравнивать при помощи функции сравнения цепочек на основе парного выравнивания [4]. В случае зеркально симметричной (или почти симметричной) фигуры один из вариантов разбиения ее скелета на подскелеты, соответствующий симметричным частям фигуры, будет давать при сравнении меру, минимальную из всех остальных возможных разбиений. Две вершины скелета, ограничивающие его разбиение на подскелеты, будут считаться точками, принадлежащими оси симметрии фигуры.

**Функция симметрии бинарного растрового изображения.** Существует точный алгоритм оценки симметрии, основанный на полном попарном переборе точек внешнего контура, суть которого заключается в сле-

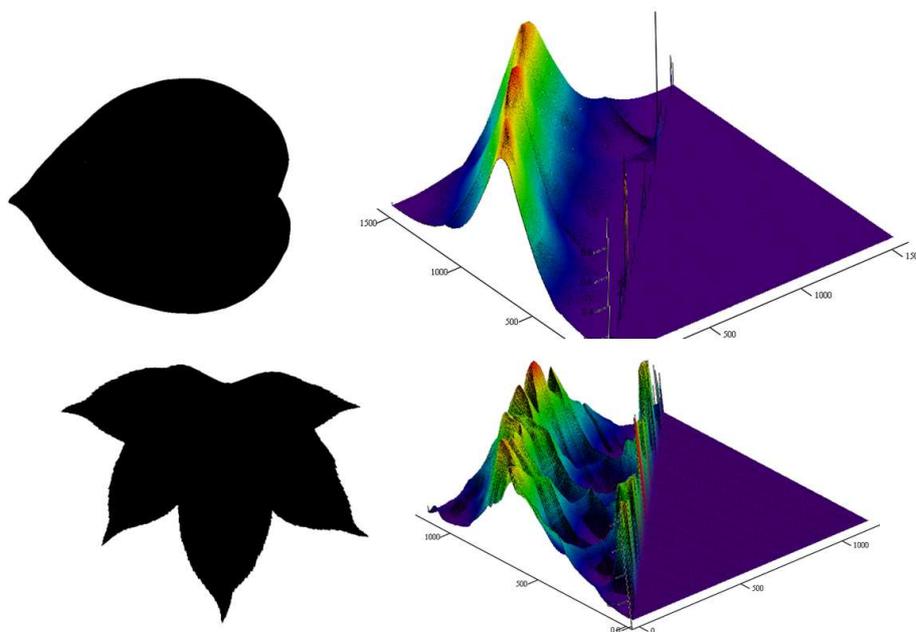
дующем: через пару точек проводится прямая, которая рассматривается как возможная ось симметрии фигуры. Ось делит фигуру на две части, которые представляются как два множества точек-пикселей, сходство между которыми вычисляется по мере Жаккарда:

$$\mu_T(B) = \frac{|S(B) \cap S(B_r)|}{|S(B) \cup S(B_r)|},$$

где  $B$  – бинарное изображение, яркость черных пикселей которого обозначим 1, белых – 0;  $B_r$  – изображение, полученное отражением бинарного изображения  $B$  относительно прямой,  $S(B)$  – множество пикселей изображения  $B$ , яркость которых равна 1.

Прямая, которая делит фигуру на два наиболее схожих множества (мера Жаккарда на них максимальна), считается искомой осью симметрии фигуры. Поскольку алгоритм полного перебора имеет очень большую трудоемкость, были предложены две ускоренные версии – оптимизация с учетом полупериметра фигуры и оптимизация с учетом центра масс фигуры [11].

Введем понятие *функции симметрии* как двухместной функции, принимающей в качестве аргументов пару точек контура и ставящей им в соответствие меру Жаккарда как меру симметричности фигуры относительно задаваемой этими точками оси. Рис. 2 иллюстрирует тот факт, что функция симметрии имеет множество локальных экстремумов, и это приводит к невозможности использования методов направленного поиска для нахождения оси (осей) симметрии фигуры.



**Рис. 2. Примеры изображений и соответствующих им значений функций симметрии для вариантов осей, проходящих через все  $N \cdot (N - 1) / 2$  пары точек контура**

### **Метод уточнения оси зеркальной симметрии фигур, полученной алгоритмом на основе сравнения подцепочек скелетных примитивов.**

Очевидно, что описанные ранее методы поиска оси зеркальной симметрии, основанные на процедурах сравнения форм фигур, являются приближенными. В настоящей работе исследуется возможность уточнения оси симметрии, найденной скелетным методом [11]. Предварительные исследования показали, что такая ось обычно дает меньшую меру симметричности по сравнению с осью, полученной полным перебором и доставляющей максимальную меру симметричности данному изображению. Предполагается, что скелетная ось, тем не менее, является «хорошим» претендентом для старта некоторой процедуры уточнения меры симметрии, т.е. она располагается таким образом, что пересекает контур фигуры в некоторой  $\varepsilon$ -окрестности каждой из точек пересечения эталонной оси симметрии с контуром этой фигуры.

Следовательно, для повышения точности скелетного метода имеет смысл уточнить найденную им ось симметрии, т.е. найти в некоторой ее окрестности прямую, которая будет иметь большую меру симметричности. Предполагается, что уточненная ось будет получена за приемлемое время.

Будем называть уточняемую скелетную ось затравочной, а любую ось-кандидат в процессе поиска уточненной оси – пробной. Так как ось симметрии хотя бы дважды пересекает контур объекта, то для построения пробных осей рассматриваются только граничные точки фигуры. Этого вполне достаточно для определения значения функции симметрии. Контур изображения представлен последовательностью точек, пронумерованных от 0 до  $N$ .

#### ***Первый вариант алгоритма уточнения оси (рис. 3)***

1. Затравочная ось определяется двумя точками пересечения с контурами:  $p_1$  и  $p_2$ .

2. Определить точки, находящиеся в некоторой заданной окрестности  $\varepsilon$  от первой точки:  $a = p_1 - \varepsilon$ ,  $b = p_1 + \varepsilon$ . Эти две точки ( $a$  и  $b$ ) ограничивают конечный набор некоторых точек контура  $[a;b]$ . Определить точки, находящиеся в некоторой заданной окрестности  $\varepsilon$  от второй точки:  $c = p_2 - \varepsilon$ ,  $d = p_2 + \varepsilon$ . Эти две точки ( $c$  и  $d$ ) ограничивают конечный набор некоторых точек контура  $[c;d]$ .

3. На отрезках  $[a;b]$  и  $[c;d]$  выбираются множества равноудаленных точек  $Q = \{q_i = a + h \cdot i, i = 0, \dots, n\}$ ,  $S = \{s_i = c + h \cdot i, i = 0, \dots, n\}$ , где  $n$  – число участков разбиения отрезков;  $h$  – шаг разбиения, который рассчиты-

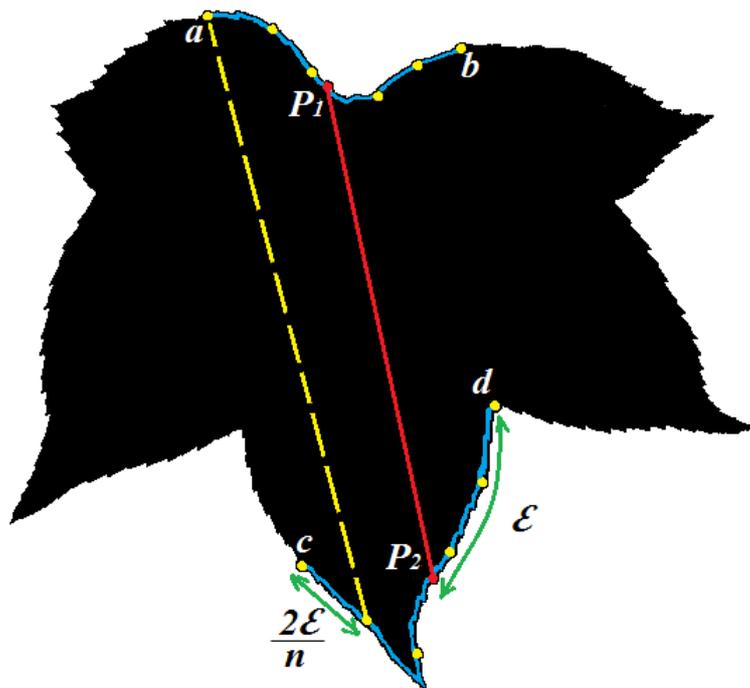
вается как  $\frac{2\varepsilon}{n}$ .

4. Попарно перебрать точки множеств  $Q$  и  $S$ , полученные в п. 3. Пара точек определяет некоторую прямую, т.е. ось. Вычислить меру симметрии относительно каждой полученной пробной оси, запомнить ту из них, для которой получена максимальная мера симметрии.

5. Если шаг  $h$  больше 1, то две точки  $p'_1$  и  $p'_2$ , относительно которых получен максимум меры симметрии, передаются в п. 2:  $p_1 := p'_1$ ,  $p_2 := p'_2$ ,  $\varepsilon := h$ , иначе переход на п. 6.

6. Если найденная прямая лежит на границе поиска (любая ее точка совпадает с одной из точек  $a, b, c, d$ ), то она объявляется затравочной и описывающие её точки  $p'_1$  и  $p'_2$  передаются в п. 1, иначе найдена прямая, доставляющая максимум мере симметрии.

В результате работы алгоритма будет найдена ось, мера симметричности относительно которой будет не меньше меры, полученной скелетным методом.



**Рис. 3. Пример выбора множества равноудаленных точек в первом варианте алгоритма (красная ось – ось, полученная скелетным методом; желтая пунктирная – одна из пробных осей, которые проводятся в первом варианте алгоритма уточнения)**

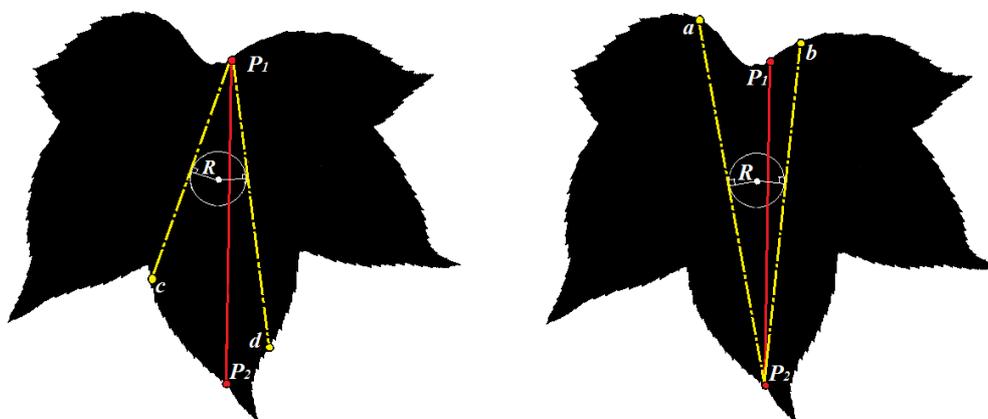
#### **Второй вариант алгоритма уточнения оси**

Известно, что ось идеальной симметрии обязательно проходит через центр масс фигуры. Используем этот факт для оптимизации первого варианта алгоритма уточнения оси, полученной скелетным методом. Как

правило, ось приближенной симметрии проходит не точно через центр масс, а в некоторой его окрестности  $R$ , которую условно будем рассматривать как окружность. Радиус  $R$  такой окружности рассчитывается как  $k_R \cdot D$ , где  $D$  – расстояние от центра масс до самой удаленной точки контура,  $k_R$  – коэффициент близости к центру масс. Если имеются априорные знания о качестве затравочной оси, то будет достаточно перебрать только те пробные оси, которые находятся не далее чем на расстоянии  $R$  от центра масс, задаваемом через параметр  $k_R$ . Только они пересекают окружность с радиусом  $R$ , центром которой является центр масс. Тем самым из перебора, соответствующего первому варианту алгоритма уточнения, будет исключена часть прямых, мера симметрии для них вычисляться не будет, и, следовательно, время работы метода сократится.

**Третий вариант алгоритма уточнения оси (рис. 4).**

Особенностью данного варианта является начальный выбор участков уточнения, который делается следующим образом. Затравочная ось определяется двумя точками пересечения с контуром  $p_1$  и  $p_2$ . Из этих точек проводятся касательные к окружности с радиусом  $R$  и центром, совпадающим с центром масс фигуры, как показано на рис. 4. Две пары касательных ограничивают два конечных набора точек контура фигуры  $[a;b]$  и  $[c;d]$ , на которых уже производится уточнение, как во втором варианте алгоритма.



**Рис.4. Построение касательных к окружности из точек  $p_1$  и  $p_2$**

Применение такого способа позволяет гибко выбирать как расположение интервала поиска на контуре фигуры, так и длину этого интервала, задавая значение лишь для единственного параметра  $k_R$ .

*Примечание 1. Последовательности  $[a;b]$  и  $[c;d]$  могут быть разной длины. Поэтому при получении равноудаленных точек в первой и второй последовательностях шаг разбиения будет отличаться. Из этого следует, что алгоритм заканчивает свое выполнение только тогда, когда шаг разбиения и в первой и во второй последовательностях будет равен 1.*

*Примечание 2. Если ось не пересекает окружность около центра масс и точка  $p_1$  лежит за пределами интервала  $[a;b]$ , то интервал расширяется до точки  $p_1$ . Аналогично, если точка  $p_2$  лежит за пределами интервала  $[c;d]$ , то интервал расширяется до точки  $p_2$ .*

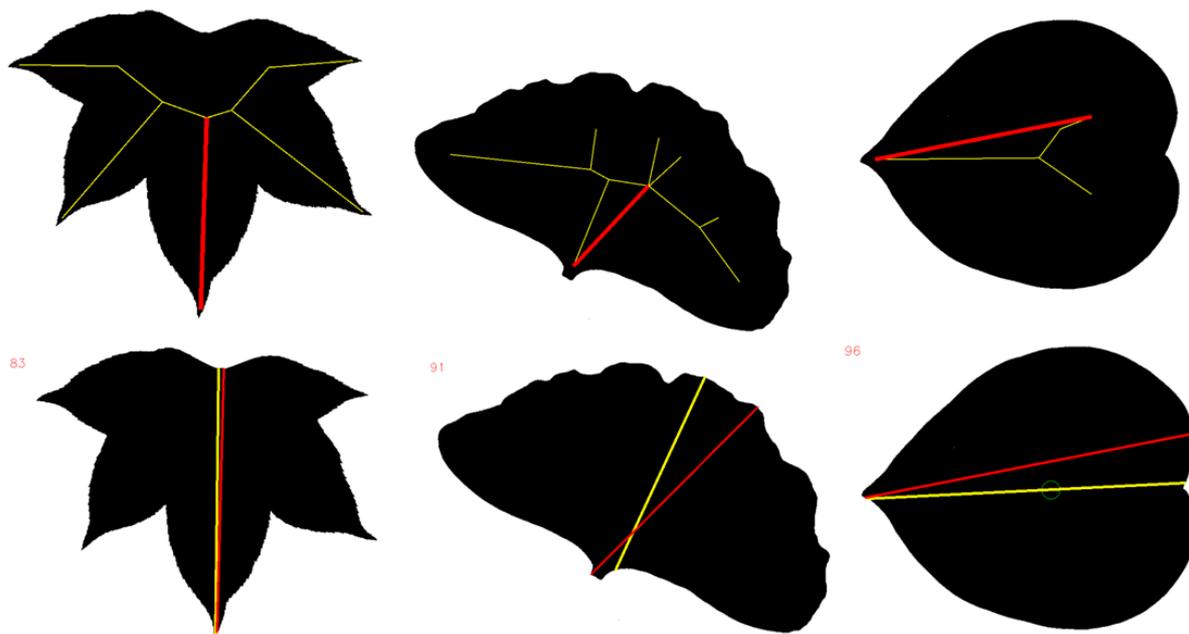
**Экспериментальные исследования.** Разработанные методы экспериментально исследованы на известной базе бинарных растровых изображений Flavia [10] и базе изображений «Бабочки». В базе Flavia было обработано 5 классов изображений: 4, 8, 18, 30 и 32, содержащих от 52 до 72 изображений. В базе «Бабочки» представлено 30 изображений.

Во всех экспериментах значение  $n$  принималось равным 10, а параметры  $\varepsilon$  и  $k_R$  варьировались. В таблице результатов приведены следующие данные для каждого класса изображений: среднее квадратическое отклонение полученной меры симметрии от меры, полученной полным перебором (эталонной меры); максимальное отклонение, а также количество отклонений в классе изображений, превышающих среднеквадратическое отклонение в три раза; среднее время обработки одного изображения в секундах.

### Результаты экспериментов

Пиктограмма класса	Характеристики	Алгоритм 1			Алгоритм 2				Алгоритм 3		
		$\varepsilon=1/4$	$\varepsilon=1/8$	$\varepsilon=1/16$	$\varepsilon=1/4$		$\varepsilon=1/8$		$k_R=0,03$	$k_R=0,05$	$k_R=0,1$
Объектов, шт					$k_R=0,03$	$k_R=0,05$	$k_R=0,03$	$k_R=0,05$			
 72	С.к.о. ( $\sigma$ )	0.022	0.007	0.018	0.023	0.022	0.007	0.007	0.022	0.007	0.019
	max отклонение	0.105	0.048	0.077	0.105	0.105	0.048	0.048	0.179	0.048	0.160
	кол-во больше $3\sigma$	3	2	4	4	3	2	2	1	2	1
	Ср. время, сек	3.727	3.048	2.973	2.037	0.238	1.894	2.021	1.938	2.131	2.743
 64	С.к.о. ( $\sigma$ )	0.021	0.028	0.059	0.028	0.021	0.028	0.028	0.062	0.060	0.053
	max отклонение	0.121	0.148	0.233	0.150	0.121	0.148	0.148	0.204	0.197	0.187
	кол-во больше $3\sigma$	1	3	2	2	1	3	3	2	2	1
	Ср. время, сек	4.161	3.005	3.163	2.276	2.579	1.552	1.921	2.144	2.453	2.564
 62	С.к.о. ( $\sigma$ )	0.020	0.091	0.093	0.067	0.049	0.092	0.091	0.121	0.124	0.109
	max отклонение	0.097	0.280	0.290	0.228	0.226	0.280	0.280	0.387	0.352	0.296
	кол-во больше $3\sigma$	3	1	1	3	3	1	1	1	0	0
	Ср. время, сек	4.993	3.805	3.915	2.715	3.226	2.000	2.366	1.812	2.255	2.536
 56	С.к.о. ( $\sigma$ )	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.002	0.002	0.026	0.050	0.074
	max отклонение	0.002	0.008	0.001	0.002	0.002	0.008	0.008	0.102	0.181	0.284
	кол-во больше $3\sigma$	2	3	1	2	2	3	3	2	2	2
	Ср. время, сек	3.669	2.743	2.901	2.237	2.513	1.659	2.056	1.438	1.379	1.375
 52	С.к.о. ( $\sigma$ )	0.011	0.015	0.024	0.020	0.021	0.012	0.015	0.041	0.039	0.024
	max отклонение	0.043	0.067	0.140	0.125	0.125	0.060	0.067	0.228	0.228	0.141
	кол-во больше $3\sigma$	3	2	1	1	1	2	2	2	2	1
	Ср. время, сек	5.651	5.886	4.638	3.089	3.801	3.609	4.344	3.669	4.296	4.227
 30	С.к.о. ( $\sigma$ )	0.029	0.021	0.104	0.058	0.050	0.021	0.021	0.117	0.089	0.113
	max отклонение	0.112	0.099	0.365	0.298	0.228	0.099	0.099	0.478	0.470	0.467
	кол-во больше $3\sigma$	2	1	2	1	1	1	1	2	1	1
	Ср. время, сек	3.092	3.404	2.453	2.014	2.399	2.659	2.930	2.307	2.597	2.169

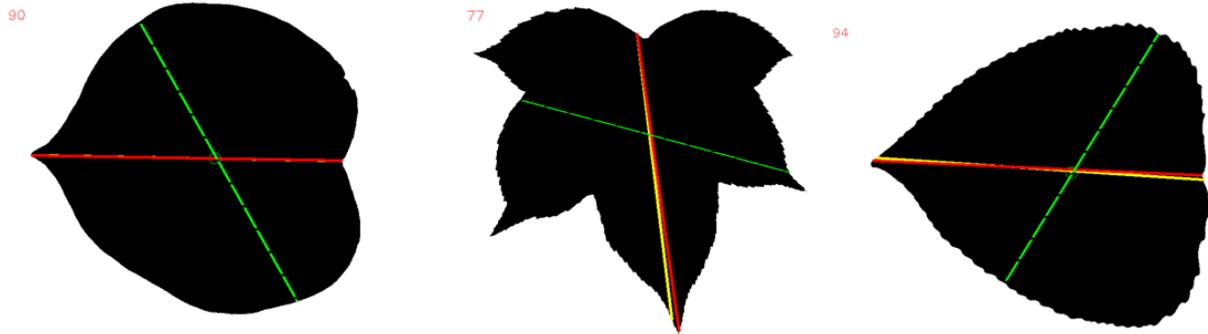
На рис. 5 продемонстрированы результаты работы алгоритма: красной линией показана затравочная ось, полученная методом сравнения подцепочек примитивов скелетов изображений (верхний ряд рисунка), желтым цветом показана ось, полученная предложенным в работе методом уточнения, зеленой пунктирной линией показана ось, полученная полным перебором.



**Рис. 5. Иллюстрация работы метода: верхний ряд – ось, полученная скелетным методом (красная); нижний ряд – уточненная ось (желтая). Во всех случаях уточненная ось совпадает с осью, найденной полным перебором**

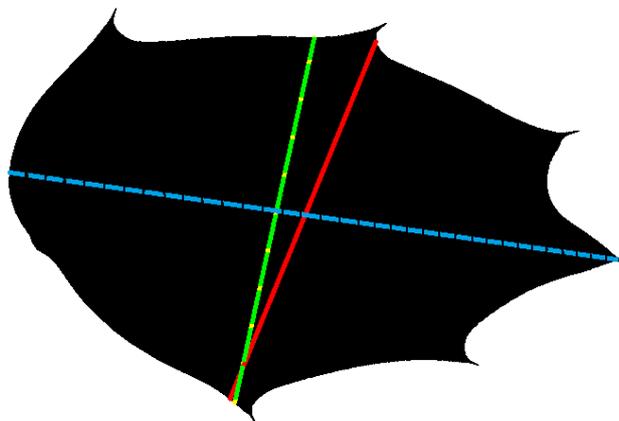
**Обсуждение результатов и заключение.** Предложенный метод позволяет уточнить ось симметрии бинарного растрового изображения, найденную методом сравнения подцепочек примитивов, кодирующих скелет фигуры. Из таблицы видно, что отклонения, если они и присутствуют, крайне незначительны. Предложенному алгоритму не удалось добиться приемлемого решения буквально на нескольких изображениях, что объясняется крайне неудачно найденной затравочной осью. Кроме того, результаты на базе «Бабочки» демонстрируют, что в случае, когда обрабатываемые изображения обладают высокой степенью зеркальной симметрии (мера симметрии более 0,9), решение находится всегда, поскольку для таких изображений скелетный метод дает очень хорошее начальное приближение.

В ходе проверки работы предложенного алгоритма были установлены случаи, когда ось, найденная методом сравнения подцепочек примитивов скелетного описания фигуры, существенно отличалась от оси, найденной полным перебором (рис. 6). Однако с точки зрения человека-эксперта положение оси, имеющей максимальное значение по мере Жаккарда, не кажется разумным. В то же время ось, найденная скелетным методом, соответствовала ожиданиям эксперта. Авторы считают, что этот факт нуждается во всестороннем изучении и, возможно, разработке новых способов описания зеркальной симметрии фигур, комбинирующих меры, вычисляемые на подмножествах пикселей, с контурными методами.



**Рис. 6. Примеры изображений, для которых ось симметрии, соответствующая максимальному значению меры Жаккарда (зеленая пунктирная линия), существенно отличается от экспертной оси симметрии**

Стоит отметить, однако, что мнение эксперта для изображений из 28 класса базы Flavia не совпало ни с решением, данным скелетным методом, ни с решением, полученным полным перебором (рис. 7). Но форма листьев данного класса является довольно специфической, и ее нельзя назвать зеркально симметричной в обычном понимании, что, по-видимому, и объясняет столь неоднозначный результат при определении оси симметрии.



**Рис. 7. Пример изображения, для которого оси симметрии, полученные скелетным методом (красная) и полным перебором (зеленая пунктирная линия), существенно отличаются от экспертной оси симметрии (синяя пунктирная линия)**

В сравнении с результатами, полученными ранее при поиске эталонной оси симметрии, удалось добиться существенного ускорения процедуры. В [11] было заявлено о среднем времени вычисления 300...500 с. Предложенный метод позволяет снизить время обработки до 3...6 с. Дальнейшие усилия будут направлены на изучение возможности ускорить процедуру до десятков миллисекунд, что позволит использовать её в реальном времени.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 14-07-00527, 16-57-52042.

### **Список литературы**

1. An efficiently computable metric for comparing polygonal shapes. / E.M. Arkin [et al.] // CORNELL UNIV ITHACA NY DEPT OF COMPUTER SCIENCE. 1989. №. CU-CSD-TR-89-1007.
2. Blum H. A transformation for extracting new descriptors of shape // Models for the perception of speech and visual form 19.5. 1967. P. 362 – 380.
3. Kushnir O., Seredin O. Parametric Description of Skeleton Radial Function by Legendre Polynomials for Binary Images Comparison // International Conference on Image and Signal Processing. Springer International Publishing. 2014. P. 520 – 530.
4. Kushnir O., Seredin O. Shape Matching Based on Skeletonization and Alignment of Primitive Chains // International Conference on Analysis of Images, Social Networks and Texts. – Springer International Publishing. 2015. P. 123 – 136.
5. Latecki L.J., Lakämper R. Convexity rule for shape decomposition based on discrete contour evolution // Computer Vision and Image Understanding, 1999. T. 73. №. 3. P. 441 – 454.
6. Ling H., Jacobs D.W. Shape classification using the inner-distance // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. 2007. T. 29. № 2. P. 286-299.
7. Van Otterloo P.J. A contour-oriented approach to digital shape analysis. Technische Universiteit Delft, 1988.
8. Sheynin S., Tuzikov A., Volgin D. Computation of symmetry measures for polygonal shapes // International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns. Springer Berlin Heidelberg. 1999. P. 183 – 190.
9. Symmetry of shapes via self-similarity / X. Yang [et al.] // International Symposium on Visual Computing. Springer Berlin Heidelberg. 2008. P. 561 – 570.
10. A leaf recognition algorithm for plant classification using probabilistic neural network / S.G. Wu [et al.] // 2007 IEEE international symposium on signal processing and information technology. IEEE. 2007. P. 11 – 16.
11. Reflection Symmetry of Shapes Based on Skeleton Primitive Chains / O. Kushnir [et al.] // International Conference on Image and Signal Processing. Springer International Publishing. 2016 (in press).
12. Кушнир О.А. Параметрическое описание радиальной функции скелета бинарного изображения для задачи сравнения форм // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2016. № 2. P. 3 – 12.

*Федотова Софья Антоновна, студент, [fedotova.sonya@gmail.com](mailto:fedotova.sonya@gmail.com), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

Середин Олег Сергеевич, канд. физ.-мат. наук, доц., [oseredin@yandex.ru](mailto:oseredin@yandex.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Кушнир Олеся Александровна, ассист., [kushnir-olesya@rambler.ru](mailto:kushnir-olesya@rambler.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет

**THE ALGORITHMS OF ADJUSTMENT OF REFLECTION SYMMETRY AXIS  
FOUND BY THE SKELETON PRIMITIVE SUB-CHAINS COMPARISON METHOD**

*S.A. Fedotova, O.S. Seredin, O.A. Kushnir*

*The method of identifying a reflection symmetry axis of binary images based on comparison of skeleton primitive sub-chains is improved. It allows computing the absolute or approximate symmetry axis almost in real time. For evaluation of reflection symmetry measure of a shape regarding to some axis the set-theoretic expression of Jaccard similarity is utilized. It is applied to the subsets of pixels of the shape which are split by the axis. Often an axis found by the sub-skeletons comparison method diverges more or less of the ground-truth axis found by the brute-force algorithm. Thus the algorithms of adjustment of reflection symmetry axis found by the skeleton primitive sub-chains comparison method are proposed. They are based on idea of searching the axis which is located near the seed skeleton axis and has greater Jaccard similarity measure. The experimental study on the Flavia Dataset shows that proposed algorithms allow to find the ground-truth axis (or the axis which has a little bit less Jaccard similarity measure than the ground-truth axis) almost in real time. It is considerably faster than any of the optimized brute-force methods.*

*Key words: reflection symmetry, binary image, skeleton primitive chain.*

*Fedotova Sof'ja Antonovna, student, [fedotova.sonya@gmail.com](mailto:fedotova.sonya@gmail.com), Russia, Tula, Tula State University,*

*Seredin Oleg Sergeevich, candidate of mathematical sciences, docent, [oseredin@yandex.ru](mailto:oseredin@yandex.ru), Russia, Tula, Tula State University,*

*Kushnir Olesja Aleksandrovna, assistant, [kushnir-olesya@rambler.ru](mailto:kushnir-olesya@rambler.ru), Russia, Tula, Tula State University*

## ***ВОПРОСЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ***

УДК 004.023

### **РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИИ**

Е.А. Арефьева, М.А. Сафронова, А.В. Никитина

*Рассмотрен подход к построению системы оценивания информационной безопасности предприятия на основе метода анализа иерархии.*

*Ключевые слова: информационная безопасность, оценка рисков, метод анализа иерархии.*

В современных условиях исследование и оценка риска информационной безопасности имеют большое значение в деятельности любой фирмы, предприятия, банка и иных учреждений. Вследствие неправильной и/или неадекватной оценки риска, связанного с возникновением и осуществлением угроз информационной безопасности, организации и их руководители несут существенный ущерб. В связи с этим возникает вопрос, как правильно оценить степень риска и соответственно выбрать адекватный вариант защиты. Как показывает практика, преградами на пути принятия мер по обеспечению информационной безопасности являются ограниченность бюджета и сложность для ИТ-менеджера обоснования необходимости вложения средств в повышение уровня защищённости информационной безопасности.

Существуют различные методики и программные комплексы анализа и контроля риска, основанные на качественном (например, ГРИФ компания Digital Security – Россия), количественном (например, RiskWatch компания RiskWatch – Америка) и качественно-количественном (например, CRAMM компания Insight Consulting – Великобритания, Microsoft и др.) методах. Во всех методиках можно выделить свои преимущества и недостатки. В настоящее время универсальной, единой и приемлемой для всех организаций методики оценки и анализа рисков информационной

безопасности не существует. Однако выявление возможных угроз и обеспечение информационной безопасности являются одной из важнейших задач в обеспечении эффективной деятельности фирмы, организации, предприятия. Наибольший интерес с точки зрения управления рисками вызывает методика CRAMM, так как она сочетает в себе качественные и количественные методы, позволяет идентифицировать различные риски, осуществляется на основе экспертного анализа, а в результате оценки риска она не только даёт оценку угроз, но и генерирует различные варианты контрмер. Однако в каждой организации есть своя специфика управления информационными ресурсами, и, как следствие, это накладывает отпечаток на оценку рисков информационной безопасности и разработку плана осуществляемых мероприятий. Решение этой проблемы возможно путем совместного применения методики CRAMM с методами экспертного опроса с целью лучшей ее адаптации к потребностям конкретного предприятия.

Разрабатываемая информационная системы исследования информационной безопасности (ИСИИБ) предназначена для автоматизации процесса исследования информационной безопасности в организации.

Целью создания информационной системы является повышение эффективности работы ИТ-менеджеров службы информационной безопасности за счёт повышения качества принимаемых управленческих решений на основе методологии экспертного анализа.

Объект автоматизации – исследование информационной безопасности в коммерческом банке путём проведения экспертного опроса на основе метода анализа иерархий (МАИ).

Для создания функциональной модели, отражающей структуру и функции системы, а также потоки информации и материальных объектов, преобразуемые этими функциями, используется методология IDEF0. Разработанная модель IDEF0 со всеми уровнями структурной декомпозиции может быть представлена на единственной диаграмме в виде дерева узлов, дополняющего перечень узлов (рис. 1).

Основными задачами ИС ИСИИБ являются:

- формирование и ведение базы пользователей-экспертов;
- проведение и статистический анализ индивидуального экспертного опроса на предмет оценки приоритетов необходимых мероприятий для повышения уровня информационной безопасности;
- статистический анализ группового экспертного опроса с целью ранжирования рекомендованных мероприятий.

В ИСИИБ должны быть автоматизированы следующие функции:

- формирование и регистрация группы экспертов. Данная функция предназначена для авторизации пользователя, предоставления ему логина и пароля;

- оценка значимости критериев, угроз, мероприятий по обеспечению информационной безопасности (ИБ). Данная функция необходима для определения приоритетности одного элемента системы над другим;
- формулирование рекомендации. Данная функция позволяет руководителю принять наиболее рациональное решение для обеспечения ИБ;
- оценка веса каждого элемента системы. Данная функция предназначена для оценивания и ранжирования каждого элемента системы;
- определение согласованности экспертов. Данная функция служит для определения коэффициента конкордации, т.е. насколько эксперты схожи во мнении;
- формирование сводных данных. Данная функция даёт представление о групповых экспертных оценках;
- определение значимости критериев. Данная функция позволяет определить веса критериев, на основании которых будет происходить ранжирование угроз;
- определение значимости угроз. Данная функция позволяет определить веса угроз, на основании которых будет происходить ранжирование мероприятий по обеспечению ИБ;
- определение значимости мероприятий. Данная функция позволяет определить веса мероприятий, что даст представление о том, какие из них способны обеспечить наиболее полную и правильную защиты ИБ с учётом приоритетов имеющихся угроз.

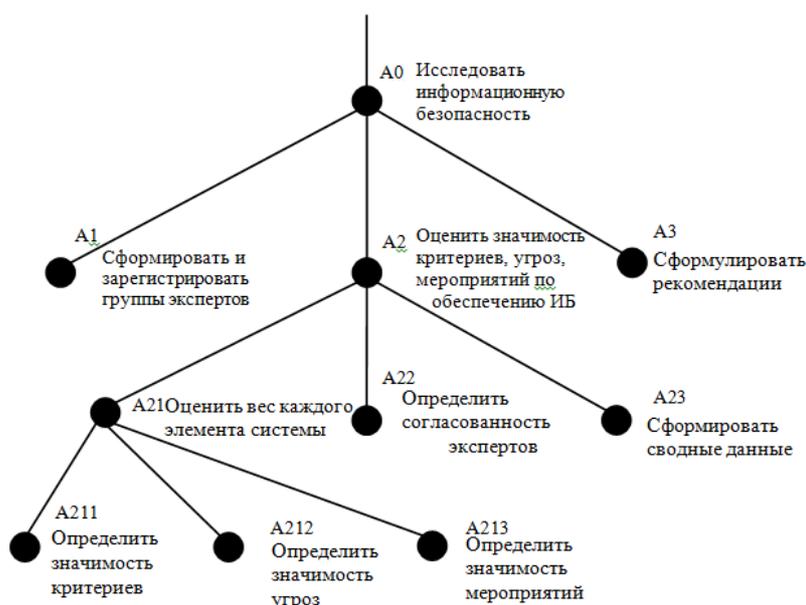


Рис. 1. Дерево узлов ИСИИБ

Основой системы является методика CRAMM, предоставляющая комплексный подход к оценке рисков. Использование данной методики предполагает разделение всей процедуры на 4 этапа.

Исследование информационной безопасности проводится в несколько этапов.

1. Формализованное описание границ информационной системы, её основных функций, пользователей и персонала.

2. Оценивание критериев оценки ценности ресурсов, которые представляют собой множество критериев  $K=\{K_k\}$  ( $k = \overline{1,4}$ ). Множество критериев  $K=\{K_k\}$  включает:

$K_1$  – невозможность нормальной работы организации;

$K_2$  – падение конкурентоспособности;

$K_3$  – ущерб для репутации;

$K_4$  – финансовые потери.

3. Оценивание угроз и уязвимостей, которое происходит путём оценки угроз на основе сделанных оценок критериев. Угрозы заданы множеством  $Y=\{Y_y\}$  ( $y = \overline{1,4}$ ), включающим:

$Y_1$  – угрозы конфиденциальности данных и программ;

$Y_2$  – угрозы целостности данных, программ, аппаратуры;

$Y_3$  – угрозы доступности данных;

$Y_4$  – угрозы отказа от выполнения транзакций.

4. Определение адекватных контрмер, которые заданы множеством мероприятий  $M=\{M_m\}$  ( $m = \overline{1,6}$ ). Множество мероприятий  $M=\{M_m\}$  включает:

$M_1$  – препятствие;

$M_2$  – управление доступом;

$M_3$  – маскировка;

$M_4$  – регламентация;

$M_5$  – принуждение;

$M_6$  – побуждение.

В результате исследования информационной безопасности выделяются критерии, угрозы безопасности и мероприятия по их предотвращению. Для определения значимости элементов системы в конкретной организации с целью определения их приоритетности необходимо использование метода анализа иерархий (МАИ).

Итак, для оценки веса каждого элемента системы при исследовании информационной безопасности с учётом мнения одного или нескольких экспертов целесообразно использовать МАИ, целью которого является вычисление количественной характеристики влияния элементов уровня критериев и уровня угроз по отношению к элементам уровня мероприятия, т.е. установление приоритетов.

Эксперты имеют достаточно точное представление о проблеме для определения в любой паре элементов  $(Y_i, Y_j)$ ,  $i \neq j$  степени значимости одного элемента над другим по отношению к любому из критериев множест-

ва  $K$ . Далее аналогичные действия проводятся для каждой пары  $(M_i, M_j)$ ,  $i \neq j$  при определении степени значимости одного элемента над другим по отношению к любой из угроз множества  $Y$ .

Иерархическое представление проблемы с использованием МАИ приведено на рис. 2.

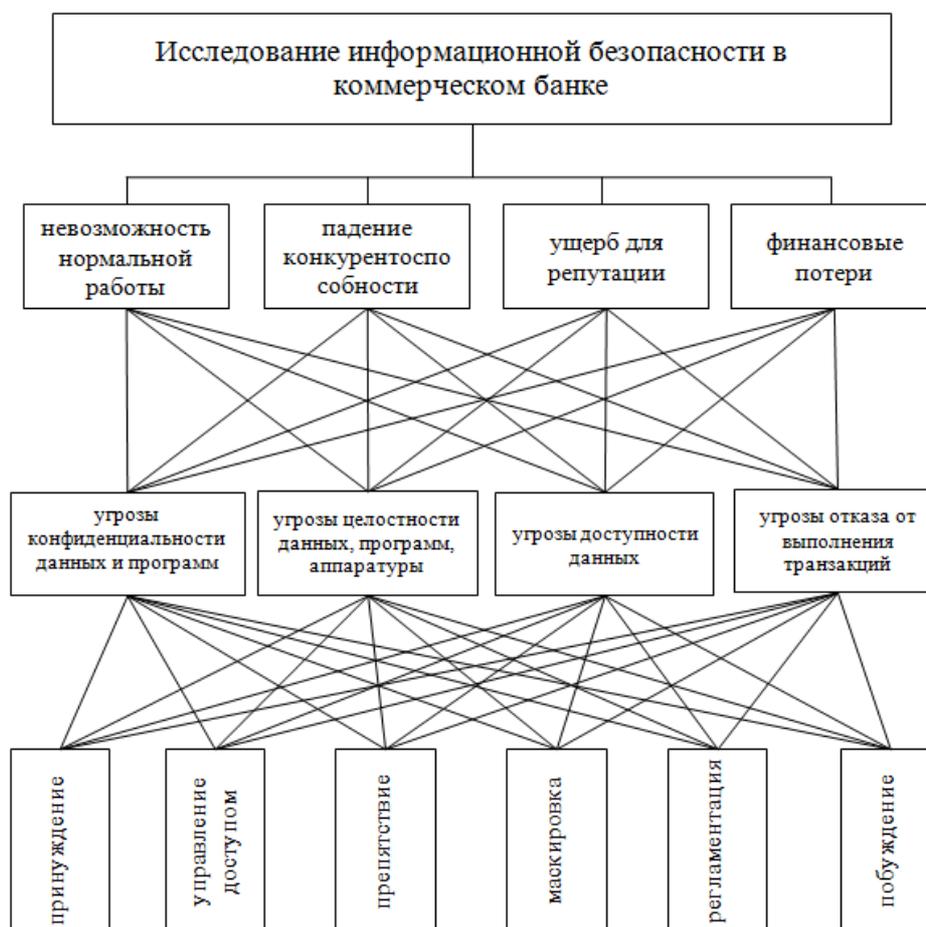


Рис. 2. Иерархическое представление проблемы

Для каждого уровня иерархии необходимо сравнить приоритеты элементов по отношению к элементам верхнего уровня иерархии.

Вначале необходимо определить приоритеты критериев, ответив на вопрос «В какой степени  $K_i$  более важен при достижении цели, чем  $K_j$ ». Оценивание происходит по шкале Саати от 1 до 9.

Если при сравнении  $K_i$  с  $K_j$  получено  $a_{ji} = 1/b$ , то при обратном сравнении будет получено  $a_{ij} = 1/b$ . В результате получается матрица попарных сравнений  $A=(a_{ij})$ :

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix}.$$

Далее необходимо определить индекс согласованности (ИС), который даёт представление о степени нарушения согласованности мнений эксперта.

Индекс согласованности рассчитывается по формуле

$$ИС = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1},$$

где  $\lambda_{\max}$  – максимальное собственное значение матрицы;  $n$  – число объектов.

Для получения собственного вектора, соответствующего максимальному собственному значению матрицы  $A$ , необходимо выполнить следующие действия.

1. Для каждой строки матрицы  $A$  надо вычислить среднее геометрическое её членов по формуле, получая при этом числа  $a_1, a_2, a_3, a_4$  и вектор  $a = (a_1, a_2, a_3, a_4)$

$$a_i = \sqrt[n]{a_{i1} * a_{i2} * a_{i3} * a_{i4}},$$

где  $n$  – число объектов,  $n=4$ ;  $i$  – номер строки,  $i = \overline{1,4}$ .

2. Элементы вектора  $a$  необходимо нормировать таким образом, чтобы их сумма была равна 1, то есть надо сформировать нормированный вектор  $s = (s_1, s_2, s_3, s_4)$ . Элементы нормированного вектора являются соответствующими приоритетами критериев и вычисляются по формуле

$$s_i = \frac{a_i}{\sum_i a_i} = \frac{\sqrt[n]{\prod_j a_{ij}}}{\sum_i a_i},$$

где  $n$  – число объектов,  $n=4$ ;  $i$  – номер строки,  $i = \overline{1,4}$ .

3. Для каждого столбца  $j$  матрицы  $A$  необходимо составить сумму его элементов  $b_j$  по формуле

$$b_j = a_{1j} + \dots + a_{nj} = \sum_{i=1}^n a_{ij},$$

где  $n$  – число объектов,  $n=4$ ;  $i$  – номер строки,  $i = \overline{1,4}$ ;  $j$  – номер столбца,  $j = \overline{1,4}$ .

4. Максимальное собственное значение матрица вычисляется по формуле

$$b_1 * s_1 + \dots + b_n * s_n = \lambda_{\max}.$$

Далее необходимо рассчитать отношение согласованности по формуле

$$ОС = \frac{ИС}{СИ},$$

где ИС – индекс согласованности; СИ – случайный индекс.

Отношение согласованности должно быть не больше 10 %, в противном случае матрица попарных сравнений считается несогласованной.

Далее необходимо выполнить сравнительный анализ предпочтительности элементов третьего уровня иерархии (угрозы) в соответствии с элементами второго уровня (критерии). Алгоритм действий аналогичен сравнительному анализу предпочтительности элементов второго уровня иерархии (критерии) по отношению к степени влияния на первый уровень. То есть необходимо найти вектор приоритетов множества угроз  $Y = \{Y_i\}$  по каждому из критериев  $K_j \in K$  ( $j = \overline{1,4}$ ). Вектор приоритетов множества угроз для критерия  $j$  можно представить в виде  $S(K_j) = \{S_i(K_j)\}, i = \overline{1,4}$ .

Итоговые веса  $w_i$  для элемента  $Y_i$  множества  $Y$  необходимо вычислить по формуле

$$w_i = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n s_j * S_i(K_j).$$

Наконец необходимо выполнить сравнительный анализ предпочтительности элементов четвертого уровня иерархии (мероприятия) в соответствии с элементами третьего уровня (угрозы). Алгоритм действий аналогичен сравнительному анализу предпочтительности элементов третьего уровня иерархии (угрозы) по отношению к степени влияния на второй уровень (критерии).

Итоговые веса  $z_i$  вычисляются с учётом приоритетов угроз, влияющих на выбор мероприятий.

Информацию, полученную от экспертов, необходимо проверить на согласованность. Оценить её можно с помощью коэффициента конкордации  $W$ , т.е. общего коэффициента ранговой корреляции для группы, состоящей из  $m$  экспертов. Коэффициент конкордации рассчитывается по формуле

$$W = \frac{12 * S}{m^2(n^3 - n)},$$

где  $S$  – сумма квадратов отклонений суммы рангов по  $n$  факторов от их средней геометрической;  $m$  – количество экспертов,  $m=4$ ;  $n$  – количество факторов.

Сумма квадратов отклонений суммы рангов по  $n$  факторов от их средней геометрической вычисляется по формуле

$$S = \sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^m R_{ij} - \overline{\sum R} \right)^2 = \sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^m R_{ij} \right)^2 - \frac{\left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m R_{ij} \right)^2}{n},$$

где  $R_{ij}$  – ранг  $i$ -го фактора у  $j$ -й единицы:  $\overline{\sum R} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m R_{ij}}{n}$ .

Групповая экспертная оценка рассчитывается как среднее арифметическое индивидуальных экспертных оценок по каждому элементу всех экспертов.

На основе изложенного подхода разработан программный модуль на базе СУБД MS Access с использованием SQL, языка макросов и Visual Basic; и апробирован на примере коммерческого банка. Демонстрация работы системы представлена на рис. 3 – 8.

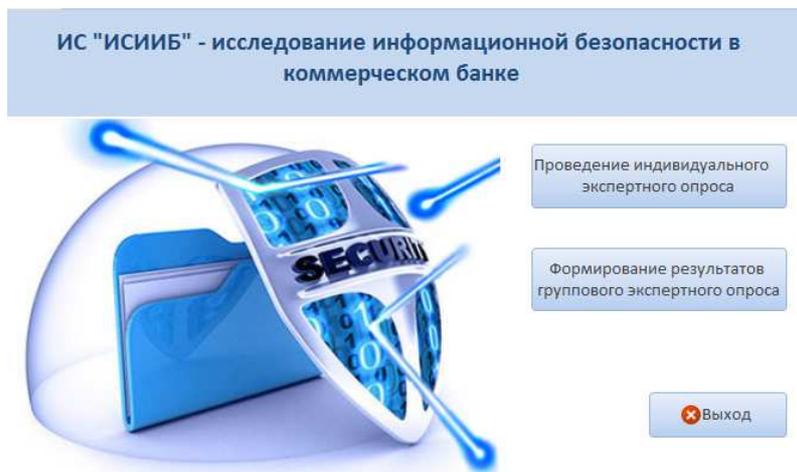


Рис. 3. Главное меню ИСИИБ

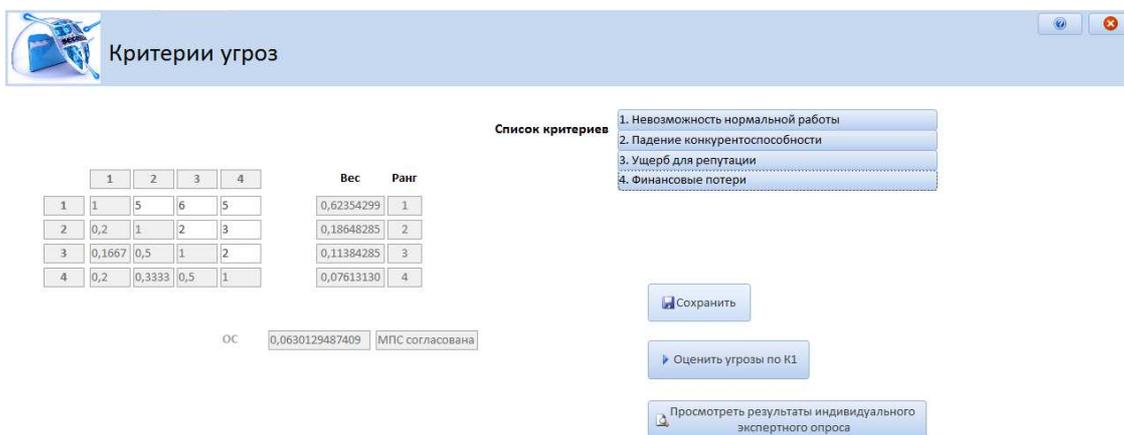


Рис. 4. Определение весов критериев

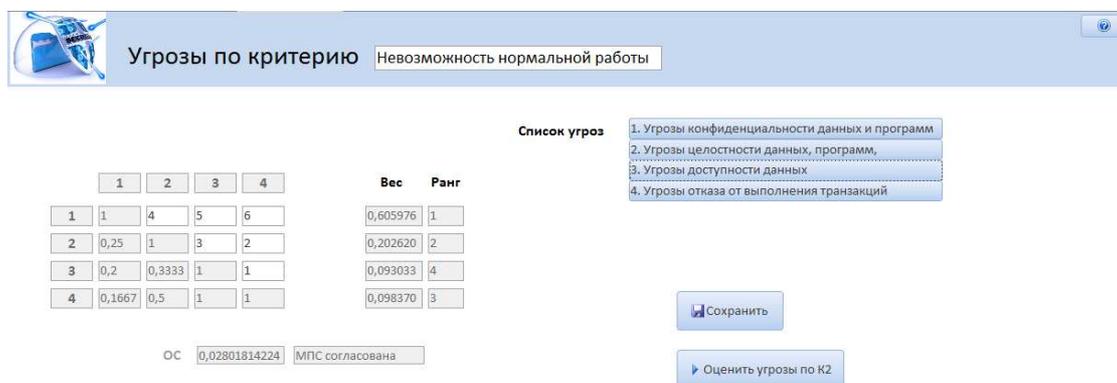


Рис. 5. Определение весов угроз по каждому критерию

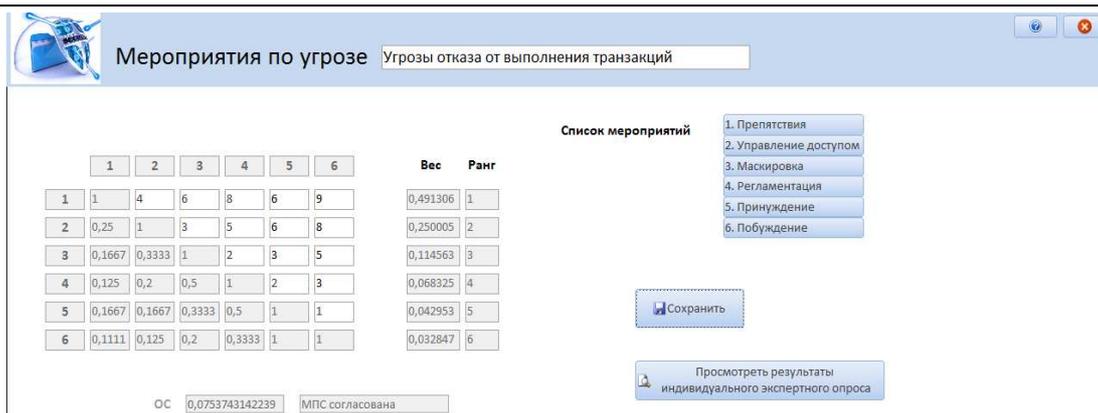


Рис. 6. Определение значимости мероприятий по каждой угрозе

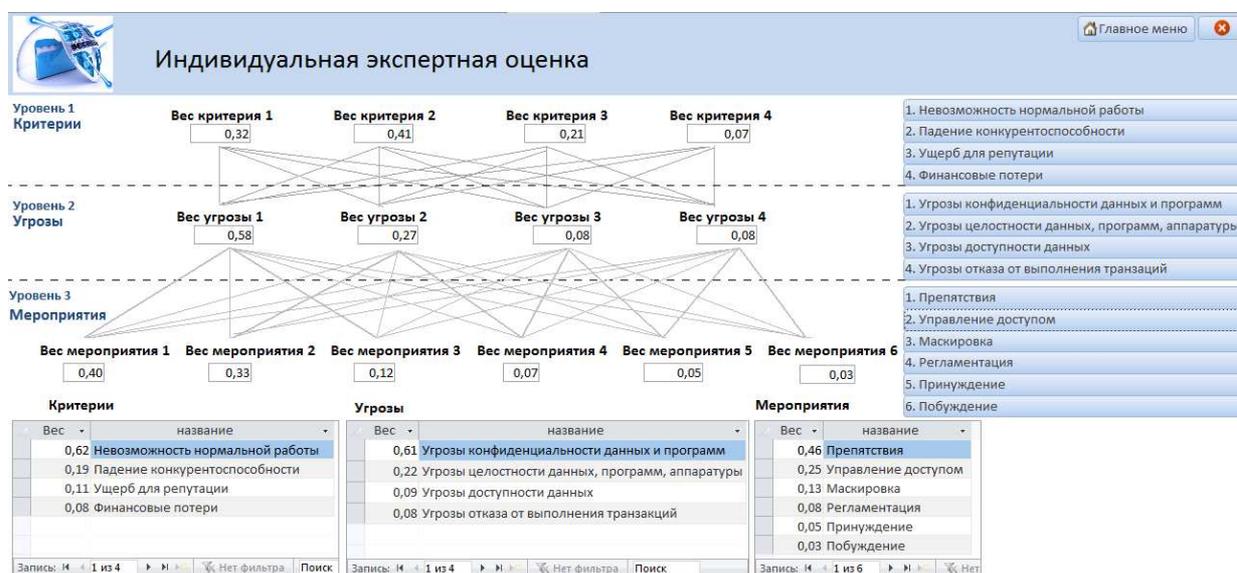


Рис. 7. Итоговая индивидуальная оценка значимости

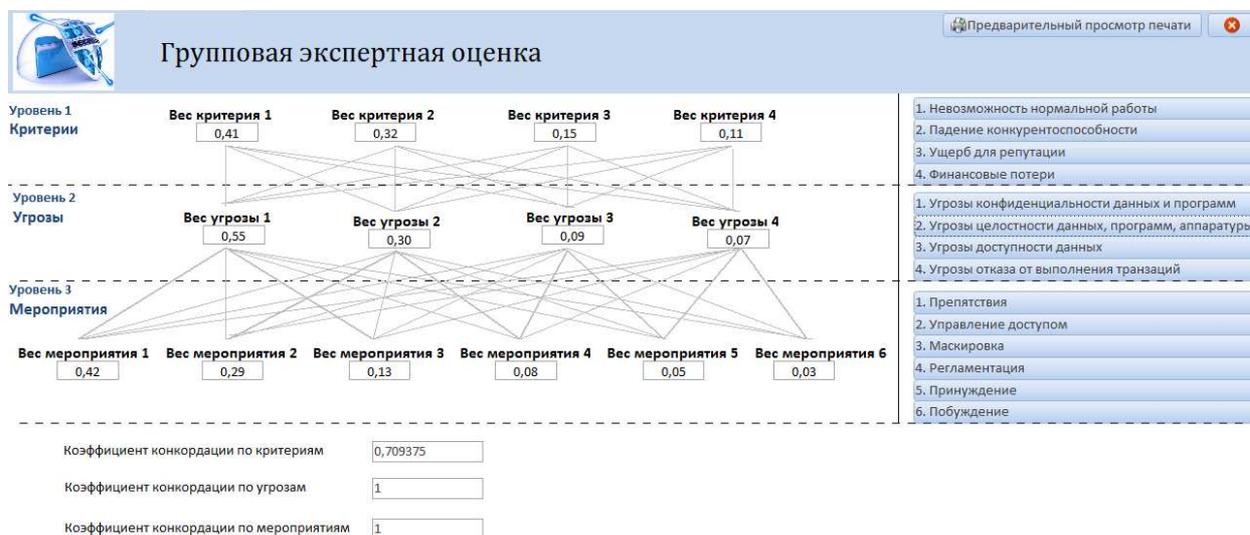


Рис. 8. Итоговая групповая оценка значимости

Таким образом, на выходе имеется перечень мероприятий с оценкой их значимости, определенной экспертно специалистами организации, что позволяет принимать управленческие решения по снижению рисков информационной безопасности с учетом состояния дел и специфики исследуемой организации.

### Список литературы

1. Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1989. 316 с.
2. Саати Т.Л. Об измерении неосвязаемого. Подход к относительным измерениям на основе главного собственного вектора матрицы парных сравнений // Журнал "Cloud Of Science". 2015. Т. 2. № 1 [Электронный ресурс]. URL: [http://cloudofscience.ru/sites/default/files/pdf/CoS\\_2\\_5.pdf](http://cloudofscience.ru/sites/default/files/pdf/CoS_2_5.pdf) (дата обращения 01.11.2016).
3. Милославская Н.Г. Проверка и оценка деятельности по управлению информационной безопасностью: учеб. пособие для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2012. 166 с.
4. IT Expert Управление рисками. Метод CRAMM [Электронный ресурс] / IT Expert. М., 2002-2016. URL: <http://www.itexpert.ru/rus/ITEMS/77-33> (дата обращения 01.11.2016).

*Арефьева Елена Анатольевна, канд. техн. наук, доц., [ar\\_el\\_an@mail.ru](mailto:ar_el_an@mail.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

*Сафронова Марина Алексеевна, канд. техн. наук, доц., [safronovama@rambler.ru](mailto:safronovama@rambler.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

*Никитина Алена Валерьевна, студент, [ar\\_el\\_an@mail.ru](mailto:ar_el_an@mail.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет*

#### *DEVELOPMENT OF INFORMATION SECURITY RESEARCH ORGANIZATION ON THE BASIS OF THE METHOD OF ANALYSIS HIERARCHY*

*E.A. Arefeva, M.A. Safronova, A.V. Nikitina*

*An approach to the construction of a system of evaluation of information security of the enterprise based on method of analysis hierarchy is considered.*

*Key words: information security, risk assessment, method of hierarchy analysis.*

*Arefeva Elena Anatol'evna, candidate of mathematical sciences, docent, [ar\\_el\\_an@mail.ru](mailto:ar_el_an@mail.ru), Russia, Tula, Tula State University,*

*Safronova Marina Alekseevna, candidate of mathematical sciences, docent, [safronovama@rambler.ru](mailto:safronovama@rambler.ru), Russia, Tula, Tula State University,*

*Nikitina Alena Valer'evna, student, [ar\\_el\\_an@mail.ru](mailto:ar_el_an@mail.ru), Russia, Tula, Tula State University*

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ТЕОРИИ ИГР ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ВЫБОРА СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

Г.В. Басалова, А.А. Сычугов

*Анализируется возможность применения методов теории игр для оптимизации выбора средств защиты информации. Предлагаемый подход позволит эффективнее расходовать ресурсы системы и выбирать наиболее подходящие (эффективные) средства защиты в каждый промежуток времени.*

*Ключевые слова: информационная безопасность, сетевые атаки, средства обнаружения вторжений, теория игр, антагонистическая игра.*

В настоящее время большое внимание уделяется вопросам защиты информации. Телекоммуникационные системы, активно развивающиеся в последнее время, являются артериями современных глобальных информационных систем. Информация, циркулирующая в таких системах, представляет существенную ценность и поэтому является уязвимой к различного рода нарушениям и злоупотреблениям. Развитие сетевых технологий сопровождается повышением требований к информационной безопасности.

Несмотря на значительные успехи в сфере информационной безопасности, до сих пор существуют трудности предотвращения удаленных атак. Анализ сетевых атак показывает, что действия по защите чаще всего принимаются после того, как уже имеется снижение производительности сервиса. Происходит это вследствие сложности оценивания будущего масштаба атаки и использования соответствующей меры защиты. Некоторые воздействия (например, DoS-атаки) отличает спонтанный характер, то есть они могут начинаться и заканчиваться в случайные моменты времени, что в свою очередь также добавляет сложности выработки своевременной реакции на атаку.

Для выявления фактов неавторизованного доступа в систему, а также для других типов вредоносной активности, которые могут нарушить безопасность информационной системы, используются системы обнаружения вторжений. Система обнаружения вторжений обычно включает:

- сенсорную систему, предназначенную для сбора событий, связанных с безопасностью защищаемой системы;
- подсистему анализа, предназначенную для выявления подозрительных действий и атак на основе данных сенсоров;
- хранилище данных, необходимое для накопления первичных событий и результатов анализа;
- подсистему управления и представления результатов анализа, позволяющую конфигурировать систему обнаружения вторжений и наблюдать за состоянием защищаемой системы.

Наиболее сложной и «математизированной» частью системы обнаружения вторжений является блок анализа. Входными данными для блока анализа является информация, полученная от сенсоров. В большинстве современных систем такого рода для анализа применяется комбинация нескольких математических методов.

Для повышения точности предсказания и обнаружения атак система обнаружения вторжений должна собирать разнородную информацию о работе защищаемой системы, а также хранить и обрабатывать большой объем данных. Использование системы фильтрации в отсутствие атаки влечет за собой снижение производительности сервера и возможное ложное срабатывание фильтра. Достаточно часто создание эффективной системы защиты сталкивается с нехваткой вычислительной мощности. Таким образом, возникает задача оптимизации ресурсов, затрачиваемых на поддержание работоспособности системы защиты от сетевых атак на высоком уровне.

Одним из вариантов решения указанной проблемы является минимизация ресурсов, затрачиваемых на поддержание информационной безопасности в те моменты времени, когда активность атакующей стороны незначительна. С этой целью система обнаружения вторжений должна использовать динамические методы, позволяющие оперативно обнаруживать и предотвращать нарушения безопасности. То есть в системе защиты информации должна быть использована математическая модель, позволяющая в каждый момент времени выбрать необходимый набор средств защиты, обеспечивающий надежную защиту и при этом требующий минимального количества ресурсов.

В отечественных и зарубежных работах последних лет наблюдается тенденция расширения имеющихся математических подходов к выбору параметров системы защиты информации. Так, например, различные авторы предлагают следующие математические методы для анализа и оптимизации системы защиты информации [1 – 6]:

- методы математической статистики;
- методы, основанные на использовании сетей Петри;
- математический аппарат теории случайных процессов;
- методы, основанные на использовании теории автоматов;
- методы на основе теории нечетких множеств;
- методы, основанные на использовании нейронных сетей;
- методы экспертных систем;
- математический аппарат теории игр.

Статистические методы обнаружения вторжений используют хорошо зарекомендовавший себя аппарат математической статистики к поведению субъектов анализируемой системы. Вначале для всех субъектов формируются статистические профили. Составными элементами такого профиля могут быть различные параметры, например, общий трафик в

единицу времени, количество отказов в обслуживании, отношение входящего трафика к исходящему, количество уникальных запросов к системе и др. Любое отклонение используемого профиля от эталонного считается нарушением безопасности. Основными недостатками данного подхода являются следующие моменты. Во-первых, системы обнаружения вторжений на основе статистических методов не чувствительны к порядку следования событий в защищаемой системе: в некоторых ситуациях одни и те же события в зависимости от порядка их следования могут быть характерны для аномальной или нормальной деятельности. Во-вторых, в некоторых случаях бывает трудно задать пороговые значения отслеживаемых характеристик для идентификации аномальной деятельности. Занижение порога приводит к ложному срабатыванию, а завышение – к пропуску вторжений. Кроме того, часто атакующая сторона использует индивидуальные подходы для каждой системы защиты, что делает использование статистических методов менее эффективными [1, 5].

Любую систему обработки информации, состоящую из различных аппаратных и программных средств, можно рассматривать как уникальный комплекс со своими особенностями. Именно это является объяснением возможности пропуска специфичных для защищаемой системы вторжений теми системами обнаружения вторжений, которые используют один и тот же набор параметров оценки. Следовательно, более предпочтительным решением будет определение необходимых параметров мониторинга в процессе работы системы. Трудность эффективного динамического формирования параметров наблюдения состоит в том, что размер области поиска экспоненциально зависит от мощности начального множества наблюдаемых параметров. Для формирования множества наблюдаемых параметров в системах обнаружения вторжений могут использоваться различные интеллектуальные методы.

Многие исследователи предлагают использовать в качестве математической основы при построении и анализе систем защиты информации аппарат теории игр. Теория игр является формальным подходом, предназначенным для анализа взаимодействий между несколькими участниками процесса, имеющими разные интересы и принимающими решения. В любой системе защиты информации предполагаются две стороны: сторона нападения и сторона защиты (система защиты информации), имеющие противоположные интересы. В работе [6] предлагается использовать математический аппарат теории игр для решения задачи выбора средств защиты от несанкционированного доступа к информации в автоматизированной системе. Там же выполнена математическая постановка задачи в виде задачи линейного программирования с булевыми переменными. В математической постановке введен показатель стоимости средств защиты. Ограничения задачи учитывают требования классов защищенности от несанкционированного доступа в автоматизированных системах.

В [7] проводится обзор теоретико-игровых методов, используемых при решении задач информационной безопасности. В работе рассматривается подход к проектированию систем обнаружения вторжений с использованием математического аппарата матричных игр для двух игроков. В предлагаемой модели учитывается стоимость системных ресурсов для организации защиты.

В работе [8] рассматриваются возможности использования многошаговых игр с неполной информацией при построении систем защиты от DoS атак. Предлагается представить задачу в виде игры двух сторон: обороняющейся ( $A$ ) и атакующей ( $B$ ). Задачей обороняющейся стороны является минимизация собственных потерь вследствие действий атакующей стороны. Задача стороны  $B$  – получение максимальной прибыли. В статье указывается, что главной особенностью такой игры является то, что в качестве стратегий используются функции, описывающие поведение сторон в краткосрочной перспективе (под краткосрочной перспективой понимается такой промежуток времени, в котором поведение участников игры можно представить детерминировано). Множество функций предлагается подбирать для каждой задачи индивидуально, исходя из статистических данных, внешних ограничений и здравого смысла.

При анализе вопросов защиты от различных угроз безопасности целесообразно рассматривать действия двух сторон: стороны защиты (информационной системы) и стороны нарушителя. В качестве нарушителя можно рассматривать всю совокупность угроз безопасности: действия отдельных лиц, преследующих различные цели, крупномасштабные спланированные атаки, а также случайные воздействия на систему. Подобные модели, когда существуют две или более противоборствующие стороны типичны для теории игр. Если известны варианты действий (стратегии) каждой из сторон, а также выигрыш (или проигрыш) от каждого из вариантов действий, то имеется возможность сформулировать математическую модель ситуации в виде модели бескоалиционной антагонистической игры (например, матричной). На основе сформулированной задачи можно получить оптимальные стратегии стороны нападения и стороны защиты, требующие минимума ресурсов.

Рассмотрим взаимодействие системы обнаружения вторжений и атакующего как бескоалиционную конечную игру. Пусть сторона защиты  $A$  и нарушитель  $B$  имеют конечное число стратегий  $n_A$  и  $n_B$ , что соответствует реальности, так как сторона защиты всегда имеет ограничение по числу возможных вариантов реагирования, а сторона нападения по числу вариантов организации атаки. Например, в работе [7] для стороны защиты предлагается использовать стратегии {«игнорировать подозрительную активность», «усилить мониторинг»}, а для стороны нападения можно рассматривать множество стратегий {«завершить атаку», «продолжить без

паузы», «сделать паузу в атаке»}. Набор стратегий игроков  $s = (s_A, s_B)$ ,  $s_A \in S_A$ ,  $s_B \in S_B$ , называется ситуацией. Функции  $w_A$  и  $w_B$  выигрышей игроков определены на множестве ситуаций  $S = S_A \times S_B$ .

Решением бескоалиционной игры являются ситуации равновесия, но не обязательно в чистых стратегиях. Как известно, каждая конечная антагонистическая игра имеет хотя бы одну ситуацию равновесия в смешанных стратегиях. Смешанные стратегии при анализе систем защиты информации имеет смысл рассматривать при допущении, что работа системы продолжается значительное время, то есть итерации атаки и защиты повторяются многократно. При этом стратегии используются сторонами с некоторой недетерминированной закономерностью и затраты/доходы накапливаются с течением времени. Смешанной стратегией игроков  $A$  и  $B$  будем называть полный набор вероятностей применения их чистых стратегий:

$$P_A = \{p_{A1}, p_{A2}, \dots, p_{An_A}\}, P_B = \{p_{B1}, p_{B2}, \dots, p_{Bn_B}\}.$$

В бескоалиционной игре каждый игрок использует свои чистые стратегии независимо от другого участника процесса, поэтому в смешанной ситуации  $p = \{P_A, P_B\}$  вероятность  $p(s)$  появления ситуации  $s = (s_A, s_B)$  равна произведению вероятностей использования обоими игроками своих чистых стратегий, то есть

$$p(s) = p(s_A, s_B) = P_{A, s_A} \cdot P_{B, s_B}.$$

Найдем средний выигрыш (проигрыш) игроков. В общем случае математическое ожидание выигрыша игрока  $A$  в смешанной ситуации  $p = \{P_A, P_B\}$  определяется следующим образом:

$$\overline{W}_A(p) = \overline{w}_A(P_A, P_B) = \sum_{s \in S} w_A(s) p(s) = \sum_{s_1 \in S_A} \sum_{s_2 \in S_B} w_A(s_1, s_2) \cdot P_{A, s_A} \cdot P_{B, s_B},$$

где  $S_A, S_B$  – множества возможных ситуаций игроков  $A$  и  $B$  соответственно;  $w_A$  – функция выигрыша (а на самом деле – проигрыша или расходов) системы защиты информации, если система защиты информации выбрала стратегию  $s_1$ , а нарушитель – стратегию  $s_2$ .

Выигрыш игрока  $B$  (нарушителя системы защиты информации) в общем случае определяется аналогично.

Каким образом можно определить выигрыши игроков в данном случае? Система обнаружения вторжений  $S$  в каждый момент времени наблюдает множество параметров  $M_S$  с помощью сенсоров. Каждую атаку можно представить в виде последовательности итераций. После каждого шага система обнаружения вторжений пытается «предсказать» следующие шаги нарушителя. Каждый шаг нарушителя порождает некоторый вид активности, который обнаруживается датчиками системы. Если блок анализа распознает активность как подозрительную, множество базовых наблюдаемых параметров  $M_S$  должно быть расширено. Пусть множество допол-

нительных параметров наблюдения будет  $M_{S \text{ доп}} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , а стоимость дополнительных ресурсов, затрачиваемых на их наблюдение в течение времени  $t$  –  $C_A(t)$ . Предположим, затраты на наблюдение прямо пропорциональны времени наблюдения. Если мониторинг расширенного множества параметров проводится в течение времени  $t_m$ , то стоимость дополнительных затрат на наблюдение будет

$$C_A(t) = \sum_{i=1}^n c_i t_m,$$

где  $n$  – количество дополнительных параметров наблюдения,  $c_i$  – затраты на мониторинг  $i$ -го параметра. При принятии решения игнорировать возможную атаку система защиты информации не несет затрат на дополнительный мониторинг.

Оценим затраты нарушителя системы защиты информации. В случае принятия решения о прекращении атаки нарушитель не несет дополнительных затрат, а в случае принятия решения о продолжении атаки затраты атакующей стороны зависят от количества  $k$  генерируемых запросов к защищаемой системе:  $C_B = gk$ , где  $g$  – стоимость генерации одного запроса.

В случае успешной атаки система защиты информации несет убытки  $c_A^*$ , а нарушитель получает выигрыш  $c_B^*$ .

Затраты системы защиты информации при реализации каждой из возможных стратегий складываются из затрат на организацию защиты  $C_A(t)$  и убытков от возможных нарушений безопасности  $c_A^*$ . Аналогично выигрыш нарушителя складывается из выигрыша от нарушения работы системы защиты информации  $c_B^*$  и из затрат на проведение атак  $C_B$ .

Для рассматриваемой системы обнаружения вторжений предполагается, что с увеличением дополнительных параметров наблюдения возрастает вероятность верного определения атаки. Однако определение точной зависимости успешного обнаружения атаки от количества и набора параметров мониторинга, а также от времени наблюдения требует экспериментального исследования для каждого типа систем защиты информации.

Как уже отмечалось, каждая конечная бескоалиционная игра имеет хотя бы одну ситуацию равновесия в смешанных стратегиях. Ситуацию равновесия можно найти стандартными методами теории игр, описанными, например в [9].

Хотелось бы отметить некоторые особенности использования данной методики применительно к системам защиты информации.

Прежде всего, выигрыши игроков в смешанной ситуации были определены равными математическим ожиданиям их выигрышей. Это предполагает, что игроки являются нейтральными к риску при многократном

повторении игровой ситуации. Однако в случае рассмотрения систем защиты информации это не совсем оправдано. Если нарушителя можно считать нейтральным к риску участником игры, то сторону защиты – скорее всего, нет. Даже однократное нарушение безопасности защищаемой системы может быть критичным для нее, выводя из работоспособного состояния на длительное время.

Во-вторых, модель может использовать те или иные данные в качестве входных параметров. При этом возможности получения различных данных могут быть задачами разной степени сложности. Так, например, если модель использует в качестве входных параметров характеристики угроз, средств защиты, уязвимостей, барьеров и т.д., то оценить все указанные характеристики и определить взаимосвязи между ними достаточно сложно, что осложнит практическое применение модели в системе обнаружения вторжений.

Далее, известно, что в обнаружении сетевых вторжений очень значительную роль играет множество параметров оценки. Поэтому в обнаружении аномалий одной из главных задач является выбор оптимального множества параметров оценки, что невозможно выполнить методами теории игр. Поэтому целесообразно применять различные математические методы при построении систем защиты информации, в частности, систем обнаружения вторжений.

В целом, математический аппарат теории игр позволяет проводить анализ задач с повторяющейся антагонистической природой, что является типичным для задач защиты информации. Предлагаемые методы дают возможность выбрать на начальном этапе стратегии действий в процессе работы системы обнаружения вторжений и снизить вычислительные затраты на обработку данных в системе защиты информации.

Данная работа поддержана грантом РФФИ №16-07-01008 (Ц2115.1 ГРФ).

### **Список литературы**

1. Корниенко А.А., Слюсаренко И.М. Системы и методы обнаружения вторжений: современное состояние и направления совершенствования [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: [http://citforum.ru/security/internet/ids\\_overview](http://citforum.ru/security/internet/ids_overview) (дата обращения 2.10.2016).

2. Новый подход к защите информации – системы обнаружения компьютерных угроз [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://www.jetinfo.ru/article/ib/novyj-podkhod-k-zaschite-informatsii-sistemy-obnaruzheniya-kompyuternykh> (дата обращения 1.10.2016).

3. Технологи обнаружения атак [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://ypn.ru/448/intrusion-detection-technologies> (дата обращения 1.10.2016).

4. Чибиров М.О.. Об одной проблеме, возникающей при использовании теории игр в области защиты информации. М.: Проблемы информационной безопасности в системе высшей школы, 2013.

5. Никишин М.С., Середин О.С., Сычугов А.А. Идентификация потенциально опасных клиентских запросов на основе многоклассового распознавания образов // Интеллектуализация обработки информации: 10-я Международная конференция: тезисы докладов. Греция, о. Крит, 4 – 11 октября 2014 г. М.: Торус Пресс, 2014. С. 232

6. Быков А.Ю., Панфилов Ф.А., Шмырев Д.В. Задача выбора средств защиты в автоматизированных системах с учетом классов защищенности от несанкционированного доступа к информации // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Приборостроение”. 2012. С. 193 – 199.

7. Лаврентьев А.В., Зязин В.П. О применении методов теории игр для решения задач компьютерной безопасности // Безопасность информационных технологий. 2013. № 3. С. 19 – 24.

8. Руднев Д.О., Сычугов А.А. Задача автоматической генерации сигнатур для систем противодействия вторжениям в распределенных информационных системах // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. Вып. 7. С. 174 – 181.

9. Писарук Н.Н. Введение в теорию игр. Минск: БГУ, 2015.

*Басалова Галина Валерьевна, канд. техн. наук, доц., [galina\\_basalova@mail.ru](mailto:galina_basalova@mail.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

*Сычугов Алексей Алексеевич, канд. техн. наук, доц., [xru2003@list.ru](mailto:xru2003@list.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет*

*APPLICATION OF METHODS OF GAME THEORY FOR THE CHOICE OPTIMIZATION OF MEANS OF INFORMATION PROTECTION*

*G.V. Basalova, A.A. Sychugov*

*The article analyzes the possibility of applying the methods of game theory to optimize the choice of means of information protection. The proposed approach will effectively spend resources of the system and choose the most suitable (effective) means of protection in each time interval.*

*Key words: information security, network attacks, intrusion detection tools, game theory, antagonistic game.*

*Basalova Galina Valerievna, candidate of technical sciences, docent, [galina\\_basalova@mail.ru](mailto:galina_basalova@mail.ru), Russia, Tula, Tula State University,*

*Sychugov Alexey Alexeevich, candidate of technical sciences, docent, [xru2003@list.ru](mailto:xru2003@list.ru), Russia, Tula, Tula State University*

## **ТРЕБОВАНИЯ К ОБОРУДОВАНИЮ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ НОСИТЕЛЕЙ В СИСТЕМЕ СТРАХОВОГО ФОНДА ДОКУМЕНТАЦИИ**

Е.Е. Евсеев, П.Е. Завалишин, С.Ю. Борзенкова, Б.С. Яковлев

*Приводятся оценки возможности использования электронных носителей для системы ЕР СФД. Рассматривается возможность разработки и внедрения комплекса оборудования для долговременного хранения электронных носителей. Выдвигаются требования к элементам данного комплекса. Описывается опытный образец коробки для проведения дальнейших экспериментальных исследований и испытаний*

*Ключевые слова: страховой фонд документации, оборудование для хранения электронных носителей, состав оборудования для хранения, требования к элементам комплекса оборудования для хранения.*

При создании системы Единого российского страхового фонда документации (далее – ЕР СФД) в соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 26.12.1995 г. №1253-68 основным носителем для хранения страховых копий технической и иной документации является микрографический носитель (микрофильм) [1]. Данный вид информационного носителя на сегодняшний день является наиболее рациональным для организации долговременного сохранения особой государственной информации, так как он при соблюдении температурно-влажностных условий хранения и применении специализированных систем защиты практически не подвержен воздействию различных поражающих факторов.

В настоящее время с каждым годом неуклонно увеличивается доля документов, выполненных в электронном виде. Этому способствуют все более возрастающие возможности информационных технологий в жизни общества и государства. Для современного этапа развития нашей страны характерны стремительное и активное развитие систем электронного документооборота, постоянно нарастающий объем электронных документов в деятельности органов государственной власти, архивов, библиотек и промышленных предприятий, рост числа технических документов, выполненных с использованием программных продуктов и средств автоматизированного проектирования. В соответствии с Федеральным законом № 63-ФЗ от 06.04.2011 г. все более широкое распространение получает механизм электронной подписи. В России утверждены и действуют различные законодательные акты, концепции, программы и другие государственные документы, нацеленные на увеличение электронного документооборота в различных сферах деятельности. Практически во всех федеральных орга-

нах исполнительной власти и органах исполнительной власти субъектов Российской Федерации завершён переход на использование в своей работе электронных документов.

Положение о ЕР СФД, утвержденное постановлением Правительства Российской Федерации от 26.12.1995 г. №1253-68, допускает запись страховых массивов конструкторской, технологической, проектной, нормативной, научной, историко-культурной и другой документации не только на микрофильм, но и на другие компактные носители информации, в том числе и на электронные. Более того, существуют такие виды и типы документации, подлежащей закладке в ЕР СФД, долгосрочное хранение которых возможно только в электронном виде и только с применением для этих целей электронного носителя. К такой документации относятся программная документация, трехмерные геометрические модели узлов, трехмерные сборки изделий и т.д.

На протяжении нескольких лет на различных дискуссионных площадках затрагивалась тема обеспечения долговременного хранения электронной информации. В основном предлагались два метода хранения: 1) хранение документов с использованием «облачных» технологий и 2) стационарное хранение на специальном электронном носителе, прошедшем необходимые испытания и доказавшим по всем проверенным техническим данным возможность долгосрочного сохранения записанной на него информации [2].

По итогам сравнительного изучения этих двух методов можно сделать вывод, что для хранения особо важных государственных документов наиболее приемлемым является второй вариант, так как при этом обеспечивается отсутствие прямого доступа к документам, а применение специальных сигнальных устройств практически исключает любой несанкционированный доступ [3]. Однако при этом необходимо определиться, какой носитель подойдет для этих целей и какие системы хранения нужно будет разрабатывать и внедрять для обеспечения его долговременного хранения.

Основные результаты исследований специалистов ФГУП «НИИР» в области возможного применения электронного носителя для целей ЕР СФД докладывались на таких крупных научных мероприятиях, как VII Международная научно-практическая конференция «Обеспечение сохранности библиотечных фондов: научные, экономические и практические аспекты» (г. Санкт-Петербург, 2013г.), Двадцатая Международная конференция библиотечного сообщества «Крым-2013», II Всероссийская научно-практическая конференция под эгидой ЮНЕСКО «Сохранение электронной информации в России» и др.

Проведенные исследования позволили выдвинуть ряд общих требований, которым должен отвечать подобный электронный носитель. К их числу можно отнести следующие.

1. Записанная на электронный носитель информация должна храниться в сугубо вещественном виде. Хранение информации в виде каких-либо изменений электрического и (или) магнитного полей на электронном носителе не допускается.

2. Совместимость электронного носителя и устройств чтения записанной информации с распространенными, действующими и перспективными российскими и международными стандартами.

3. Минимальная восприимчивость электронного носителя к неблагоприятным факторам окружающей среды.

4. Невозможность намеренного изменения или подмены записанной на электронный носитель информации.

5. Низкая совокупная стоимость владения электронным носителем с записанной на него информацией.

По результатам анализа свойств и характеристик существующих в настоящее время электронных носителей, предварительно было установлено, что в наибольшей мере приведенным требованиям отвечают оптические диски, в которых записывающий слой выполнен из неорганических материалов. Было отмечено, что в дальнейшем потребуются организация дополнительных экспериментальных исследований и проведение натуральных испытаний носителей в реальных условиях системы ЕР СФД. При этом для долговременного хранения таких электронных носителей в страховом фонде необходимо разработать и внедрить новый комплекс технических средств, отличающийся от используемого в настоящее время по габаритным размерам, принципам размещения единиц хранения и наличию возможности роботизации их закладки и изъятия из фонда [4].

Существующий комплекс средств для хранения микрофильмов включает в себя специальные шкафы (рис. 1) и коробки (рис. 2), конструкция которых регламентируется требованиями действующих нормативных документов ЕР СФД. Шкафы предназначены для размещения в них коробок с микрофильмами и представляют собой прямоугольный металлический корпус, выполненный из стали с дверцей и тремя выдвижными полками, на которых фиксируются коробки. Конструкцией шкафов предусмотрена защита от сотрясений и ударных нагрузок, защита от несанкционированного доступа достигается с помощью опломбирования, есть возможность переноса шкафа за транспортировочные ручки.

Конструкция коробок имеет цилиндрическую форму, состоящую из двух частей, изготовленных из алюминия со специальным покрытием, предотвращающим окисление металла и исключаящим влияние на микрофильм негативных факторов внешней среды.

Материалы, используемые при изготовлении шкафов и коробок, а также покрытия, являются химически нейтральными по отношению к храняемым в них микрофильмам с записанной на них информацией.



***Рис. 1. Шкаф для хранения и транспортировки коробок с микрофильмами***



***Рис. 2. Коробка для хранения микрофильма***

Данное оборудование для хранения микрофильмов, применяемое в СССР, а затем и в России более чем 50 лет, хорошо зарекомендовало себя при использовании в сфере ЕР СФД. Достоинствами этого оборудования являются высокая надежность, защищенность и большой срок эксплуатации. Действующий комплекс средств хранения обеспечивает защиту микрофильма от вредных факторов окружающей среды при поддержании заданных условий в помещении, обладает модульным конструктивом, хорошей транспортабельностью, характеризуется низкими затратами на содержание и возможностью многократного использования.

Однако указанное выше оборудование для хранения микрофильмов, составляющее в настоящее время основу хранения в ЕР СФД, по своим конструктивным и технологическим параметрам не может обеспечить хранение электронных носителей, так как изначально проектировалось для работы с микрофильмами.

Поэтому в современных условиях для обеспечения хранения записанных электронных носителей следует применить существующий принцип хранения микрофильмов, для чего необходимо разработать подобный

комплекс оборудования (шкаф и коробку) (рис. 3), удовлетворяющий габаритам электронного носителя и имеющий дополнительные возможности для автоматизации и роботизации поиска, закладки и изъятия единиц хранения из фонда.

Для проведения этапа проектирования были сформулированы основные технические требования для шкафа.

1. Материал шкафа должен быть несгораемым, не подверженным коррозии, светонепроницаемым, химически нейтральным по отношению к находящимся в нем коробкам с записанными электронными носителями.

2. Конструктивная совместимость с коробками для записанных электронных носителей и их надежная фиксация.

3. Модульность конструкции.

4. Компактность изделия.

5. Обеспечение вертикального размещения с фиксацией шкафов между собой.

6. Наличие транспортировочных ручек.

7. Возможность нанесения идентификационной и маркировочной информации и опломбирования сигнальными устройствами.

8. Конструктивные возможности для роботизации.

Также сформулируем основные требования для проектирования коробки по хранению записанных электронных носителей.

1. Материал коробки должен быть несгораемым, не подверженным окислению, светонепроницаемым, химически нейтральным по отношению к электронному носителю.

2. Обеспечение фиксации электронного носителя, исключение его перемещения внутри коробки.

3. Компактность и простота конструкции.

4. Возможность нанесения идентификационной информации и применение сигнальных устройств.

5. Защита от проникновения влаги, пыли, светового излучения и т.д.

После выдвигания указанных требований специалистами ФГУП «НИИР» были произведены работы по проектированию конструкции коробки, так как именно от нее в дальнейшем будут зависеть параметры шкафа для хранения электронных носителей. После разработки конструкторской документации были изготовлены экспериментальные образцы для дальнейшей оценки их пригодности для хранения записанных электронных носителей в условиях системы ЕР СФД.

Разработанный образец коробки показывает, что применение проверенных технологий в системе ЕР СФД возможно, а их использование будет гарантировать долговременное, надежное и безопасное хранение записанных электронных носителей.



**Рис. 3. Коробка для хранения электронного носителя**

Предлагаемый комплекс оборудования для хранения записанных страховых электронных носителей и выдвинутые требования к его составным частям после проведения соответствующих научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по изготовлению опытных образцов шкафов с элементами для роботизации процесса закладки и изъятия из фонда позволят организовать на объектах ЕР СФД долговременное и надежное хранение записанных электронных носителей. Применение такого оборудования в системе ЕР СФД даст возможность значительно снизить воздействие различных неблагоприятных внешних факторов на сами электронные носители и обеспечит защиту от несанкционированного доступа к записанной на них информации.

Дальнейшее оснащение комплекса современными средствами штрих-кодовой маркировки и сигнальными устройствами поможет вывести работу системы ЕР СФД на принципиально новый уровень, эффективно сочетая надежность и безопасность хранения информации с быстротой ее поиска и оперативностью обеспечения пользователей страховыми копиями документов.

### Список литературы

1. Постановление Правительства Российской Федерации от 26.12.1995 г. №1253-68 «Об обеспечении создания единого российского страхового фонда документации».
2. Современные подходы к созданию страховых фондов документации на электронных носителях / Е.Е. Евсеев, А.К. Талалаев, Н.Е. Проскуряков, П.Е. Завалишин, А.И. Ануфриева // СФД (Страховой фонд документации): науч.-производ. журн. 2014. № 1(16). С. 3 – 11.
3. Обеспечение безопасности цепей поставок / Е.Е. Евсеев, П.Е. Завалишин, Е.В. Меланич, С.А. Серодеденко // Защита объектов хранения в системе единого российского страхового фонда документации с применением сигнальных устройств. М.: Логистика, 2014. № 6. С. 54 – 57.

4. Евсеев Е.Е., Завалишин П.Е., Чечуга О.В. К вопросу о возможности использования автоматизированных и роботизированных технологий в едином российском страховом фонде документации // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. Вып. 12. Ч. 2. С. 412-420.

*Евсеев Евгений Евгеньевич, канд. техн. наук, директор по развитию, [tula3e@yandex.ru](mailto:tula3e@yandex.ru), Россия, Тула, ГК «Аурика»,*

*Завалишин Павел Евгеньевич, канд. филос. наук, нач. отдела, [zavalishin-p1975@yandex.ru](mailto:zavalishin-p1975@yandex.ru), Россия, Тула, Тульский филиал «НИИР» Федерального государственного унитарного предприятия «Научно-исследовательский институт стандартизации и унификации»,*

*Борзенкова Светлана Юрьевна, канд. техн. наук, доц., [tehnol@rambler.ru](mailto:tehnol@rambler.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

*Яковлев Борис Сергеевич, канд. техн. наук, доц., [bor\\_yak@mail.ru](mailto:bor_yak@mail.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет*

#### **GENERAL REQUIREMENTS FOR EQUIPMENT FOR STORAGE OF ELECTRONIC MEDIA IN THE SYSTEM OF INSURANCE FUND DOCUMENTATION**

*E.E. Evseev, P.E. Zavalishin, S.Y. Borzenkova, B.S. Yakovlev*

*The possibility of using electronic media for documentation insurance system, the possibility of development and introduction of complex equipment for long-term storage of electronic media are provided. The requirements to elements of the complex are given. The prototype box for carrying out further experimental research and testing are described.*

*Key words: insurance fund of the documentation, equipment for storage of electronic media, the hardware storage requirements for items of complex equipment for storage.*

*Evseev Evgeniy Evgenievich, candidate of technical sciences, director of development, [tula3e@yandex.ru](mailto:tula3e@yandex.ru), Russia, Tula, "Aurica" Ltd,*

*Zavalishin Pavel Evgenievich, candidate of philosophical sciences, head of department, [zavalishin@reprograf.ru](mailto:zavalishin@reprograf.ru), Russia, Tula, Tula branch «NIIR» of Federal State Unitary Enterprise Scientific Research Institute of Standardization and Unification,*

*Borzenkova Svetlana Yurievna, candidate of technical sciences, docent, [tppzi@tsu.tula.ru](mailto:tppzi@tsu.tula.ru), Russia, Tula, Tula State University,*

*Yakovlev Boris Sergeevich, candidate of technical sciences, docent, [bor\\_yak@mail.ru](mailto:bor_yak@mail.ru), Russia, Tula, Tula State University*

## **ОЦЕНКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТРУДА ПРИ МИКРОФИЛЬМИРОВАНИИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ СТРАХОВОГО ФОНДА ДОКУМЕНТАЦИИ**

Е.Е. Евсеев, П.Е. Завалишин, С.Ю. Борзенкова, Б.С. Яковлев

*Приводится оценка производительности труда при выполнении операций съемки технической документации на бумажном носителе на микрофильм и записи цифровой информации на микрофильм при создании страхового фонда документации. Производится анализ технологических переходов и предлагается новый подход по увеличению производительности.*

*Ключевые слова: страховой фонд технической документации, технологические переходы, производительность труда, микрографические технологии*

При создании системы Единого российского страхового фонда документации (далее – ЕР СФД) в соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 26.12.1995 г. №1253-68, кроме разработки нормативно-правовой базы, одним из главных приоритетов стало развитие производственного направления. При этом решались вопросы отработки и внедрения технологии микрофильмирования технической документации, создания и обеспечения условий хранения микрофильмов, получения репрографическими методами полноформатных страховых копий, контроля состояния микрофильмов и т.д. От качественного выполнения всех технологических операций и переходов зависело время их выполнения, а следовательно, и достижение установленных плановых показателей.

На протяжении всего времени работы системы ЕР СФД многие технологические переходы подвергались совершенствованию. Вносились необходимые изменения, дорабатывались уже действующие технологические процессы, которые определяли количественно-временные затраты на выполнение конкретных операционных циклов и внедрялись новые технологические процессы, связанные в том числе с развитием цифровых технологий.

Следует отметить, что как исторически, так и в настоящее время одной из важнейших технологических операций является процесс перевода технической документации на микрофильм. Данный процесс также называют микрофильмированием. На сегодняшний момент существуют две основные технологии микрофильмирования:

1) оптическое микрофильмирование документации, выполненной на бумажном носителе (так называемое «классическое» микрофильмирование);

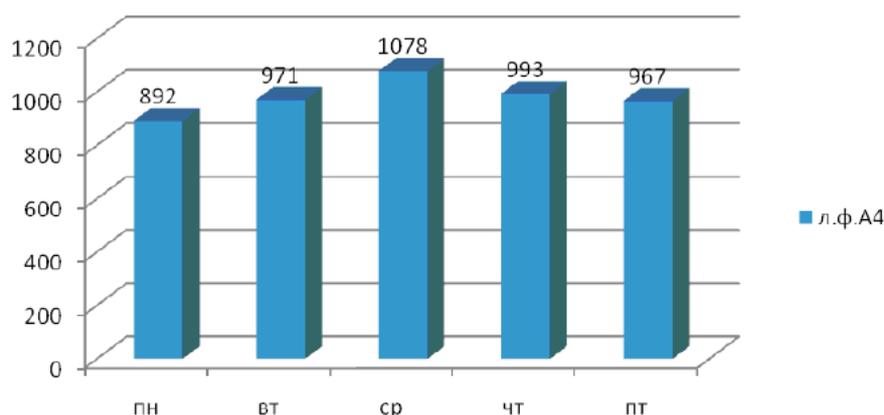
2) микрофильмирование документации, выполненной в электронном виде (электронно-цифровое или компьютерное микрофильмирование).

Первая технология получила свое развитие в 60-х годах XX века. В то время микрофильму не было альтернативы и он являлся единственным носителем, который мог гарантировать срок хранения информации более 75 лет. Так как микрофильм с содержащейся на нем информацией при правильном хранении не подвержен таким внешним воздействиям, как электрические и магнитные поля, он был выбран в качестве основного носителя для создания ЕР СФД.

Для обеспечения микрофильмирования документации, выполненной на бумажном носителе, в России используются зарубежные съемочные камеры, такие как Pentakta A-200, Докуматор ДА-5, Recordak MGG 1, Zeutschel OMNIA OK 300 Zeutschel OMNIA OK 400/401 и т.д. Сам процесс классического микрофильмирования можно условно разделить на следующие операции:

- получение оператором документации на микрофильмирование.
- подготовка и настройка оборудования.
- зарядка микрофильма в тракт оборудования.
- проведение работ по переносу информации на микрофильм.
- разрядка оборудования.
- передача микрофильма на химико-фотографическую обработку.

Исходя из практики выполнения работ и статистических данных, в полный 8-часовой рабочий день на одной камере может быть отснято порядка 1000 листов документов, приведенных к формату А4 (рис. 1).



**Рис. 1. Объем обрабатываемой на одной камере документации при классическом микрофильмировании за 8-часовой рабочий день**

Что касается второй технологии, то она появилась относительно недавно и ее особенностью является возможность переноса любой электронно-цифровой информации на микрофильм. Если в классическом процессе микрофильмирования производится экспонирование (съемка) бумажного оригинала, то в случае электронно-цифрового или компьютерного микрофильмирования вместо бумажного оригинала используется его

электронный образ. Этот процесс основан на переносе электронного изображения на микрофильм различными способами. Оборудование, которое позволяет записывать электронные образы документов на микрофильм получило название «СОМ-системы» (от англ. Computer Output Microfilm) [1].

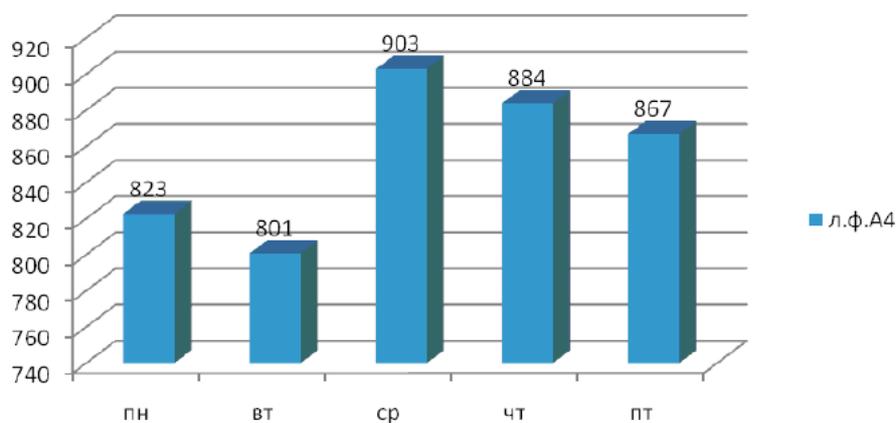
СОМ-системы можно подразделить на три класса: нанесение изображения на микропленку с помощью лазера; проецирование изображения с помощью матрицы; съемка изображения с проекции в полный ее размер.

Наиболее широко распространенными в мире стали такие модели СОМ-систем, как Microbox Polysom, SMA-51, Zeutschel OP500, Fuji AR-1000 и т.д. Данное оборудование позволяет микрофильмировать документы, созданные с помощью программных пакетов в электронном виде, включая документы, выполненные с помощью офисных программ, систем САПР, растровой графики и т.д. Необходимо отметить, что СОМ-системы также производятся за рубежом. В России производство такого оборудования отсутствует.

Сам процесс СОМ-микрофильмирования можно условно разделить на следующие основные операции:

- копирование файлов подлежащих микрофильмированию;
- подготовка и настройка оборудования;
- зарядка микрофильма в тракт оборудования;
- проведение работ по записи информации на микрофильм;
- разрядка оборудования;
- передача микрофильма на химико-фотографическую обработку.

Исходя из практики выполнения работ и статистических данных в полный 8 часовой рабочий день приблизительно снимается порядка 800-900 листов документов выполненных в электронном виде, приведенных к формату А4 (рис. 2).



**Рис. 2. Объем обрабатываемой на одной СОМ-системе документации при компьютерном микрофильмировании за 8-часовой рабочий день**

Из приведенного перечня основных операций первой и второй технологии микрофильмирования видно, что они очень похожи. Также обе технологии схожи и при сравнении объемов микрофильмируемой документации за 8-часовой рабочий день (рис. 1, 2). Конечно, приведенные данные на диаграммах носят приблизительный характер, а фактическая производительность будет зависеть от множества факторов, которые необходимо учитывать в каждой ситуации по-разному (например, поступает документ, формат которого больше формата съемочного стола или формат электронного документа требует преобразований в иной формат для СОМ-оборудования). Но принципиальным отличием является то, что каждая из этих технологий в настоящее время реализуются на разных типах аппаратов, представляющих собой две разные линейки оборудования.

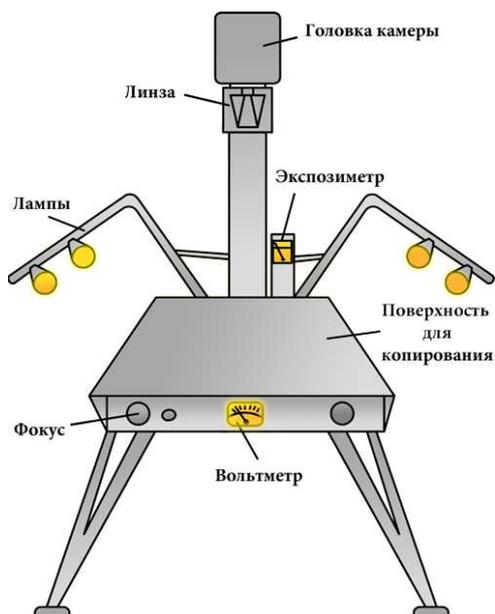
В современных условиях для повышения эффективности работ по созданию ЕР СФД требуется как модернизация парка оборудования для классической съемки, так и широкое внедрение современных СОМ-технологий. Для этого необходимо провести дооснащение объектов СФД соответствующим оборудованием, спланировать и организовать строительно-монтажные работы для его установки и обеспечения условий функционирования, осуществить пуско-наладочные работы, провести обучение сотрудников для обеспечения загруженности оборудования в требуемых режимах и проведения циклов технического обслуживания.

Таким образом, для обеспечения выполнения этих двух технологий микрофильмирования приходится применять две линейки оборудования, что при ведении хозяйственной деятельности объектов СФД приводит к увеличению затрат на его содержание и оплату труда операторов и обслуживающего персонала. Все эти обстоятельства оказывают значительное влияние на себестоимость микрофильмирования 1-го листа, приведенного к формату А4. Кроме того, уникальность и единичность оборудования, как для классического так и для электронно-цифрового микрофильмирования, значительно сказывается на его конечной цене для потребителя, а также на стоимости ремонтных комплектов, ЗИП и запчастей при проведении ремонтных и профилактических работ.

В мировой практике существует подход, когда ввиду уникальности или единичности используемого в производстве оборудования проводят модернизацию действующего оборудования, без приобретения нового. Так, данный подход получил широкое распространение в пищевой промышленности, где дает возможность провести усовершенствование узлов, заменить приводы на более новые энергосберегающие агрегаты, повысить универсальность оборудования, установить новую автоматику и внедрить частичную автоматизацию процессов, требующих ручного труда. Такая модернизация иногда в разы дешевле стоимости нового оборудования. При

этом предприятие получает модифицированное оборудование, имеющее современные системы управления, повышенный уровень производительности, устойчивость и безотказность в работе [2].

С этой точки зрения можно проанализировать и такое оборудование, как съемочная камера для классического микрофильмирования. Типовая съемочная камера состоит из съемочного стола, пульта управления, съемочной головки, системы подачи съемочной головки для съемки на разных кратностях и пр. (рис. 3).



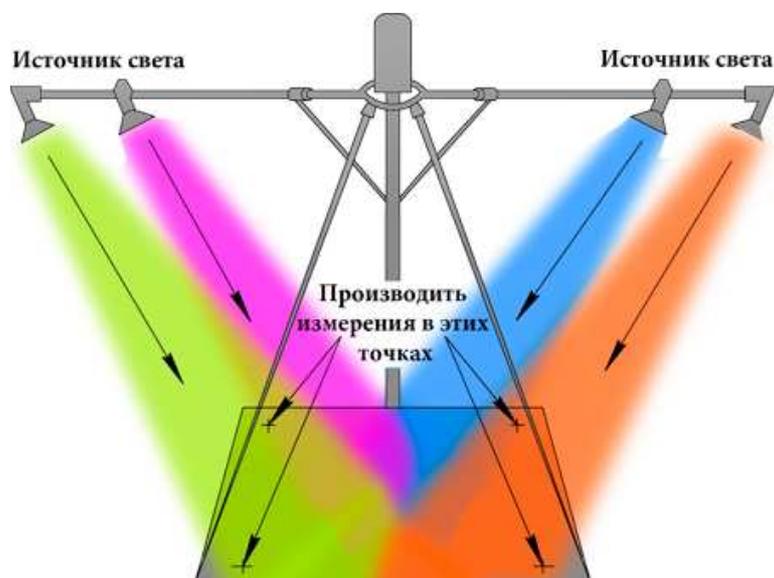
**Рис. 3. Общая схема микрофильмирующей камеры**

Из всех составных частей наибольший интерес для проведения модернизации представляет съемочный стол. Именно на нем производится размещение бумажных оригиналов документации для съемки. Для того, чтобы сделать его универсальным для применения двух описанных выше технологий микрофильмирования, необходимо, чтобы его рабочая поверхность имела встроенный высокоразрешающий экран (монитор) для вывода на него полномасштабных изображений документации в электронном виде (рис. 4).

Это тем более актуально, так как на сегодняшний день технологии изготовления ЖК-панелей до изображения 4К и выше значительно продвинулись и реализуемое оборудование имеет тенденцию к постепенному снижению своей стоимости (рис. 5).

Кроме того, в комплект камеры могут входить несколько подкатных съемочных столов (один – обычный для классического микрофильмирования, другой – с монитором для электронно-цифрового микрофильмирования), что также позволит использовать только один тип оборудования. Данная схема применения различных подкатных съемочных столов была

впервые реализована немецкой фирмой Zeutschel, где для съемочных камер использовались несколько вариантов подкатных столов: с книжными держателями для современных книг, с книжными держателями для старых книг, с флуоресцентной подсветкой стола, со специальной стеклянной пластиной для фиксирования чертежей, газетный стол и т.д. [3].



**Рис. 4. Модернизированная съемочная камера со встроенным в съемочный стол высокоразрешающим экраном (монитором)**



**Рис. 5. Высокоразрешающий ЖК-монитор в горизонтальном положении (функция съемочного стола)**

Внедрение подобной технологии позволит содержать имеющийся парк микрофильмирующих камер с универсальным съемочным столом или двумя подкатными столами, что даст возможность производить работы по двум технологиям микрофильмирования и обеспечивать при необходимости быстрый переход с одной из них на другую с минимальными потерями времени. При этом производительность работ по технологии СОМ-микрофильмирования должна повыситься не менее чем в 1,5 раза (до 1500 листов, приведенных к формату А4). Это произойдет благодаря примене-

нию ЖК-панелей с сенсорной функцией «большого планшета», что позволит оператору быстро производить «перелистывание» изображений документов на экране.

Технология применения универсального съемочного стола (или двух подкатных съемочных столов) позволит объектам СФД использовать в работе только одну (классическую) линейку оборудования, осуществлять работу в одних и тех же границах производственной площади, привлекать для выполнения работ по микрофильмированию специалистов со средним или средне-техническим образованием, использовать надежные и проверенные временем качественную оптику и протяжные тракты классических съемочных камер.

Помимо вышеуказанных достоинств, совмещение на базе одного устройства функций оптического и электронно-цифрового микрофильмирования несет в себе целый ряд других преимуществ, таких, как:

- более эффективное использование производственных площадей;
- снижение стоимости обслуживания (один тип оборудования вместо нескольких);
- сокращение номенклатуры запчастей;
- унификация и универсальность аппаратуры;
- простота работы на оборудовании;
- быстрота перехода от микрофильмирования бумажных оригиналов к съемке электронных документов;
- повышение производительности при микрофильмировании электронной документации в 1,5 раза.

Конечно, для внедрения в практику данного подхода потребуется проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ с изготовлением образцов универсальных съемочных столов, испытания их в реальных промышленных условиях микрофильмирования документации различного исполнения. Но в итоге это позволит получить отечественную оригинальную технологию, которая может быть востребована при производстве работ в системе ЕР СФД за счет экономии средств государства на приобретение дорогостоящих зарубежных СОМ-систем за валюту и оснащение ими объектов СФД.

Реализация идеи использования универсального съемочного стола для классических микрофильмирующих камер значительно повысит эффективность парка этого оборудования, оптимизирует численность производственного персонала, сократит длительность съемочного цикла и позволит в дальнейшем продолжить внедрять инновационные подходы и на других технологических циклах и переходах при выполнении работ в системе ЕР СФД.

## Список литературы

1. Мировой опыт создания и хранения информационных ресурсов в современных условиях / А.К. Талалаев, Е.Е. Евсеев, П.Е. Завалишин, Н.Е. Проскуряков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. Вып. 3. С. 408-421.

2. Модернизация производственных линий [Электронный ресурс]. URL: <http://bassonprocess.com/modernizaciya-proizvodstvennyh-linij/> (дата обращения 22.09.2016).

3. Интеллектуальная микрофильмирующая система для широкого круга задач [Электронный ресурс]. URL: <http://www.storage-systems.ru/micrography/cameras/zeutschelok400> (дата обращения 22.09.2016).

*Евсеев Евгений Евгеньевич, канд. техн. наук, директор по развитию, [tula3e@yandex.ru](mailto:tula3e@yandex.ru), Россия, Тула, ГК «Аурика»,*

*Завалишин Павел Евгеньевич, канд. филос. наук, нач. отдела, [zavalishin-p1975@yandex.ru](mailto:zavalishin-p1975@yandex.ru), Россия, Тула, Тульский филиал «НИИР» Федерального государственного унитарного предприятия «Научно-исследовательский институт стандартизации и унификации»,*

*Борзенкова Светлана Юрьевна, канд. техн. наук, доц., [tehnol@rambler.ru](mailto:tehnol@rambler.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

*Яковлев Борис Сергеевич, канд. техн. наук, доц., [bor\\_yak@mail.ru](mailto:bor_yak@mail.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет*

### WAYS TO IMPROVE PRODUCTIVITY WHILE MICROFILMING OF TECHNICAL DOCUMENTATION IN INSURANCE FUND OF DOCUMENTATION

*E.E. Evseev, P.E. Zavalishin, S.Y. Borzenkova, B.S. Yakovlev*

*The estimates of labor productivity when performing operations shooting technical documentation on paper, on microfilm, and recording the digital information on the microfilm when creating insurance Fund of documentation are given. The analysis of technological transitions is presented and a new approach to increase performance is proposed.*

*Key words: insurance Fund of the technical documentation, technological transitions, productivity, micrographic technology.*

*Evseev Evgeniy Evgenievich, candidate of technical sciences, director of development, [tula3e@yandex.ru](mailto:tula3e@yandex.ru), Russia, Tula, «Aurica» Ltd,*

*Zavalishin Pavel Evgenievich, candidate of philosophical sciences, head of department, [zavalishin@reprograf.ru](mailto:zavalishin@reprograf.ru), Russia, Tula, Tula branch «NIIR» of Federal State Unitary Enterprise Scientific Research Institute of Standardization and Unification,*

*Borzenkova Svetlana Yurievna, candidate of technical sciences, docent, [tppzi@tsu.tula.ru](mailto:tppzi@tsu.tula.ru), Russia, Tula, Tula State University,*

УДК 004.891

## **АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ БЕСПРИЗНАКОВОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ**

Д.О. Руднев, А.А. Сычугов

*Рассмотрен вопрос безопасности распределённых информационных систем с точки зрения доверия к отдельным элементам системы. Исследован подход, позволяющий оценивать уровень доверия и основанный на методах беспризнакового распознавания образов. Описывается эксперимент, проведенный с целью проверки качества работы описанного подхода.*

*Ключевые слова: распределение информационных системы, доверие, безопасность, беспризнаковое распознавание образов.*

В настоящее время активно развиваются технологии распределённых вычислений. Их популярность обоснована растущим объёмом информации, который необходимо обрабатывать за минимальное время. Помимо производительности распределённые информационные системы (РИС) имеют такие преимущества как отказоустойчивость и масштабируемость. Эти преимущества достигаются за счет разбиения информационной системы на множество независимых элементов, каждый из которых имеет свою программного-аппаратную инфраструктуру и может выполнять определённый набор операций. Такой подход позволяет оптимально распределять вычислительные ресурсы, быстро изменять конфигурацию системы в моменты пиковых нагрузок. С ростом популярности РИС увеличивается объём обрабатываемой информации и, как следствие, становится актуальным решение задачи обеспечения информационной безопасности РИС.

В традиционных информационных системах владелец информации может контролировать средства защиты, так как находится в пределах внешнего периметра защиты. В РИС понятие внешнего периметра защиты размыто, так как каждый элемент распределённых систем имеет собственный периметр защиты. Таким образом, становится невозможным управление и мониторинг средств безопасности со стороны владельца информации. На сегодняшний день актуальна задача разработки методов, позволяющих оценить владельцем информации элемент РИС с точки зрения безопасности и одновременно сохранить конфиденциальность сведений о средствах защиты и состоянии элемента РИС.

В распределённых информационных системах владелец информации может принимать решение только о передаче информации на конкретный узел РИС для вычислений и не может контролировать безопасность информации во время обработки на узле. Таким образом, в данном случае встает вопрос о доверии владельца информации к конкретному узлу РИС. Согласно общему определению, доверие [1] – это субъективная вероятность со стороны  $A$  выполнения действия стороной  $B$ , которое  $A$  не может наблюдать и контролировать, при этом, действия  $B$  повлияют на благосостояние  $A$ , его выгоду. В распределённых информационных системах понятие доверия можно сформулировать как вероятность того, что данные, переданные на узел РИС и результаты вычислений не будут скомпрометированы и искажены, иными словами, за время обработки информации не будут нарушены её конфиденциальность, целостность и доступность.

Модель доверия в РИС можно описать следующим образом. Пусть  $\Omega$  – множество всех узлов РИС:

$$\Omega = \{\Omega_0, \Omega_1, \dots, \Omega_N\},$$

где  $N$  – количество элементов РИС.

Каждый элемент  $\Omega_i$  в момент времени  $t_j \in T$  находится в состоянии  $s_i^j \in S$ , где  $S$  – множество всех возможных состояний элемента РИС, которые определяют величину доверия к данному узлу в текущий момент времени и описываются некоторым набором признаков, обладающих свойством метрики.

Для каждого элемента  $\Omega_i$  величина доверия  $p_i$  в момент времени  $t_j \in T$  определяется множеством состояний системы

$$p_i = P(s_i^0, s_i^1, \dots, s_i^j), \quad (1)$$

где  $p_i$  – значение доверия к элементу РИС на интервале времени  $t = [0 \dots j]$ . Отсюда можно определить вероятность искажения информации при обработке на узле  $\Omega_i$  как  $q_i = 1 - p_i$ .

Можно утверждать, что величина доверия зависит от состояния элемента РИС во время наблюдения. Для анализа состояния элемента РИС, не нарушая при этом конфиденциальность сведений о нем, предлагается анализировать не множество значений признаков, описывающих состояние элемента РИС, а меру его похожести на заранее заданный базис, определяющий состояние элемента с известным значением доверия.

Множество базисных объектов

$$B = \{b_0, b_1, \dots, b_M\},$$

где  $b_i \in S$ ;  $M$  – количество базисных элементов.

Функцию похожести состояний элементов РИС

$$r_{i,j} = \rho(s_i^t, s_j^t),$$

где функция  $\rho$  – функция определения метрик и относительно множества  $S$ .

Тогда состояние элемента  $\Omega_i$  в момент времени  $t$  можно описать следующим вектором:

$$s_i^t = \{\rho(s_i^t, b_0), \rho(s_i^t, b_1), \dots, \rho(s_i^t, b_M)\}. \quad (2)$$

Подставим (2) в (1) и получим

$$p_i = P(s_i^0, s_i^1, \dots, s_i^K).$$

К предлагаемому подходу можно применить математический аппарат, известный в машинном обучении как беспризнаковое распознавание образов [2], при котором вместо линейного векторного пространства признаков объектов рассматриваются отсчеты проекционного пространства, опирающегося на проекционные признаки, роль которых играют похожести на некоторые заранее заданные (пространство образующие или базисные) объекты. Другими словами, при использовании беспризнакового распознавания образов для каждого объекта исходного пространства определяется функция похожести (функция расстояния). Затем вводится множество базисных объектов. Для каждого объекта вычисляются проекционные признаки (вторичные признаки), которые равны мере похожести объекта на базисные. Затем возможно применение известных методов классификации, входными данными для которых являются вторичные признаки исходных объектов.

Переход от непосредственного анализа состояний элементов РИС к анализу метрик похожести решает проблему безопасности периметра РИС. Если состояние элемента РИС можно описать рациональными числами, то, в случае перехвата базисных объектов и метрик похожести, восстановление исходных признаков возможно только при условии, что количество базисных объектов на единицу больше количества признаков. Одним из преимуществ использования данного подхода является то, что использование метрик позволяет описывать состояние элемента РИС объектами произвольной природы, такими как множества или временные ряды. В последнем случае восстановление исходных признаков невозможно.

Одновременно с преимуществами описанного подхода возникает вопрос о выборе функции доверия  $P$ . В основу построения функции доверия предлагается заложить следующие принципы:

- 1) Существует период времени, для которого известны значения доверия;
- 2) Доверие выше к тому элементу, чьи состояния повторяются во времени, чье будущее состояние более предсказуемо.

Для проверки качества предложенного метода был поставлен численный эксперимент со следующей задачей: сохранив конфиденциальность работы узлов системы, выявить атаки, проводимые на эти узлы. Предполагается, что атака на элемент системы изменит его поведение.

Для исходных данных эксперимента были выдвинуты следующие требования:

1) данные должны содержать информацию о работераспределённой информационной системы, то есть о работе конкретных узлов системы и их взаимодействии;

2) Данные должны охватывать временной промежуток в несколько недель. Так как в работе информационных систем наблюдаются недельные периоды, то для обучения алгоритма необходимо несколько примеров каждого из дней недели;

3) данные должны быть размечены. То есть в данных должны присутствовать отметки начала и конца атаки.

Проведя анализ открытых данных, можно обнаружить, что под требования попадает лишь небольшое количество наборов данных [3]. Как правило, такие наборы содержат информацию о работе одного узла, и большинство данных отражают периоды времени меньше недели. Это связано с тем, что до последнего времени в информационной безопасности ставилась задача защиты одной единицы, а системы, анализирующие поведение РИС в целом, имели только теоретический характер.

Для эксперимента были взяты данные о работе компьютерной сети Лос-Аламосской национальной лаборатории 0, которые удовлетворяют предъявляемым требованиям. Данные представляют собой журналы событий, описывающие работу компьютерной сети за 58 дней. Данные представлены в виде 4 типов журналов событий: журнал событий авторизации, журнал событий сетевого взаимодействия, журнал работы DNS сервера и журнал процессов, запущенных на компьютерах. Так же данные содержат журнал активности, так называемой, redteam – условных злоумышленников, совершающих атаки на компьютеры в сети. В журнале событий redteam, содержатся метки времени начала атаки и идентификаторы компьютеров, на которые были направлены атаки. Необходимо отметить, что постановка задачи для эксперимента имеет допущение в том, что атака на узел изменит поведение элемента системы. Однако в данных не содержится прямого указания типа атаки и была ли она успешной.

Для эксперимента были взяты данные из журнала сетевого взаимодействия, каждая запись которого содержит следующие поля: метка времени, длительность соединения, сетевой адрес и порт отправителя и получателя, размер пакета. Для сокращения количества обрабатываемых данных был выбран временной промежуток в 3 недели, как оптимальный варианта между количеством исходных данных и ожидаемым результатом.

На первом шаге журнал сетевого взаимодействия был разбит на несколько независимых журналов, каждый из которых соответствует журналу одного компьютера. Таким образом, была промоделирована ситуация, когда каждый элемент имеет собственный периметр защиты и информация о сетевом взаимодействии на каждом компьютере не передается за преде-

лы данного компьютера. Затем в каждом журнале данные были агрегированы по 10 минут. В результате состояние элемента РИС можно описать в виде двух векторов. Первый вектор  $v_{i,1}^t$ , размерностью  $N$ , показывает сколько раз элемент взаимодействовал с каждым из элементов системы. Вторым вектор  $v_{i,2}^t$  – какие и сколько раз использовались порты из множества всех возможных портов системы. Таким образом, в данном эксперименте состояние элемента РИС определяется следующим набором признаков:

$$s_i^t = \{v_{i,1}^t, v_{i,2}^t\}.$$

Была выбрана следующая функция сравнения элементов:

$$\rho(s_i^t, s_j^t) = d(v_{i,1}^t, v_{j,1}^t) + d(v_{i,2}^t, v_{j,2}^t) + d(v_{i,3}^t, v_{j,3}^t),$$

где  $d$  – евклидова метрика.

В качестве базисов в эксперименте были взяты состояния случайных элементов РИС в начальный момент времени. Затем были рассчитаны похожести состояния элементов РИС и базиса.

В основу функции доверия  $P$  предлагается использовать среднюю абсолютную ошибку в процентах (MAPE) прогнозирования временного ряда

$$P_i = 1 - \frac{1}{j} \sum_{t=0}^j \frac{\rho(s_i^t, b_0) - \rho^{\hat{}}(s_i^t, b_0)}{\rho(s_i^t, b_0)},$$

где  $\rho$  – фактическое значение похожести текущего состояния элемента на базис;  $\rho^{\hat{}}$  – прогнозирование похожести текущего состояния элемента на базис. Из формулы видно, что чем выше ошибка прогнозирования, тем ниже доверие к данному элементу в данный промежуток времени.

Все исходные данные были разделены на две выборки: тренировочная и тестовая по две и одну неделю соответственно. Затем на тренировочной выборке была обучена рекуррентная нейронная сеть. Для нейронной сети была выбрана следующая структура: входной слой, слой с Longshort-termmemory (LSTM) [5] элементами и выходной слой. Нейронные сети с такой архитектурой показывают высокие результаты в задаче обнаружения вторжений [6] и не требуют настройки множества параметров алгоритма.

После проведения эксперимента на всей совокупности были получены ошибка второго рода, значительно превышающая точность распознавания, и ошибка первого рода, из чего можно сделать вывод, что для большинства элементов РИС атаки не влияют на сетевое взаимодействие самих элементов. И, как следствие, по одному сетевому взаимодействию нельзя делать вывод о происходящей атаке. Одновременно с этим для отдельных элементов алгоритм показывает высокую точность распознавания. Также в данных отмечаются одновременные изменения поведения в

различных группах элементов, которые, в свою очередь, являются причиной большого числа ложных срабатываний предложенного алгоритма. Отсюда можно сделать вывод о необходимости уточнения исходных данных для эксперимента или создания новых. Аналогичные результаты были получены в работе [7].

Одним из направлений дальнейших исследований является разработка алгоритма выбора оптимального базиса.

Предложенный метод не может являться единственным способом защиты информации в РИС. Но использование данного алгоритма позволит, с одной стороны, предотвращать передачу конфиденциальной информации на ненадежные с точки зрения информационной безопасности элементы РИС, и, с другой стороны, использование данного подхода потребует более внимательного отношения к средствам защиты отдельных узлов РИС, что в совокупности повысит сложность взлома информационных систем в целом.

Даная работа поддержана грантом РФФИ №16-07-01008 (Ц2115.1 ГРФ).

### **Список литературы**

1. Mui L., Mohtashemi M., Halberstadt A. A computational model of trust and reputation // *System Sciences*, 2002. P. 2431 – 2439.
2. Середин О.С. Методы и алгоритмы беспризнакового распознавания образов: дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2001.
3. Shiravi Ali, Shiravi Hadi, Tavallae Mahbod, Ghorbani Ali A. Toward developing a systematic approach to generate benchmark datasets for intrusion detection // *Computers & security*. Elsevier. 31 (2012) P. 357 – 374.
4. Kent A.D. Comprehensive, Multi-Source Cybersecurity Events. Los Alamos National Laboratory. [Электронный ресурс] <http://dx.doi.org/10.17021/1179829>, 2015.
5. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory // *Neural Computation*. 1997. 9(8). P. 1735 – 1780.
6. Staudemeyer Ralf C. Applying long short-term memory recurrent neural networks to intrusion detection // *School of Computing, University of South Africa, Johannesburg, South Africa. SACJ No. 56, July, 2015.*
7. Melissa J.M. Turcotte, Nicholas A. Heard, Alexander D. Kent. Modeling user behavior in a network using computer event logs // *Dynamic Networks and Cyber-Security. Chapter 3. 2016.*

*Руднев Дмитрий Олегович, асп., [dima\\_rudnev@mail.ru](mailto:dima_rudnev@mail.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

*Сычугов Алексей Алексеевич, канд. техн. наук, доц., [xru2003@list.ru](mailto:xru2003@list.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет*

---

ANALYSIS OF THE SECURITY OF DISTRIBUTED INFORMATION SYSTEMS BASED ON  
FEATURELESS PATTERN RECOGNITION

D.O. Rudnev, A.A. Sychugov

*In the article the question of the security of distributed information systems in terms of confidence in the individual elements of the system. Studied approach allowing to estimate the level of trust, based on the methods featureless pattern recognition. Describes experiments conducted to verify the performance of this approach.*

*Key words: distributed information systems, trust, security, featureless pattern recognition.*

*Rudnev Dmitry Olegovich, postgraduate, [dima\\_rudnev@mail.ru](mailto:dima_rudnev@mail.ru), Russia, Tula, Tula State University,*

*Sychugov Alexey Alexeevich, candidate of technical sciences, docent, [xru2003@list.ru](mailto:xru2003@list.ru), Russia, Tula, Tula State University*

УДК 004.891

## МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ДОВЕРИЯ В ОБЛАЧНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЯХ

Д.О. Руднев, А.А. Сычугов

*Рассматривается проблема доверия между владельцем информации и поставщиком облачных услуг. Проводится анализ способов решения данной проблемы. Описан метод, который позволяет в реальном времени оценить облачные сервисы с точки зрения безопасности и, тем самым, повысить уровень доверия. Метод основан на безпризнаковом распознавании образов.*

*Ключевые слова: информационная безопасность, облачные технологии, доверие, машинное обучение, безпризнаковое распознавание образов.*

На сегодняшний день одной из самых сложных и неоднозначных проблем безопасности в облачных технологиях [1] является проблема доверия [2, 3] между поставщиком облачных услуг и владельцем информации. Согласно общему определению доверие [4] – это субъективная вероятность со стороны А выполнения действия стороной В, которое А не может наблюдать и которое влияет на действия А. Действие В повлияет на благосостояние А, его выгоду. В терминах облачных вычислений проблеме доверия можно сформулировать как отношение между поставщиком облачных услуг и владельцем информации, при котором владелец информации, доверяя поставщику, подразумевает, что тот своими действиями или бездействием не допустит нарушение целостности, доступности или конфиденциальности своей информации. Именно опасение за безопасность данных является наиболее частой причиной отказа от облачных технологий.

Проблема доверия в облачных технологиях связана с недостаточным, а часто полным отсутствием контроля над вычислительными ресурсами [5] поставщика облачных услуг. Так, например, при использовании облачных вычислений, построенных по модели Platform as a Service (PaaS, “платформа как услуга”), владелец информации имеет доступ только к виртуальной машине, но никак не может контролировать работу и настройки гипервизора [6], который в свою очередь является важной частью системы безопасности облачного сервиса.

В настоящее время существуют научные исследования, направленные на решение проблемы доверия к облачным вычислениям методами криптографии. Можно выделить два основных подхода, позволяющих повысить безопасность информации в облачных вычислениях: первый – защита информации со стороны владельца информации; второй – обеспечение доверительных отношений за счет повышения контроля за вычислительными ресурсами облачного сервиса со стороны владельца информации.

Первый подход заключается в шифровании данных перед отправкой в облако. При использовании классических методов шифрования обработка данных в облаке невозможна. Однако существует группа алгоритмов гомоморфного шифрования, которые позволяют выполнять вычисления над зашифрованными данными [7]. “Под гомоморфным шифрованием понимается криптографический примитив, представляющий собой функцию шифрования, удовлетворяющую дополнительному требованию гомоморфности относительно каких-либо алгебраических операций над открытыми текстами” [8]. То есть такой подход позволяет безопасно обрабатывать информацию в облаке, передавая ее уже в зашифрованном виде, а затем расшифровывать результат вычислений уже на клиенте. Однако, “в настоящее время нет ни одной реализации, готовой к внедрению в реальные системы” [9]. Таким образом, можно сделать вывод о том, что гомоморфное шифрование хоть и является очень перспективным направлением в области безопасности облачных вычислений, но современное состояние науки не позволяет использовать его в реальных системах.

Второй подход, как было отмечено выше, заключается в контроле со стороны владельца информацией за аппаратно-программной инфраструктурой облачного сервиса. Имея полную картину того, какие программные и аппаратные ресурсы используют в облачном сервисе, как они настроены и какие меры безопасности применяются, владелец данных может принять решение о доверии ко всему облачному сервису. Одновременно с этим стоит отметить, что информация, которая необходима для принятия решения о доверии к серверу, сама по себе является конфиденциальной, и ее разглашение может нанести вред безопасности облачного сервиса. Так, например, пользователь облачного сервиса в качестве необходимых условий для доверия к сервису может задать список конкретных

версий программного обеспечения, который пользователь считает доверительным. Одновременно с этим, зная какое именно программное обеспечение установлено, злоумышленник может воспользоваться уязвимостями нулевого дня, характерными для конкретной версии программного обеспечения.

В настоящее время для решения задачи повышения доверия применяется сертификация аппаратного и программного обеспечения облачных сервисов. Так, например, облачный сервис Microsoft Azure проходит ряд сертификаций, на основе которых государственные органы некоторых стран принимают решение о возможности обработки конфиденциальной информации в облачном сервисе. При данном подходе возникают две проблемы. Первая заключается в доверии к самому центру сертификации. Вторая проблема – сертификация не дает никаких технических гарантий, что в период между прохождением сертификаций конфигурация облачного сервиса не будет изменена.

Развитием подхода сертификации являются системы подтверждения состояния рабочих станций, работающих в реальном времени [10]. В таких системах по начальному (проверенному или доверенному) состоянию системы строится ХЭШ, который сравнивается с ХЭШ нового состояния. В таких системах единожды проверив программно-аппаратное обеспечение в любой момент времени, можно убедиться, что не было внесено изменений. Однако данный подход накладывает ограничения на то, что ХЭШ может быть подсчитан только на основании статических параметров системы, то есть тех параметров, которые не изменяются в процессе работы облачного сервиса. Например, можно получить подтверждение, что версия гипервизора является проверенной, но невозможно получить информацию о том, какие еще процессы запущены на серверной операционной системе, так как список этих процессов меняется со временем.

Таким образом, возникает задача разработки методики, которая позволит в реальном времени, с одной стороны, оценить уровень доверия к данному облачному сервису, а с другой – сохранить конфиденциальность информации о программно-аппаратной инфраструктуре сервиса облачных вычислений.

В качестве модели доверия предлагается использовать модель, основанную на бинарном значении доверия, то есть присвоить каждому из агентов(облачных сервисов) одно из двух значений – «доверие» или «недоверие». Другими словами, в данном случае задачу оценки доверия можно свести к задаче двухклассовой классификации.

Большинство алгоритмов классификации требует представление исследуемых объектов в качестве вектора признаков. С точки зрения облачных сервисов вектором признаков является информация об аппаратно-программном обеспечении, которую небезопасно передавать за пределы периметра самого сервиса [11]. Также стоит отметить, что на практике по-

лучение числовых значений, адекватно описывающих состояние облачного сервиса, является сложной задачей. В первую очередь, это связано с тем, что облачные сервисы представляют собой сложные, неоднородные динамические объекты, признаки которых сложно выразить числовыми значениями.

Таким образом, для решения поставленной задачи предлагается уйти от непосредственного анализа характеристик элементов системы, а вместо этого работать с мерами сходства. В теории распознавания образов подход, который использует сравнительное числовое представление объектов, называется беспризнаковым. Беспризнаковое распознавание образов [12] – метод машинного обучения, при котором вместо линейного векторного пространства признаков объектов рассматриваются отсчеты проекционного пространства, опирающегося на проекционные признаки, роль которых играют похожести на некоторые заранее заданные (пространство образующие или базисные) объекты. Другими словами, при использовании беспризнакового распознавания образов для каждого объекта исходного пространства определяется функция похожести (функция расстояния). Затем вводится множество базисных объектов. Для каждого объекта вычисляются проекционные признаки (вторичные признаки), которые равны мере похожести объекта на базисные. Затем возможно применение известных методов классификации, входными данными для которых являются вторичные признаки исходных объектов.

Пусть  $\Omega$  – множество всех возможных агентов:

$$\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N\}.$$

Для множества  $\Omega$  необходимо определить меру похожести объектов друг на друга  $r(\omega_i, \omega_j)$ . Функция похожести на множестве  $\Omega$  должна образовывать метрическое пространство. С точки зрения облачных сервисов мерой похожести является функция, позволяющая определить, насколько программно-аппаратные характеристики одного облачного сервиса похожи на характеристики другого. Вычисление меры похожести должно основываться на множестве характеристик облачного сервиса, включая статические и динамические.

Далее необходимо определить базис агентов. Базис – выборка агентов, для которых известно значение доверия. В базис могут входить как реально существующие агенты, так и гипотетические. Список облачных сервисов, входящих в множество базисных, может быть задан заранее и использован многократно. Базисную выборку можно обозначить следующим образом:

$$\Omega^0 = \{\omega_1^0, \omega_2^0, \dots, \omega_K^0\}; \Omega^0 \subset \Omega.$$

После того как определен базис, рассчитываются вторичные признаки для каждого агента:

$$\vec{X}_i = \{x'_1, x'_2, \dots, x'_K\},$$

где  $\vec{X}_i$  – вектор вторичных признаков элемента системы  $\omega_i \subset \Omega$ . Каждый элемент вторичного вектора признаков равен значению меры схожести самого агента и соответствующего базисного:

$$x'_i(\omega) = \rho(\omega, \omega_i^0).$$

Таким образом, получив множество векторов  $X = \{\vec{X}_1, \vec{X}_2, \dots, \vec{X}_N\}$ , в дальнейшем можно провести анализ с целью определения значения доверия, используя уже исследованные подходы, основанные на методах машинного обучения.

Описанный метод можно представить в виде следующих шагов.

1. Определяется функция схожести двух агентов.
2. Агент, инициирующий проведение проверки, генерирует или запрашивает из базы множество базисных объектов.
3. Агент рассылает базисную совокупность всем другим агентам.
4. Каждый агент, получивший базис, сравнивает себя с каждым базисным объектом.
5. Каждый агент, получивший базис, возвращает вектор числовых мер схожести на базисные элементы.
6. Получив результаты сравнения, агент обрабатывает их, основываясь на методах машинного обучения, и принимает решение о возможности доверия к каждому узлу системы.

При использовании такого подхода безопасность данных о характеристиках облачного сервиса будет гарантирована в том случае, если размерность пространства вторичных признаков меньше размера пространства исходных признаков ( $K < N$ ), по которым было рассчитано значение схожести. Это связано с невозможностью точного отображения объектов из пространства с меньшей размерностью в пространство с большей размерностью.

На настоящий момент был проведен численный эксперимент, цель которого – сравнить эффективность использования беспризнакового в распознавании образов с классическими методами машинного обучения в контексте задачи оценки защищенности облачного сервиса. По результатам эксперимента можно сделать вывод, что использование беспризнакового распознавания образов описанного подхода не ухудшает качество работы метода. Однако было замечено, что результаты в значительной степени зависят от выбранных базисных элементов, в связи с чем одним из направлений дальнейших исследований, которые позволят эффективно реализовать предложенный метод, является поиск оптимального алгоритма выбора базисных элементов в случае беспризнакового распознавания образов. Вторая задача заключается в создании универсальной методики сравнения облачных сервисов.

Такой метод проверки облачного сервиса позволит, с одной стороны, пользователю оценить уровень защищённости сервиса, а, с другой стороны, не допустить компрометации информации о средствах защиты самого облачного сервиса. Использование предложенного метода на практике позволит повысить доверие к облачным сервисам, что, в свою очередь, ускорит развитие облачных технологий.

### **Список литературы**

1. Peter Mell, Timothy Grance The NIST Definition of Cloud Computing [Электронный ресурс]. URL: <http://csrc.nist.gov/publications/nistpubs/800-145/SP800-145.pdf> (дата обращения 09.02.2015).
2. Осколков И. Проблемы облачных вычислений [Электронный ресурс] // Компьютера: электронный журнал. Декабрь 2009 года. URL: <http://old.computerra.ru/vision/485315> (дата обращения 09.02.2015).
3. Ahmad Rashidi and Naser Movahhedinia A Model for User Trust in Cloud Computing. International Journal on Cloud Computing: Services and Architecture (IJCCSA). 2012. Vol. 2. No. 2.
4. Mui L., Mohtashemi M., Halberstadt A. A computational model of trust and reputation // System Sciences, 2002. P. 2431 – 2439.
5. Khaled M. Khan and Qutaibah Malluhi Establishing. Trust in Cloud Computing [Электронный ресурс]. URL: [http://www.cs.unh.edu/~it666/reading\\_list/Virtualization/establishing\\_trust\\_cloud\\_computing.pdf](http://www.cs.unh.edu/~it666/reading_list/Virtualization/establishing_trust_cloud_computing.pdf) (дата обращения 09.02.2015).
6. Вик Дж. Р. Уинклер Облачные вычисления: вопросы безопасности в виртуальных облаках [Электронный ресурс] Tech Net Magazine. URL: <https://technet.microsoft.com/ru-ru/magazine/hh641415.aspx> (дата обращения 09.02.2015).
7. Barak B. Fully Homomorphic Encryption [Электронный ресурс]. URL: <http://www.cs.bu.edu/~reyzin/teaching/s11cs937/notes-boaz-1.pdf> (дата обращения 09.02.2015).
8. Варновский Н.П., Шокуров А.В. Гомоморфное шифрование [Электронный ресурс] Труды Института системного программирования РАН. 2007. URL: [http://www.ispras.ru/proceedings/docs/2007/12/ispr\\_12\\_2007\\_27.pdf](http://www.ispras.ru/proceedings/docs/2007/12/ispr_12_2007_27.pdf) (дата обращения 09.02.2015).
9. Жиров А.О., Жирова О.В., Кренделев С.Ф. Безопасные облачные вычисления с помощью гомоморфной криптографии // Безопасность информационных технологий. М., 2013. С. 6 – 12.
10. Воробьев В.И., Рыжков С.Р., Фаткиева Р.Р. Защита периметра облачных вычислений. // Программные системы: теория и приложения. 2015. С. 61 – 71.

11. Руднев Д.О., Сычугов А.А. Метод безопасного сбора информации о элементах распределённой информационной системы. // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. Декабрь № 12 (83). 2015. Ч. II.

12. Середин О.С. Методы и алгоритмы беспризнакового распознавания образов: Дис. ... канд. // физ.-мат. наук. М., 2001.

*Руднев Дмитрий Олегович, асп., [dima\\_rudnev@mail.ru](mailto:dima_rudnev@mail.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

*Сычугов Алексей Алексеевич, канд. техн. наук, доц., [xru2003@list.ru](mailto:xru2003@list.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет*

#### *METHOD OF INCREASING CONFIDENCE IN CLOUD COMPUTING*

*D.O. Rudnev, A.A. Sychugov*

*In this paper we consider the problem of trust between the owner of the information and cloud services provider. The analysis methods of the solution given-term problems. This article describes a method that allows real-time to evaluate cloud services from the point of view of security and thereby increase the level of confidence. The method described is based on featureless pattern recognition.*

*Key words: information security, cloud computing, trust, confidence, machine learning, featureless pattern recognition.*

*Rudnev Dmitry Olegovich, postgraduate, [dima\\_rudnev@mail.ru](mailto:dima_rudnev@mail.ru), Russia, Tula, Tula State University,*

*Sychugov Alexey Alexeevich, candidate of technical sciences, docent, [xru2003@list.ru](mailto:xru2003@list.ru), Russia, Tula, Tula State University*

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОЦЕНИВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

В.Л. Токарев, А.А. Сычугов

*Рассмотрен подход к построению математического обеспечения системы оценивания информационной безопасности автоматизированных систем, основанный на теории обеспечения рациональности решений. Предложенные алгоритмы обладают полиномиальной сложностью, что обеспечивает им более высокую эффективность, особенно при больших размерах кода.*

*Ключевые слова: информационная безопасность, автоматизированная система.*

Согласно требованиям основных критериев [1] оценки безопасности автоматизированных систем их системы защиты должны строиться на основе формальных моделей. Это позволяет оценивать соответствие системы защиты информации требованиям заданной политики безопасности. Задаче построения формальных моделей безопасности компьютерных систем посвящен в России ряд работ, основные результаты которых представлены в [2]. Тем не менее, оценивание безопасности автоматизированных систем (АС) по-прежнему остается трудно разрешимой задачей, а известные алгоритмы имеют экспоненциальную сложность.

В статье предлагается подход к построению математического обеспечения системы оценивания информационной безопасности АС, основанный на теории обеспечения рациональности решений [3], в соответствии с которым основу математического обеспечения составляет формальная модель системы в целом. Этот подход рассмотрен на примере оценивания безопасности АС с дискреционным управлением доступом, что позволило обеспечить алгоритмическую разрешимость задачи проверки информационной безопасности систем при полиномиальной сложности разработанных алгоритмов.

Особенностью АС с дискреционным управлением доступом  $\Sigma$  является соответствие следующим требованиям: все сущности (объекты и субъекты АС) должны быть идентифицированы; задается матрица доступов, в которой строка соответствует субъекту АС, столбец – объекту АС, а ячейка – перечень прав доступа субъекта к объектам АС; субъект обладает правом доступа к объекту АС тогда, когда в ячейке, соответствующей субъекту и объекту АС содержится такое право.

Нарушением безопасности АС будем считать переход ее в состояние, в котором или получен некоторым субъектом запрещенный доступ, или произошла утечка права доступа, или реализован запрещенный информационный поток.

Поэтому для решения задачи оценивания соответствие системы защиты информации АС требованиям заданной политики безопасности требуется, в первую очередь, анализировать последовательности состояний АС, в каждом из которых могут быть осуществлены различные доступы субъектов к объектам АС.

Общий вид модели проверки системы  $\Sigma$  представим следующим образом:

$$W = \langle A, S, R, M, C, T, Q \rangle,$$

где  $A$  – множество объектов системы  $\Sigma$ ;  $S$  – множество субъектов системы  $\Sigma$  ( $S \subseteq A$ );  $R$  – множество прав доступа субъектов  $s$  к объектам  $a \in A$ ;  $M$  – матрица доступов  $M(s, a)$ ,  $s \in S$ ,  $a \in A$ ;  $C$  – множество команд системы  $\Sigma$ ;  $T$  – множество типов объектов  $a \in A$ ;  $Q$  – множество состояний системы  $\Sigma$ ,  $Q = \{q(A, S, t, C, M)\}$ .

Любая система  $\Sigma$ , несмотря на большое число возможных состояний, может находиться в одном из трех состояний: начальном  $q_0$ , связанном  $q_p$ , квазибезопасном  $q_b$ . Начальное состояние  $q_0$  – первое состояние анализируемой последовательности состояний АС при выполнении ею любой незапрещенной программы. Связанное состояние  $q_p$  – состояние АС, в котором все команды, содержащие примитивные операторы «создать», упорядочиваются по признаку «потомок» - «предок», при этом каждая команда применяется со всеми возможными для нее наборами родительских объектов, т.е. она «связана» с родительскими объектами. Квазибезопасное состояние  $q_b$  – состояние АС, в котором дальнейшее применение команд, не содержащих примитивные операторы «создать», не приводит к изменениям в матрице доступа  $M(s, a)$ .

Состояния системы  $\Sigma$  изменяются в соответствии с правилом:  $q \xrightarrow{c(\cdot) \in C} q'$ . При этом для всех параметров команд  $c(\cdot)$  указывается их тип:  $c(x_1 : t_1, \dots, x_m : t_m)$ . Перед выполнением команды  $c_i(\cdot)$  проверяются типы фактических параметров, и если они не совпадают с указанными типами в определении команды  $c_i(x_1 : t_1, \dots, x_m : t_m)$ , то команда  $c_i(\cdot)$  не выполняется.

Необходимое для получения оценки информационной безопасности подмножество примитивных команд  $C' \subseteq C$  можно ограничить следующими:

1. «Ввести право  $r$  в  $M(s, a)$ »

$$q(s \in S, a \in A, r \in R) \rightarrow q' \left( \begin{array}{l} S' = S, A' = A, t' = t; M'(s, a) = M(s, a) \cup \{r\}; \\ \forall (s', a') = (s, a) \Rightarrow M'(s', a') = M(s', a'). \end{array} \right)$$

2. «Удалить право  $r$  из  $M(s, a)$ »

$$q(s \in S, a \in A, r \in R) \rightarrow q' \left( \begin{array}{l} S' = S, A' = A, t' = t; M'(s, a) = M(s, a) \setminus \{r\}; \\ \forall (s', a') = (s, a) \Rightarrow M'(s', a') = M(s', a'). \end{array} \right)$$

3. «Создать субъект  $s$  с типом  $t_s$ »

$$q(s \notin S, a \in A, r \in R) \rightarrow q' \left( \begin{array}{l} S' = S \cup \{s'\}, s' \notin S, A' = A \cup \{s'\}, t'(a) = t(a); t'(s') = t_s; \\ \forall (s, a) \in S \times A \Rightarrow M'(s, a) = M(s, a); \quad \forall a \in A' \Rightarrow M'(s', a) = \emptyset; \\ \forall s \in S' \Rightarrow M'(s, s') = \emptyset. \end{array} \right)$$

4. «Создать объект  $a$  с типом  $t_a$ »

$$q(s \in S, a \notin A, r \in R) \rightarrow q' \left( \begin{array}{l} S' = S, A' = A \cup \{a'\}, a' \notin A, \forall a \in A \Rightarrow t'(a) = t(a); t'(a') = t_a; \\ \forall (s, a) \in S \times A \Rightarrow M'(s, a) = M(s, a); \quad \forall s \in S' \Rightarrow M'(s, a') = \emptyset. \end{array} \right)$$

5. «Уничтожить субъект  $s'$ »

$$q(s \in S, a \in A, r \in R) \rightarrow q' \left( \begin{array}{l} S' = S \setminus \{s'\}, s' \in S, A' = A \setminus \{s'\}, a' \notin A, \forall a \in A' \Rightarrow t'(a) = t(a); \\ \forall (s, a) \in S' \times A' \Rightarrow M'(s, a) = M(s, a). \end{array} \right)$$

6. «Уничтожить объект  $a'$ »

$$q(s \notin S, a \in A, r \in R) \rightarrow q' \left( \begin{array}{l} S' = S, A' = A \setminus \{a'\}, a' \in A, \forall a \in A' \Rightarrow t'(a) = t(a); \\ \forall (s, a) \in S' \times A' \Rightarrow M'(s, a) = M(s, a). \end{array} \right)$$

Параметры  $x_j$  ( $1 \leq j \leq m$ ) команды  $c_1(x_1 : t_1, \dots, x_m : t_m)$  могут быть *дочерними*, если в ней содержится примитивный оператор «создать субъект  $x_j$  с типом  $t_j$ » или «создать объект  $x_j$  с типом  $t_j$ », или *родительскими*, если такого оператора нет.

Систему команд  $C'$  системы  $\Sigma$  можно назвать *монотонной*, если в командах множества  $C$  отсутствуют примитивные команды вида «Удалить» и «Уничтожить». Систему команд  $C'$  можно отнести к *канонической  $C''$* , если команды, содержащие примитивные операторы вида «создать», не содержат условий и примитивных операторов вида «Ввести».

Для того, чтобы определить ограничения, достаточные для алгоритмической разрешимости задачи проверки безопасности в системе  $C'$ , опишем взаимосвязи между различными типами с помощью графа, определяющего отношения наследственности между типами, устанавливаемые через команды порождения объектов и субъектов.

Граф  $G_{C'}$  создания системы  $C'$ -ориентированный, с множеством вершин  $T$ , в котором ребро  $(uv)$  существует тогда, когда в системе  $C'$  имеется команда, в которой  $u(\cdot)$  – команда родительского типа, а  $v(\cdot)$  – дочернего типа.

Такой граф позволяет определить: 1) объекты каких типов *должны существовать* в системе, чтобы в ней мог появиться объект или субъект заданного типа; 2) объекты каких типов *могут быть порождены* при участии объектов заданного типа.

Система  $C'$  будет *ациклической  $C''$* , если соответствующий ей граф  $G_{C''}$  не содержит циклов, т.е. система  $C''$  содержит команду  $u(\cdot)$ , тип которой является одновременно и дочерним, и родительским.

С учетом предложенных определений и ограничений сформулирован алгоритм проверки информационной безопасности системы  $C'$ .

### Алгоритм 1

1. Для системы  $C'$  строится эквивалентная ей ациклическая система  $C''$ .

2. Используя команды, содержащие только примитивные операторы «создать», и не содержащие условий, перейти из состояния  $q_0$  в «связанное» состояние, обеспечивающее минимально необходимый и достаточный для распространения прав доступа состав объектов.

3. Используя команды, не содержащие примитивные операторы «создать», перейти из «связанного» состояния в «квазибезопасное» состояние, в котором дальнейшее применение таких команд не приводят к изменениям в матрице доступов.

4. Если такой переход возможен, т.е. выполняется условие  $\forall (s,a) \in S_{q_0} \times A_{q_0} \Rightarrow M_g(s,a) \subseteq M_j(s,a)$ , то информационная безопасность системы  $C'$  обеспечивается, иначе – нет.

*Первый шаг* алгоритма 1 необходим для получения канонической ациклической формы проверяемой системы  $C'$ , что упрощает процесс проверки любой системы  $\Sigma$ . Для преобразования системы  $C'$  вначале упрощается ее граф за счет построения эквивалентной ациклической формы, используя стандартные схемы преобразования [4]. Затем выполняется следующий алгоритм.

### Алгоритм 2

1. Каждую команду  $c_i(x_1:t_1, \dots, x_m:t_m) \in C$  ациклической системы  $C'$ , не содержащую примитивные операторы «создать», представляют командой  $c_i(x_1:t_1, \dots, x_m:x:t_{act})$  системы  $C'$ , полученной из исходной команды добавлением условий проверки  $r_{act} \in M''(x, x_i), i=1, \dots, m$ . Здесь  $r_{act}$  – право доступа активизировать субъекты и объекты системы  $C'$ .

2. Каждую команду  $c_i(x_1:t_1, \dots, x_m:t_m) \in C'$ , содержащую примитивные операторы «создать», представляют монотонными командами:

командами  $c'_i(x_1:t_1, \dots, x_m:t_m)$  без проверки условий  $r_{act} \in M(x, x_i), i=1, \dots, m$ , каждая из которых соответствует дочернему параметру  $x_i$  команды  $c_i(x_1:t_1, \dots, x_m:t_m)$  и содержит все ее родительские параметры  $x_i$ ;

командами  $c''_i(x_1:t_1, \dots, x_m:t_m)$ , содержащими условия и примитивные параметры «ввести» команды  $c_i(x_1:t_1, \dots, x_m:t_m)$  и условия проверки  $M(x, x_i), i=1, \dots, m$  для всех родительских параметров  $x_i$ ;

командами  $c'''_i(x_1:t_1, \dots, x_m:t_m)$ , содержащими примитивные операторы «ввести» право  $r_{act}$  в  $M(x, x_i)$  для всех дочерних параметров  $x_i$ .

В результате выполнения первого шага алгоритма 1 образуется ациклическая система  $C''$ , эквивалентная ациклической системе  $C'$ .

Для получения «связанного» состояния необходимо упорядочить все команды, содержащие примитивные операторы «создать». Для этого обозначим команды, содержащие примитивные операторы «создать», как  $\alpha$  и  $\beta$ , причем будем считать, что  $\alpha < \beta$  тогда, когда для некоторого дочернего типа команды  $\alpha$  в графе  $G_{C'}$  найдется путь к команде  $\beta$  родительского типа. То есть отношение  $\alpha < \beta$  является отношением строгого порядка и потому обладает свойствами антирефлексивности, транзитивности и антисимметричности.

С учетом введенных обозначений сформулирован следующий алгоритм получения «связанного» состояния системы  $C''$ .

### Алгоритм 3

1. Все команды, содержащие примитивные операторы «создать», упорядочиваются: если  $\alpha < \beta$  или  $\alpha \sim \beta$ , то команда  $\alpha$  размещается перед командой  $\beta$ .

2. Начиная с состояния  $q_0$  выполняются команды из упорядоченного списка, причем каждая команда применяется со всеми возможными для нее наборами родительских объектов.

3. В результате для любого начального состояния за конечное число шагов получим «связанное» состояние системы  $C''$ .

Например, пусть  $\{q_0, q_1, \dots\}$  – последовательность системы  $C'$ . Для каждого состояния  $q_j$  на множестве  $A_j$  рекурсивно определим функцию порождения объектов  $\lambda: \forall a \in A_0 \subseteq A_j \Rightarrow \lambda(a) = a$ ; Если объект  $a \in A_k \subset A_j$  создан на шаге  $k$  ( $0 < k \leq j$ ) последовательности командой  $\alpha_k$ , то положим  $\lambda(a) = \alpha_k(\lambda(a_1), \lambda(a_2), \dots, \lambda(a_m))$ . Этот пример можно проиллюстрировать следующим образом.

Пусть  $C'$  содержит две команды  $cv$  и  $cw$ :

command  $cv(x : u, y : v)$  создать субъект  $y$  с типом  $v$ ; end;

command  $cw(x : u, y : v, z : w)$  создать объект  $z$  с типом  $w$ ; end;

Тогда последовательность будет иметь вид

$$q_0 \xrightarrow{cv(x,y)} q_1 \xrightarrow{cw(x,y,z)} q_2, \quad (1)$$

где  $q_0 = (S_0, A_0, t_0, M_0) = (\{x\}, \{x\}, \{(x, u)\}, M_0)$ . Тогда в состоянии  $q_2 = (S_2, A_2, t_2, M_2) = (\{x, y\}, \{x, y, z\}, \{(x, u), (y, v), (z, w)\}, M_2)$  функция  $\lambda$  получает значения  $\lambda(x) = x$ ;  $\lambda(y) = cv(x)$ ;  $\lambda(z) = cw(x, cv(x))$ .

Можно показать, что в «связанном» состоянии системы  $C''$  для каждого возможного значения функции  $\lambda$  существует ровно один соответствующий объект  $a$ .

Таким образом, алгоритм 3 реализует *второй шаг* алгоритма 1.

*Третий шаг* алгоритма 1 имеет конечную сложность, так как множество  $A$  не изменяется, а необходимое количество перебора последовательностей различных команд – конечное число.

Если в некотором состоянии последовательности команд программы, выполняемой АС, произошло какое-либо изменение матрицы доступа (условие (3) нарушено), это означает, что произошла утечка права доступа.

**Теорема.** Алгоритм 1 обеспечивает алгоритмическую разрешимость задачи проверки информационной безопасности систем  $\Sigma$  и обладает полиномиальной сложностью.

*Доказательство.*

Рассмотрим ациклическую систему  $C''$ .

Пусть  $q_p$  – «связанное» состояние, полученное по алгоритму 3 из начального  $q_0$ , а  $q_g$  – квазибезопасное состояние, полученное из  $q_p$  с помощью команд, не содержащих примитивные операторы «создать».

Из свойства монотонности системы  $C''$  следует, что

$$\forall (s, a) \in S_{qp} \times A_{qp} = S_{qj} \times A_{qj} \Rightarrow M_{qp}(s, a) \subseteq M_{qj}(s, a) \quad (2)$$

А поскольку для любой последовательности  $\{q_0, \dots, h, \dots\}$  может быть найдена последовательность  $\{q_p, \dots, g, \dots\}$  без команд, содержащих примитивные операторы «создать», то тогда

$$\forall (s, a) \in S_h \times A_h \Rightarrow M_h(s, a) \subseteq M_g(\lambda(s), \lambda(a)). \quad (3)$$

Если условие (3) выполняется, то с учетом (2) следует

$$\forall (s, a) \in S_h \times A_h \Rightarrow M_h(s, a) \subseteq M_g(\lambda(s), \lambda(a)),$$

что означает алгоритмическую разрешимость задачи оценивания безопасности систем  $C''$ , а, следовательно, и систем  $C'$ .

Обоснуем условие (3). Для этого преобразуем последовательность команд  $\{q_0, \dots, h, \dots\}$  в последовательность команд  $\{q_p, \dots, g, \dots\}$  следующим образом: 1) сначала из последовательности  $\{q_0, \dots, h, \dots\}$  удаляются все команды, содержащие примитивные операторы «создать»; 2) команды вида  $c(x_1 : t_1, \dots, x_m : t_m)$  последовательности  $\{q_0, \dots, h, \dots\}$  заменить на команды  $c(\lambda(x_1) : t_1, \dots, \lambda(x_m) : t_m)$  последовательности  $\{q_p, \dots, g, \dots\}$ .

По индукции по длине последовательности  $\{q_0, \dots, h, \dots\}$  можно показать, что выполняются следующие условия:

1)  $\forall c(x_1 : t_1, \dots, x_m : t_m)$  последовательности  $\{q_0, \dots, h, \dots\}$  (условие  $c(x_1 : t_1, \dots, x_m : t_m) = \text{true}$ )  $\rightarrow$  (условие  $c(\lambda(x_1) : t_1, \dots, \lambda(x_m) : t_m)$  последовательности  $\{q_p, \dots, g, \dots\} = \text{true}$ );

2) для состояния  $h$  последовательности  $\{q_0, \dots, h, \dots\}$  и соответствующего ему состояния  $g$  последовательности  $\{q_p, \dots, g, \dots\}$  верно, что

$$\forall (s, a) \in S_h \times A_h \Rightarrow M_h(s, a) \subseteq M_g(\lambda(s), \lambda(a)).$$

Таким образом, условие (3) выполняется, что доказывает первую часть теоремы.

Кроме того, предложенный алгоритм, использующий матрицу доступа  $M(s,a)$ , можно представить в виде эйлера бинарного связного отношения размером  $n \times m$ , ( $n \geq m$ ) описываемого графом  $G_{C'}$ , причем с упорядоченными элементами  $\alpha < \beta$ . Тогда проверка выполнения условия (3) требует выполнения  $O(n^3)$  действий, что соответствует полиномиальной временной сложности. Это доказывает вторую часть теоремы.

В заключение отметим следующее.

В статье рассмотрен подход к построению математического обеспечения системы оценивания информационной безопасности АС с дискреционным управлением доступом к защищаемым ресурсам. Предложенные алгоритмы, обладают особенностями, позволяющие их рассматривать как основу системы оценивания безопасности АС. Основной особенностью рассмотренных алгоритмов является их временная полиномиальная сложность. Это обеспечивает им более высокую эффективность, особенно при больших размерах кода.

Полученные при апробации рассмотренных в настоящей работе решений результаты подтвердили их эффективность и возможность использования в более широком классе защищенных автоматизированных систем.

### **Список литературы**

1. Безопасность информационных технологий. Критерии оценки безопасности информационных технологий. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408. Ч. 1 – 3. М.: Гостехкомиссия России, 2002.
2. Девянин П.Н. Модели безопасности компьютерных систем. Управление доступом и информационными потоками. М.: Горячая линия Телеком, 2016. 338 с.
3. Токарев В.Л. Компьютерная поддержка принятия решений: монография. М.: Изд-во СГУ, 2007. 162 с.
4. Оре О. Теория графов. М.: ИД «ЛИБРОКОМ», 2009. 354 с.

*Токарев Вячеслав Леонидович, д-р техн. наук, доц., [tokarev22@yandex.ru](mailto:tokarev22@yandex.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

*Сычугов Алексей Алексеевич, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой, [xru2003@list.ru](mailto:xru2003@list.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет*

*SOFTWARE SECURITY ESTIMATION OF AUTOMATED SYSTEMS*

*V.L. Tokarev, A.A. Sychugov*

*The approach to construction of mathematical software assessment system of information security of automated systems based on the theory ensuring of the decisions rationality is considered. The algorithms having polynomial complexity and ensures higher efficiency are proposed.*

*Key words: information security, automated systems.*

*Tokarev Vjacheslav Leonydovich, doctor of technical sciences, docent, [tokarev22@yandex.ru](mailto:tokarev22@yandex.ru), Russia, Tula, Tula State University,*

*Sychugov Alecsey Alecseevich, candidate of technical sciences, docent, head of chair, [xru2003@list.ru](mailto:xru2003@list.ru), Russia, Tula, Tula State University*

## **ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В РЕШЕНИИ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ**

УДК 681.5

### **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ВЕЛИЧИНЫ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ОСНАСТКИ**

А.Н. Баранов, Е.М. Баранова, А.И. Титоров

*Представлены результаты проведенного экспериментального исследования максимально возможной величины стойкости штампового инструмента, а именно пуансонов, применяемых в процессе полугорячего выдавливания с получением четырехфакторной математической прогнозной модели.*

*Ключевые слова: износостойкость, инструментальная оснастка, технологическая операция, выдавливание, планирование, эксперимент, прогнозирование, имитационная модель.*

В последние годы в промышленности основными показателями эффективности новых технологий являются трудоемкость и энергометаллоемкость изготовления деталей.

Методы холодной и горячей штамповки на базе заготовок сортового проката, широко применяемые на производстве, характеризуются достаточно высоким коэффициентом использования металла, однако позволяют обрабатывать не все виды современных тугоплавких сплавов (холодная штамповка), либо характеризуются высокой стоимостью обработки (горячая штамповка).

Технологические процессы с применением методов полугорячей штамповки позволяют исключить основные недостатки холодной и горячей штамповки. Однако процессы полугорячей штамповки в сравнении с методами холодной и горячей обработки металлов давлением характеризуются самой высокой степенью износа штампового инструмента. Это связано с тем, что в процессе полугорячей обработки металлов рабочие части инструмента (в частности, рабочие части ударного инструмента, а именно пуансонов) работают в наиболее тяжелых условиях:

– инструмент испытывает значительные силовые нагрузки, а именно работает при давлении порядка 900...1000 МПа;

– инструмент испытывает неравномерный нагрев и охлаждение в пределах температур 600...800 °С.

В процессе контакта ударного инструмента и нагретой заготовки тепло от материала заготовки передается рабочей части пуансона и вызывает в материале, из которого изготовлен инструмент, перлитные превращения. Доказано, что именно на стадии перлитных превращений металл в наибольшей степени подвержен разрушению. Таким образом, термосиловая нагрузка в пределах перлитного превращения в металле и вызывает скорейшее разрушение штампового инструмента.

Так, если рассматривать процесс полугорячего выдавливания, то из опыта производства установлено, что при прямом ходе пуансон испытывает значительные сжимающие напряжения, а при обратном – растягивающие. Причем, если напряжения сжатия будут превышать предел текучести при сжатии материала пуансона, то в микрочастицах пуансона, находящегося в металлической матрице, произойдет пластическая деформация. При обратном ходе инструмента из-за растяжения в этих зонах будут зарождаться трещины, которые при дальнейшей интенсивной термосиловой нагрузке приведут к разрушению пуансона. Трещины на поверхности пуансона вызывают возникновение брака в ходе штамповки изделий.

Срок службы пуансонов, работающих в условиях полугорячего выдавливания, в основном, не превышает 2 – 5 тысяч циклов работы. Частая смена инструмента снижает производительность и повышает расходы на производство готовой продукции за счет роста затрат на изготовление рабочего инструмента.

Для того чтобы производственный заказ был выполнен своевременно, технологам необходимо заранее знать, какое количество инструмента, достаточного для реализации заказа, необходимо заблаговременно изготовить.

Если изготовленного инструмента недостаточно (инструмент пришёл в негодность в силу наличия на нём трещин), то процесс реализации заказа приостанавливается до тех пор, пока не будет изготовлено дополнительное количество инструмента. Если инструмента изготовлено больше, чем необходимо для выполнения заказа, то себестоимость готовых изделий неоправданно возрастает. Причем для реализации каждого производственного заказа требуется уникальный инструмент, так как размеры и конфигурации изделий различны, а форма и геометрия изделий определяется именно конфигурацией инструментальной оснастки.

Для того чтобы установить требуемое количество штампового инструмента, достаточное для выполнения заданного объема заказа, прибегают к методам прогнозирования инструментальной износостойкости, а

именно к прогнозированию количества циклов работы инструмента до его разрушения (появления магистральной трещины на рабочей части пуансонов, приводящей к браку при штамповке).

Таким образом, актуальность вопросов прогнозирования износостойкости инструментальной оснастки обусловлена необходимостью математически обоснованного определения минимального количества штампового инструмента, достаточного для выполнения заданного объема заказа.

Сегодня проблема прогнозирования износостойкости инструмента, в частности пуансонов, и определения их количества, достаточного для выполнения заданного объема заказа, находится на стадии изучения и не решена окончательно. В работе [1] рассмотрено прогнозирование износостойкости пуансонов, работающих в условиях полугорячего выдавливания, где методами планирования эксперимента и регрессионного анализа были получены зависимости износостойкости пуансонов от трех, влияющих на износ инструмента, факторов – силы, действующей на инструмент, температуры нагрева заготовки и производительности оборудования.

В работе [1] для проведения экспериментальных исследований на базе прессы К2130Б с максимальным развиваемым усилием 100 ТС была смонтирована установка для испытания образец-пуансонов, материал которых исследовался на термомеханическую усталость (износостойкость).

По результатам экспериментального исследования были получены математические модели для прогноза износостойкости пуансонов, выполненных из трех различных марок стали (табл. 1).

**Таблица 1**

**Математические модели для прогноза износостойкости пуансонов, выполненных из трех различных марок стали**

Марка инструментальной стали	Уравнение регрессии
Р6М5	$y_1 = 2706,25 - 93,75x_1 - 206,25x_2 - 218,75x_3 - 6,25x_{12} + 6,25x_{13} + 18,75x_{23} - 6,25x_{123}$
4Х5МФС	$y_2 = 5531,25 - 56,25x_1 - 118,75x_2 - 118,75x_3 - 6,25x_{12} - 6,25x_{13} - 18,75x_{23} - 6,25x_{123}$
3Х3М3Ф	$y_3 = 4262,5 - 100x_1 - 187,5x_2 - 200x_3 - 25x_{12} - 12,5x_{13} - 25x_{23} - 12,5x_{123}$

Анализ ранее полученных математических моделей позволил сделать вывод о том, что стойкость инструмента значительно зависит от силы, действующей на инструмент, а также производительности, и в меньшей мере от температуры. Стойкость инструмента будет максимальна в том случае, когда все параметры окажутся на нижних уровнях.

Однако, полученные в работе [1] математические модели не в полной мере отражают процесс разрушения пуансонов, работающих в условиях полугорячего выдавливания, так как прогнозная модель, являясь недостаточно точной, учитывает не все факторы, влияющие на разрушение рабочего инструмента.

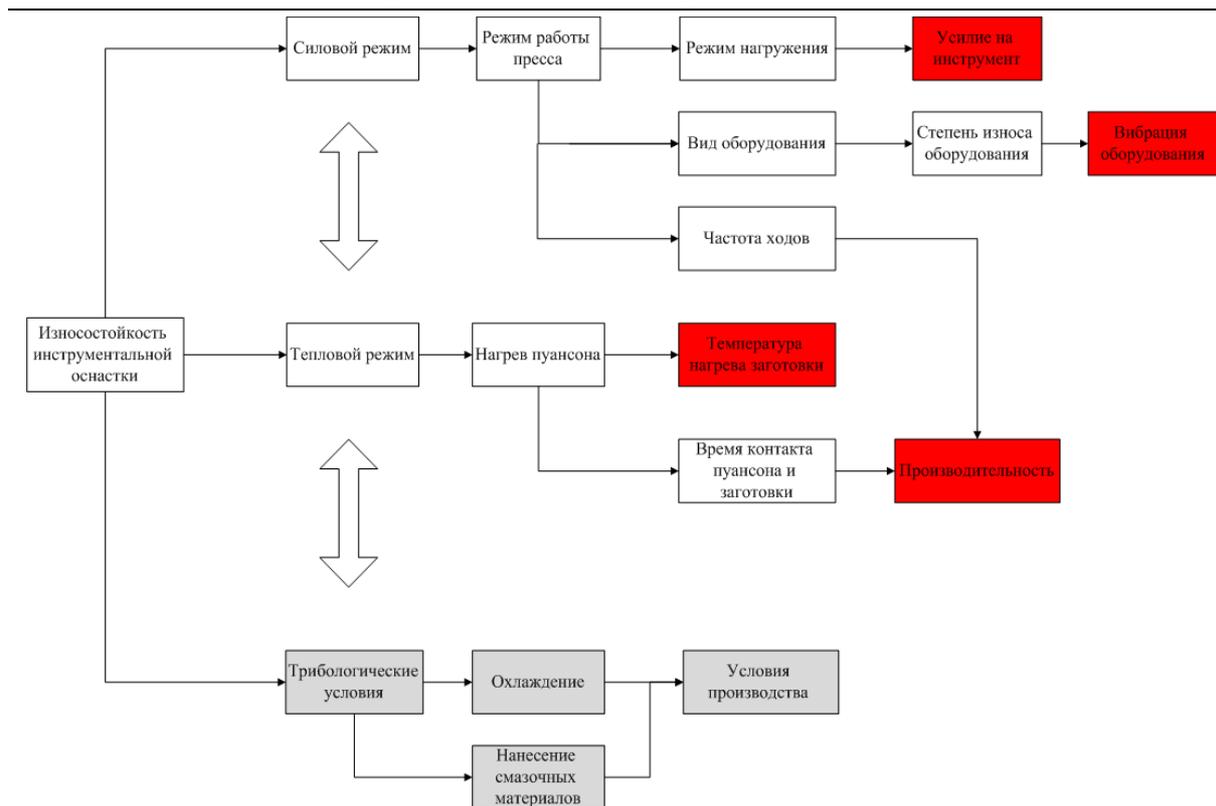
Сегодня производственные условия диктуют необходимость учета влияния на износостойкость инструмента не только основных факторов (силы, действующей на инструмент, температуры нагрева заготовки и производительности оборудования), но и дополнительных факторов, в частности вибрации оборудования. Это связано с тем, что производственные процессы не всегда осуществляются на новых образцах оборудования, где вибрация пренебрежительно мала. На производственных предприятиях города Тулы применяются мощные прессы и автоматические линии старых образцов, которые справляются с производственными задачами, но, в силу значительного срока службы и значительной амортизации, характеризуются повышенным уровнем вибрации. Всякое отклонение параметров функционирования оборудования от нормы, в частности вибрации, приводит к изменению характера взаимодействия его элементов, следовательно – к понижению износостойкости инструментальной оснастки. Исследование уровня вибрации оборудования представлено в работе [2].

Анализ технологических параметров выявил сложное и неоднозначное их влияние на условия эксплуатации пуансонов полугорячего выдавливания, а также неоднозначное взаимодействие между самими параметрами [1, 2].

Схема, отражающая технологические параметры, в наибольшей степени влияющие на разрушение инструментальной оснастки, представлена на рис. 1, где видно, что к основным технологическим факторам, оказывающим первостепенное действие на процесс разрушения рабочей части пуансона, относятся:

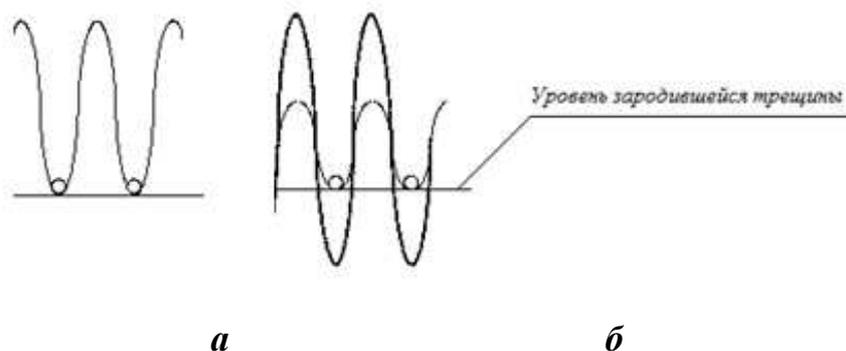
- силовой и тепловой режимы;
- трибологические условия, а именно технические возможности нагрева и охлаждения рабочего инструмента и способы нанесения смазочных покрытий.

Сегодня на базе производственного опыта установлено, что катализатором прогрессирующего зарождения трещин в инструменте является вибрация оборудования, вызванная естественным физическим старением оборудования и влиянием внешних факторов (аварии, поломки, удары и прочее). При действии вибрации наблюдается изменение механических свойств и реологического поведения металла инструмента за счет виброактивации [2]. Явление виброактивации объясняется понижением положений атомов на уровне их потенциальных барьеров, то есть атомы смещаются относительно дна потенциальных «ямок», как показано на рис. 2.



**Рис. 1. Технологические параметры, влияющие на стойкость инструментальной оснастки**

При этом к общей термосиловой нагрузке, действующей на материал инструмента, добавляется динамическая сила, усиливающая разрушающее воздействие на его рабочей поверхности.



**Рис. 2. Действие вибрации на прогрессирование трещин:  
а – кривая энергии без вибрации; б – кривая энергии при действии вибрации**

Принимая во внимание вышесказанное, целесообразно выделить четыре основных фактора, оказывающих первостепенное действие на процесс разрушения рабочей части пуансона:

- 1) силу, действующую на инструмент (на пуансон);
- 2) температуру нагрева заготовки;

3) производительность оборудования (количество выпуска продукции в единицу времени);

4) уровень вибрация оборудования.

Уточненная математическая модель для прогноза величины износостойкости инструментальной оснастки с учетом четырех факторов позволит более точно определять количество циклов работы инструмента до его предельно возможного разрушения.

Для решения поставленной задачи применены методы планирования эксперимента и регрессионного анализа.

В силу того, что ранее полученная трехфакторная прогнозная модель не в полной мере отражала реальный процесс разрушения рабочих поверхностей пуансонов, ее применение в производственных условиях оказалось невозможным.

Следовательно, сегодня процесс расчета количества требуемого инструмента для выполнения производственного заказа на предприятиях не систематизирован.

Процесс реализации операции полугорячего выдавливания, в ходе которого не применяются прогнозные методы определения износостойкости штамповой оснастки, протекает по следующему алгоритму

1. Подготовительный процесс:

– подготовка заготовки (полуфабриката) к обработке;

– установка конечных параметров готового изделия в соответствии с технологическими условиями на изготовление или принятыми ГОСТ (длина, толщина стенок, диаметры дна и прочее).

2. Непосредственный процесс (обработка заготовки или полуфабриката):

– выбор величин силы, температуры, производительности оборудования и других параметров техпроцесса на основе готового изделия в соответствии с технологическими условиями на изготовление или принятыми ГОСТ;

– монтирование инструментальной оснастки – матриц и пуансонов (матрицы, не являясь ударным инструментом, подвержены разрушению в меньшей степени, поэтому в работе особое внимание уделено пуансонам);

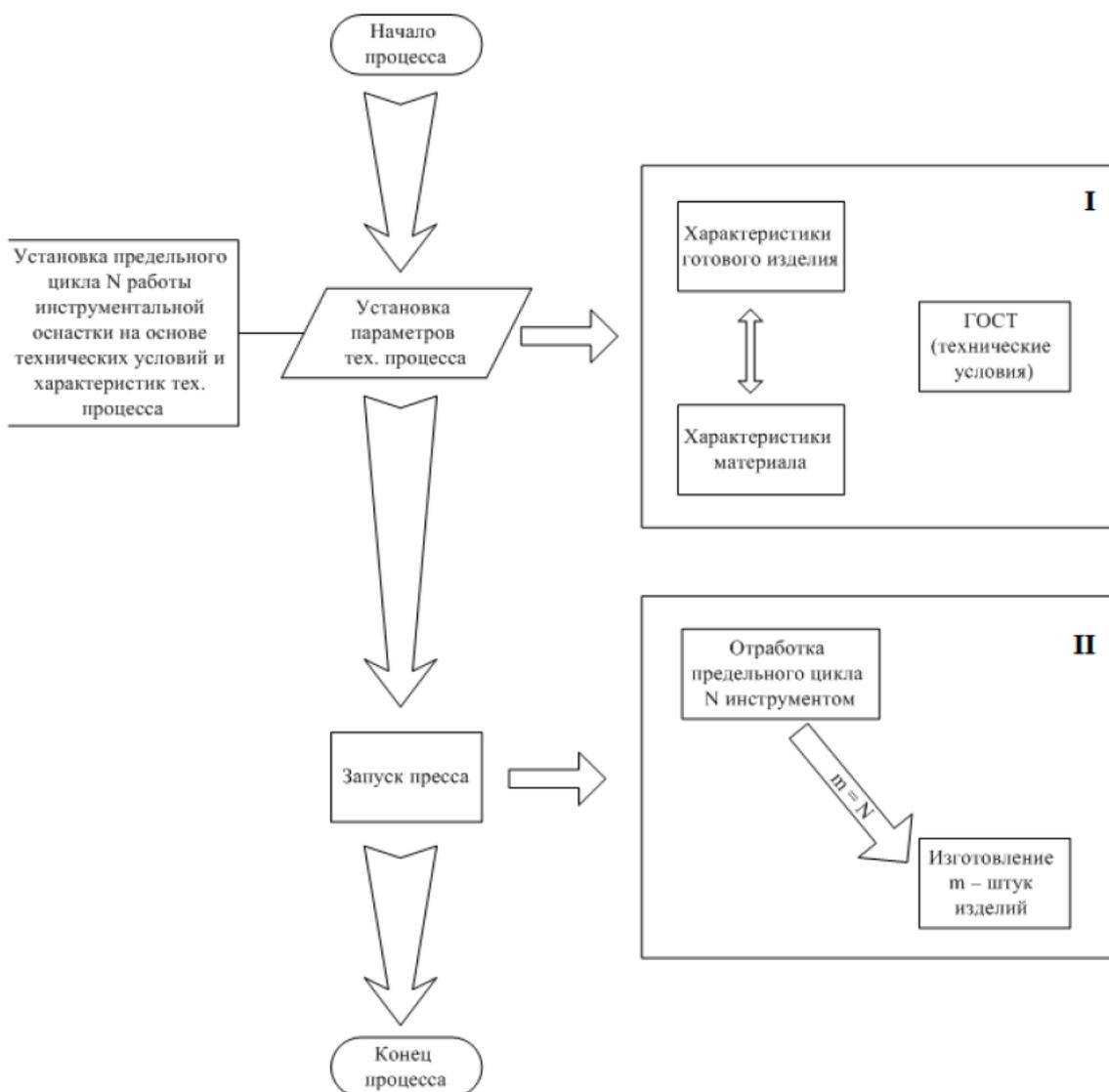
– определение количества пуансонов, необходимых для реализации заданного объема заказа (на базе опыта производства);

– запуск оборудования (изготовление  $m$  штук изделий при  $N$  циклах работы пуансонов).

При отработке пуансоном предельного цикла происходит его смена, и цикл по обработке заготовок повторяется.

При определении количества инструмента, достаточного для выполнения заказа, эта величина может оказаться не оптимальной (не максимальной), что сказывается на сроках окончания работ.

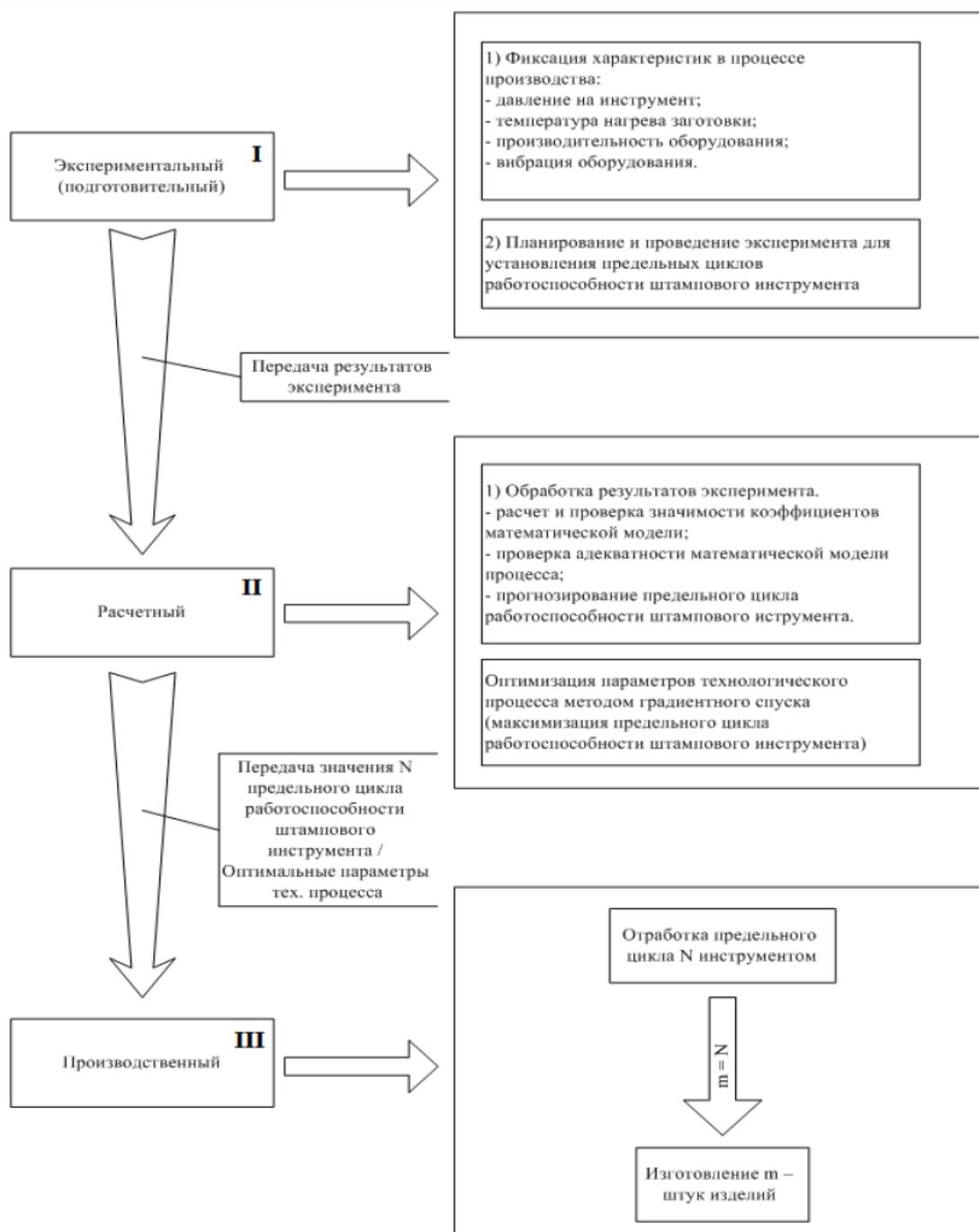
Схема процесса реализации операции полугорячего выдавливания, в ходе которого не применяются прогнозные методы определения износостойкости штамповой оснастки, представлена на рис. 3.



**Рис. 3. Схема процесса реализации операции полугорячего выдавливания, в ходе которого не применяются прогнозные методы определения износостойкости штамповой оснастки**

Как было отмечено выше, определить точное количество штампового инструмента можно путем прогнозирования его износостойкости.

Схема процесса реализации операции полугорячего выдавливания, в ходе которого применены прогнозные методы определения износостойкости штамповой оснастки, представлена на рис. 4.



**Рис. 4. Схема процесса реализации операции полугорячего выдавливания, в ходе которого применены прогнозные методы определения износостойкости штамповой оснастки**

Усовершенствованная схема, представленная на рис. 4, отражает следующие этапы реализации процесса.

1. Экспериментальный (подготовительный):

– фиксируются параметры технологического процесса (сила, действующая на инструмент, температура нагрева заготовки, производительность оборудования, уровень его вибрации);

– в процессе производства, либо в лабораторных условиях на опытной установке планируется и реализуется эксперимент по определению максимально возможной величины износостойкости инструмента при различных параметрах технологического процесса.

2. Расчетный:

– обработка результатов эксперимента (проверка опытов на воспроизводимость, оценка значимости коэффициентов уравнения регрессии);

– формирование математической модели для прогноза износостойкости инструмента и проверка ее адекватности;

– получение прогнозной величины износостойкости штампового инструмента и расчет количества инструмента для выполнения заданного объема заказа.

3. Производственный (подготовительный и непосредственно производственный процесс):

– запуск оборудования;

– своевременная смена инструмента при отработке им заданного количества циклов до разрушения.

Для математического описания исследуемого процесса при исследовании влияния на износостойкость четырех факторов необходимо получить полином вида

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_{ij} X_i + \sum_{i \neq j}^k b_{ij} X_i X_j + \sum_{i \neq 1}^k b_{ij} X_i^2 + \dots, \quad (1)$$

где  $Y$  – функция отклика (износостойкость);  $X_1, X_2, \dots, X_k$  – факторы, влияющие на отклик.

Сбор данных проводился на ООО «Тулльский патронный завод». При производстве различных партий изделий на протяжении длительного срока снимались показатели износостойкости материалов пуансонов при фиксированных значениях силы, температуры в зависимости от различных значений производительности линии и уровне вибрации. На начальном этапе исследовалась инструментальная сталь Р6М5. В ходе эксперимента исследовались значения износостойкости и в «звездных» точках с целью реализации ортогонального композиционного центрального планирования (ОКЦП), применяемого для исследования моделей второго порядка [3].

Основные уровни факторов отвечают за точки центра плана и выбранны на основе априорных сведений об исследуемом процессе. Интервалы варьирования выбраны из учета предела 0,05 – 0,3 от диапазона варьирования исследуемого фактора и возможности расширить диапазоны факторов до значений «звездных» точек (получение модели второго порядка).

В табл. 2 представлены исходные значения факторов в натуральном масштабе и интервалы их варьирования с учетом возможности получения значений в «звездных точках».

Таблица 2

**Исходные значения факторов в натуральном масштабе  
и интервалы их варьирования**

Параметр	Основной уровень	Интервал варьирования
Сила, действующая на инструмент (q, МПа)	900	200
Температура нагрева заготовки (t, °C)	750	50
Производительность (n, мин <sup>-1</sup> )	60	20
Вибрация оборудования (Гц)	50	20

С целью уменьшения влияния случайных возмущений на конечный результат эксперимента были реализованы следующие правила:

- 1) предусмотрено проведение нескольких параллельных опытов при одних и тех же неизменных условиях;
- 2) проведена рандомизация порядка проведения опытов.

При использовании в эксперименте четырех независимых факторов и предположении о том, что исследуемый процесс линеен, тип полного факторного эксперимента соответствует виду  $2^4$ . Тогда на начальном этапе (до получения модели второго порядка) число опытов равно 16.

Обработка результатов эксперимента сводится к получению статистически значимых коэффициентов модели:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4 + b_{123}x_1x_2x_3 + b_{124}x_1x_2x_4 + b_{134}x_1x_3x_4 + b_{234}x_2x_3x_4 + b_{1234}x_1x_2x_3x_4. \quad (2)$$

В случае неадекватности линейной модели, полученной в ходе полного факторного эксперимента, формируется модель второго порядка на базе ОКЦП. В случае четырехфакторного эксперимента общее число опытов при ОКЦП равно 25 [4].

Условие ортогональности матрицы планирования выполняется только для линейных членов полинома 2-го порядка, представляющего собой имитационную математическую модель вида

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4 + b_{123}x_1x_2x_3 + b_{124}x_1x_2x_4 + b_{134}x_1x_3x_4 + b_{234}x_2x_3x_4 + b_{1234}x_1x_2x_3x_4 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{44}x_4^2. \quad (3)$$

Для приведения матрицы планирования к ортогональному виду проведено преобразование квадратичных переменных  $X_{iu\bar{o}}$ <sup>2</sup>:

$$x_{iu\bar{o}n}^2 = X_{iu\bar{o}}^2 - \overline{X_{i\bar{o}}^2} = X_{iu\bar{o}}^2 - \left( \frac{\sum_{u=1}^N X_{iu\bar{o}}^2}{N} \right), \quad (4)$$

где  $x_{iu\bar{o}n}^2$  – безразмерное преобразованное квадратичное значение  $i$ -го фактора, соответствующее  $u$ -му опыту.

Для выполнения условия ортогональности матрицы ОЦКП выбирается величина «звездного» плеча:

$$d = \sqrt{\frac{n\varphi - 2^k}{2}}, \quad (5)$$

$$\varphi = \sqrt{\frac{2^k}{n}}, \quad (6)$$

где  $k$  – количество факторов, участвующих в эксперименте;  $n$  – число опытов в эксперименте (без дублирований).

Для четырехфакторного эксперимента величина «звездного плеча» составляет  $d=0,414$ .

После преобразований имитационная модель ОЦКП будет соответствовать виду

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4 + b_{123}x_1x_2x_3 + b_{124}x_1x_2x_4 + b_{134}x_1x_3x_4 + b_{234}x_2x_3x_4 + b_{1234}x_1x_2x_3x_4 + b_{11}(x_1^2 - \varphi) + b_{22}(x_2^2 - \varphi) + b_{33}(x_3^2 - \varphi) + b_{44}(x_4^2 - \varphi). \quad (7)$$

В табл. 3 представлены значения откликов, полученных в результате ПФЭ.

**Таблица 3**  
**Значения откликов, полученные в результате ПФЭ**

Номер опыта	Серия 1	Серия 2	Серия 3	Среднее значение	Номер опыта	Серия 1	Серия 2	Серия 3	Среднее значение
1	1200	1206	1201	1202,33	9	1206	1209	1204	1206,33
2	1897	1900	1904	1900,33	0	2809	2813	2811	2811
3	1700	1691	1694	1695	1	1798	1800	1801	1799,67
4	2894	2900	2897	2897	2	3700	3702	3705	3702,33
5	1902	1900	1899	1900,33	13	1304	1307	1303	1304,67
6	2999	2996	3001	2998,67	14	3387	3390	3389	3388,67
7	3000	3010	3007	3005,67	15	3001	3010	3008	3006,33
8	3200	3198	3205	3201	16	4002	4010	4007	4006,33

Воспроизводимость опыта подтверждена при помощи критерия Кохрена. Оценка значимости коэффициентов регрессии проведена при помощи нахождения 5 %-ной точки распределения Стьюдента с  $f_u = 2$  степенями свободы.

С учетом значимости коэффициентов регрессии получена следующая линейная математическая модель:

$$Y = 2501,6 - 611,6x_1 - 412,5x_2 - 349,9x_3 - 151,5x_4 - 74,06x_1x_2 - 64,35x_1x_3 + 212,4x_1x_4 + 40,8x_2x_3 + 62,9x_2x_4 - 76,52x_3x_4 + 174,3x_1x_2x_3 + 24,19x_1x_2x_4 - 11,4x_1x_3x_4 + 63,53x_2x_3x_4. \quad (8)$$

Степень влияния факторов на отклик (износостойкость пуансонов) представлена на рис. 5.



**Рис. 5. Степень влияния факторов на износостойкость пуансонов**

Прогнозирование износостойкости пуансонов проводится путем подстановки входных параметров технологического процесса в математическую модель (8).

В табл. 3 представлены значения величины экспериментальной и расчетной износостойкости пуансонов, выполненных из стали Р5М6 и работающие в условиях полугорячего выдавливания, а также результаты вычисления построчных дисперсий при проверке модели на адекватность.

**Таблица 3**

**Результаты эксперимента и моделирования**

Номер опыта	$Y_{\text{эксп}}$	$Y_{\text{расч}}$	$(Y_{\text{эксп}} - Y_{\text{расч}})$	$(Y_{\text{эксп}} - Y_{\text{расч}})^2$
1	1202,33	1200,78	1,55	2,4
2	1900,33	1901,9	-1,57	2,46
3	1695,0	1696,56	-1,56	2,43
4	2897,0	2895,44	1,56	2,43
5	1900,33	1901,9	-1,57	2,46
6	2998,67	2997,1	1,57	2,46
7	3005,67	3004,08	1,59	2,53
8	3201,0	3202,56	-1,56	2,43
9	1206,33	1207,9	-1,57	2,46
10	2811,0	2809,42	1,58	2,5
11	1799,67	1798,12	1,55	2,4
12	3702,33	3703,88	-1,55	2,4
13	1304,67	1303,1	1,57	2,46
14	3388,67	3390,22	-1,55	2,4
15	3006,33	3007,88	-1,55	2,4
16	4006,33	4004,76	1,57	2,46

Адекватность линейной модели с полученными минимальными отклонениями (порядка  $\pm 1,5$  рассчитанного отклика от экспериментального) позволяет говорить о линейном поведении поверхности отклика для стали Р6М5. Однако результаты эксперимента, проводимого для пуансонов, выполненных из других марок сталей, могут указывать на нелинейное поведение поверхности отклик, что повлечет за собой проведение ОКЦП с последующим получением модели второго порядка.

### **Список литературы**

1. Баранов А.Н. Методика экспериментального прогнозирования стойкости пуансонов полугорячего выдавливания: сборник материалов научно-технической конференции «Наука глазами молодых ученых XXI века». Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. С. 57 – 61.

2. Богомоллов П.А. Разработка автоматизированной системы «Вибродиагност»: сборник материалов XII Магистерской конференции. Тула: Изд-во ТулГУ. 2014. С. 12 – 16.

3. Чернова Н.А., Налимов В.В. Статистические методы планирования экспериментов. М.: Наука, 2012. 340 с.

*Баранов Андрей Николаевич, канд. техн. наук, доц., [an111111@mail.ru](mailto:an111111@mail.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

*Баранова Елизавета Михайловна, канд. техн. наук, доц., [elisafine@yandex.ru](mailto:elisafine@yandex.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

*Титоров Александр Игоревич, инженер, [sit138@mail.ru](mailto:sit138@mail.ru), Россия, Тула, ООО «Солид Системс»*

#### **APPLICATION OF METHODS EXPERIMENT PLANNING THE ISSUES OF FORECASTING THE MAGNITUDE OF THE WEAR RESISTANCE OF TOOLING**

*A.N. Baranov, E.M. Baranova, A.I. Titorov*

*The article presents the results of experimental studies of the maximum possible value of resistance of punching tools, namely punches used in the process polygonacea extrusion with obtaining a four factor mathematical predictive models.*

*Key words: wear-resistance, tooling, process operation, squeezing, planning, experiment, prediction, simulation model.*

*Baranov Andrej Nikolaevich, candidate of technical sciences, docent, [an111111@mail.ru](mailto:an111111@mail.ru), Russia, Tula, Tula State University,*

*Baranova Elizaveta Mihajlovna, candidate of technical sciences, docent, [elisafine@yandex.ru](mailto:elisafine@yandex.ru), Russia, Tula, Tula State University,*

*Titorov Aleksandr Igorevich, engineer, [sit138@mail.ru](mailto:sit138@mail.ru), Russia, Tula, LLC «Solid Systems»*

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХПРОЦЕССА С ПОЗИЦИЙ УВЕЛИЧЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТА И МИНИМИЗАЦИИ ЕГО КОЛИЧЕСТВА

А.Н. Баранов, Е.М. Баранова, А.И. Титоров

*Представлены результаты экспериментального определения оптимальных параметров технологической операции полугорячего обратного выдавливания, исходя из максимизации износостойкости производящего штампового инструмента.*

*Ключевые слова: оптимизация, износостойкость, инструментальная оснастка, технологическая операция, выдавливание, градиентный спуск, градиентное восхождение, опыты, эксперимент.*

В теории планирования экспериментальных исследований после постановки факторного эксперимента, результатом которого является уравнение регрессии, описывающее в зависимости от факторов функцию отклика в некоторой ограниченной области факторного пространства, возможны следующие варианты развития событий:

1) если цель эксперимента – построение интерполяционной формулы, то исследование заканчивается на этапе построения адекватной математической модели;

2) если цель эксперимента – оптимизация значимых факторов исследуемого процесса, то адекватная модель, полученная на первом этапе исследования, будет являться исходной для выбора направления движения к области оптимума, и исследование продолжается с применением метода движения по градиенту.

Математическая модель, полученная ранее на этапе постановки полного факторного эксперимента (метод крутого восхождения рассматривается только для линейной функции), представляет собой разложение аналитической функции в ряд Тейлора [2]. При этом коэффициенты регрессии представляют собой частные производные функции отклика по соответствующим факторам:

$$\nabla\varphi = \frac{\partial\varphi}{\partial x_1}i + \frac{\partial\varphi}{\partial x_2}j + \dots + \frac{\partial\varphi}{\partial x_k}k, \quad (1)$$

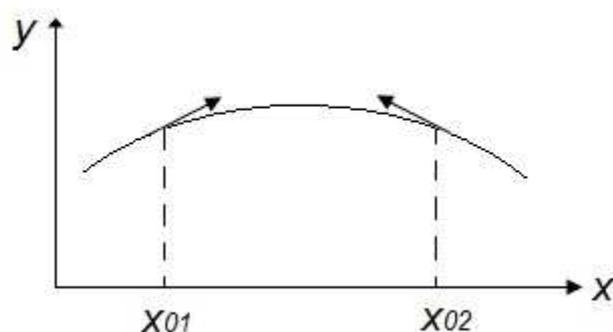
где  $\nabla\varphi$  – обозначение градиента;  $\frac{\partial\varphi}{\partial x_k}$  – частная производная по k-му фактору;  $i, j, k$  – единичные векторы в направлении координатных осей.

Таким образом, если  $i, j, k$  – единичные векторы в направлении координатных осей и коэффициенты уравнения регрессии – частные производные функции отклика, то приращение величины отклика определится так:

$$\nabla y = b_1i + b_2j + \dots + b_kk. \quad (2)$$

Выражение (2) задает кратчайшее направление движения к экстремуму. Очевидно, что, если изменять независимые переменные пропорционально величинам коэффициентов регрессии, то движение будет производиться в направлении градиента функции отклика по самому короткому пути.

Величины составляющих градиента определяются формой поверхности отклика и решениями, которые были приняты при выборе параметра оптимизации, нулевой точки и интервалов варьирования. Знак составляющих градиента зависит только от формы поверхности отклика и положения нулевой точки, как показано на рис. 1.

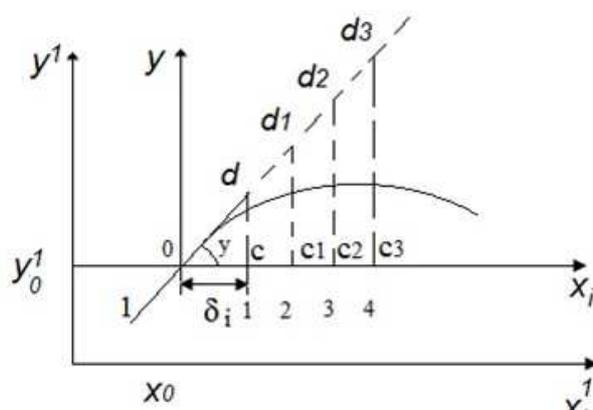


**Рис. 1. Зависимость знака градиента от формы поверхности отклика и положения нулевой точки**

На рис. 1 представлен график движения по градиенту в случае, если на отклик оказывает влияние один фактор. Первая производная в геометрической интерпретации представляет собой угол наклона касательной к кривой. Опираясь на вышесказанное, можно записать

$$b_i = \operatorname{tg} \varphi. \quad (3)$$

Тогда схема движения по градиенту в случае, если на отклик оказывает влияние только один фактор, будет иметь вид, представленный на рис. 2.



**Рис. 2. Схема движения по градиенту при одном факторе**

Значение функции в точках, лежащих на градиенте, можно определить из выражения

$$y_{(d)} = y'_0 + \delta_i tg\varphi. \quad (4)$$

где  $\delta_i$  – интервал варьирования.

Движение по градиенту в каждом конкретном случае представляет собой шаговую операцию, которая продолжается до тех пор, пока не будут получаться результаты «ниже» предыдущих.

Алгоритм отыскания оптимальных факторов и отклика при использовании метода движения по градиенту сводится к определению текущих значений факторов, при которых будут проводиться опыты. Часть опытов может быть проведена мысленно (спрогнозированы) в зависимости от тех результатов опыта, которые реализованы по факту.

Алгоритм отыскания оптимальных факторов и максимального (в данном случае) отклика при использовании метода движения по градиенту представлен в табл. 1.

**Таблица 1**

**Алгоритм отыскания оптимальных факторов и отклика при использовании метода движения по градиенту**

Интервал варьирования и уровни факторов	Фактор $x_1$	...	Фактор $x_k$
Нулевой уровень	$x_{10}$	...	$x_{k0}$
Интервал варьирования $\delta_i$	$\delta_1$	...	$\delta_k$
Коэффициент регрессии $b_i$	$b_1$	...	$b_k$
Значение $b_i\delta_i$	$b_1\delta_1$	...	$b_k\delta_k$
$K_i$	–	...	–
$\delta_i^*$	–	...	–
$\delta_i^*_{окр}$	–	...	–
Реализация опытов (мысленных и фактических)			
Опыты	–	–	–

Первые три строки табл. 1 (нулевой уровень, интервал варьирования и коэффициент регрессии) заполняются сведениями, полученными в ходе линейной аппроксимации функции отклика.

В строке значения  $b_i\delta_i$  осуществляется переход к натуральному масштабу интервалов варьирования, то есть определяется произведение интервала варьирования фактора на соответствующий коэффициент регрессии  $b_i\delta_i$ .

После расчета произведений  $b_i\delta_i$  выбирается фактор, для которого произведение оказывается наибольшим по абсолютной величине, и рассчитывается значение коэффициента пропорциональности

$$K_i = \frac{|b_i\delta_i|}{|b_i\delta_i|_{max}}, \quad (5)$$

где  $|b_i\delta_i|_{max}$  – максимальное значение данного произведения.

Полученным коэффициентам пропорциональности  $K_i$  приписываются знаки, соответствующие коэффициентам регрессии ранее полученной прогнозной модели, и заносятся в соответствующую строку табл. 1.

Для фактора с наибольшим произведением  $|b_i \delta_i|$  выбирается новый интервал варьирования для движения по градиенту. Интервалы для остальных факторов  $\delta_i^*$  получают, умножая величину выбранного интервала варьирования на коэффициент пропорциональности  $K_i$ :

$$\delta_i^* = \delta_{i \text{ выбранное}}^* K_i, \quad (6)$$

где  $\delta_{i \text{ выбранное}}^*$  – выбранное значение нового интервала для фактора, имеющего максимальное значение произведения  $b_i \delta_i$ .

Таким образом, выбор интервала варьирования при движении по градиенту всецело зависит от интуиции исследователя. Строгих правил, определяющих эту процедуру, быть не может, так как прикладной аспект теории планирования эксперимента очень широк. Однако, существует рекомендация, следуя которой выбирать интервал варьирования необходимо таким образом, чтобы при первом движении по градиенту оказаться либо вблизи границы исследования, либо несколько выйти за ее пределы. Если при этом окажется, что существующее оборудование не может обеспечить четкого задания значений некоторых факторов в силу малости получившихся интервалов, то их следует менять через два-три опыта. Для удобства интервалы округляются и записываются в соответствующую строку  $\delta_i^* \text{ окр.}$

После расчетов всех составляющие для реализации метода движения по градиенту, получают условия опытов (значения факторов) путем алгебраического сложения нулевого уровня с рассчитанным интервалом варьирования по каждому фактору.

Последним этапом является постановка мысленных и фактических опытов с последующим экспериментальным определением соответствующих значений функции отклика.

Расчеты, необходимые для реализации опытов с применением метода движения по градиенту, представлены в табл. 2.

Исходными данными для расчетов являлась ранее полученная математическая модель [1]

$$Y = 2501,6 - 611,6x_1 - 412,5x_2 - 349,9x_3 - 151,5x_4 - \\ -74,06x_1x_2 - 64,35x_1x_3 + 212,4x_1x_4 + 40,8x_2x_3 + 62,9x_2x_4 - \\ -76,52x_3x_4 + 174,3x_1x_2x_3 + 24,19x_1x_2x_4 - 11,4x_1x_3x_4 + 63,53x_2x_3x_4. \quad (7)$$

По результатам расчетов, представленных в табл. 2, принят интервал варьирования первого фактора (сила), равный 45 МПа. Перерассчитанные по формуле (6) и округленные интервалы варьирования других факторов записаны в табл. 2 в строке  $\delta_i^* \text{ окр.}$

Выбранный интервал варьирования плохо описывает область эксперимента, так как значения факторов варьируются в слишком малой области, что может привести к тому, что экстремум отклика (наибольшее значение износостойкости) будет находиться за областью эксперимента и его значение не будет выявлено.

Таблица 2

**Расчеты, необходимые для реализации опытов с применением метода движения по градиенту**

Интервал варьирования и уровни факторов	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
Нулевой уровень	900	6	60	50
Интервал варьирования $\delta_i$	200	0	20	20
Коэффициент регрессии $b_i$	-611,56	412,56	-349,85	-151,26
Значение $b_i\delta_i$	-123312	20628	-6997	-3031,2
$K_i$	1	0,17	0,058	0,025
$\delta_i^*$ окр	45	8	3	1
Опыты				
1	900	750	6	50
2	855	742	57	49
3	810	734	54	48
4	765	26	51	47
5	720	18	48	46

Был принят новый интервал варьирования первого фактора, равный 20 МПа. Значения факторов, достаточно широко характеризующие поверхность отклика, представлены в табл. 3.

Полученные значения факторов переданы технологам для постановки опытов и выявления в выбранной области эксперимента величины отклика. Эксперимент реализовывался на базе ОАО «Тульский патронный завод». Фиксировалась износостойкость инструмента на операции полугорячее обратное выдавливание. Исследовалась марка инструментальной стали Р6М5.

После постановки эксперимента в точках, полученных методом движения по градиенту, получены значения откликов, представленные в табл. 4.

Опыты с номерами 4, 6, 8, 14, 16 и 18 – мысленные. Из полученных значений отклика выбирается максимальное, причем интерес представляют собой значения факторов, дающих возможность получить максимальную износостойкость инструмента.

Оптимальные значения факторов процесса полугорячего выдавливания, дающие максимальное значение износостойкости пуансонов полугорячего выдавливания, выполненных из стали Р6М5, представлены в табл. 5.

**Таблица 3**

**Значения факторов, в достаточной степени характеризующих поверхность отклика (для 20 опытов)**

Номер опыта	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
1	900	750	60	50
2	880	747	59	49
3	860	744	58	48
4	840	741	57	47
5	820	738	56	46
6	800	735	55	45
7	780	732	54	44
8	760	729	53	43
9	740	726	52	42
10	720	723	51	41
11	700	720	50	40
12	700	717	49	39
13	700	714	48	38
14	700	711	47	37
15	700	708	46	36
16	700	705	45	35
17	700	702	44	34
18	700	702	43	33
19	700	702	42	32
20	700	702	41	31

**Таблица 4**

**Результаты эксперимента по обнаружению оптимального значения отклика (максимальной износостойкости инструмента полугорячего выдавливания, выполненного из стали Р6М5)**

Номер опыта	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	Y
1	900	750	60	50	2657
2	880	747	59	49	2680
3	860	744	58	48	3046
4	840	741	57	47	3120

Окончание табл. 4

Номер опыта	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	Y
5	820	738	56	46	3154
6	800	735	55	45	3200
7	780	732	54	44	3595
8	760	729	53	43	3701
9	740	726	52	42	3890
10	720	723	51	41	4003
11	700	720	50	40	4218
12	700	717	49	39	4210
13	700	714	48	38	4079
14	700	711	47	37	4070
15	700	708	46	36	4046
16	700	705	45	35	4033
17	700	702	44	34	4029
18	700	702	43	33	4017
19	700	702	42	32	4013
20	700	702	41	31	4013

Таблица 5

**Оптимальные значения факторов процесса полугорячего выдавливания, дающие максимальное значение износостойкости пуансонов (полугорячее выдавливание, марка инструментальной стали Р6М5)**

Сила, МПа	Температура, °C	Производительность, шт./мин	Вибрация, Гц	Износостойкость, кол-во циклов
700	720	50	40	4218

Оптимизация параметров технологического процесса (в данном случае технологической операции полугорячее выдавливание) заключается в приведении исходных параметров процесса к оптимальным, т.е. позволяющим получать максимальное значение износостойкости ударного инструмента – пуансонов. Однако оптимальные значения, получаемые в ходе мысленных опытов, не всегда могут быть установлены фактически, так как имеющееся оборудование может не развить оптимального усилия, а оптимальная температура может выходить за границы, установленные именно для данной технологии.

Следовательно, после того как было выявлено максимальное значение износостойкости и получены оптимальные значения параметров технологической операции, технологами формируются рекомендации по выбору окончательных режимов производственного процесса:

1) каждый, определенный экспериментальным путем оптимальный параметр операции (сила, температура, производительность, уровень вибрации оборудования), сравнивается с диапазоном параметров, установленных ГОСТами или техническими условиями предприятия;

2) если оптимальное значение параметра вписывается в диапазон, то параметр, установленный ГОСТами или техническими условиями, повышают или понижают до оптимального;

3) Если оптимальное значение параметра в диапазон не укладывается, то параметр, установленный ГОСТами или техническими условиями, оставляют на прежнем уровне.

Таким образом, может возникнуть случай, когда часть параметров укладывается в диапазоны, а часть параметров лежит за пределами допустимых значений. В этом случае следует часть параметров оптимизировать, а часть оставить на прежнем уровне. Причем возможны ситуации, когда проведение процесса возможно при оптимальных параметрах даже если они выходят за предельные значения, указанные в ГОСТах или технических условиях (например, когда имеется в наличии новое оборудование, способное развить силу до полученного экспериментальным путем оптимального значения).

Однако следует отметить, что выбор окончательного режима проведения технологической операции – это уникальная процедура в каждом отдельном случае, где и опыт технологов, и результаты эксперимента имеют одинаково важное значение.

Значения параметров технологической операции полугорячего обратного выдавливания (для изготовления изделия А) представлены в табл. 6.

**Таблица 6**

**Значения параметров технологической операции полугорячего обратного выдавливания (для изготовления изделия А)**

Сила, МПа	Температура, °С	Производительность, шт./мин	Вибрация оборудования, не более Гц
700...750	700...780	50	50

Опираясь на значения оптимальных параметров, представленных в табл. 5, была составлена рекомендация по оптимизации параметров исследуемой операции. В рамках рекомендации были установлены следующие значения основных параметров операции:

1. Сила – 700 Мпа.
2. Температура – 720 °С.
3. Производительность – 50 шт./мин (при условии, что сроки завершения работ по производству изделия А не будут нарушены).

#### 4. Вибрация – 40 Гц.

Окончательное решение об оптимизации и изменении необходимых параметров технологического процесса принимается инженерами-технологами, ответственными за производство. Изменение параметров производства должно осуществляться только при условии, что не будут нарушены нормы и правила производства.

Таким образом, применение в ходе экспериментальных исследований метода движения по градиенту позволило получить оптимальные параметры технологического процесса, исходя из максимизации износостойкости штампового ударного инструмента – пуансонов.

Решение вопроса подобным образом позволит точно определять количество циклов работы инструмента и, следовательно, рассчитать его точное количество, достаточное для осуществления заказа в установленные сроки.

Предполагается, что проведение подобного рода экспериментов позволит накопить и систематизировать информацию, что, в свою очередь, приведет к рационализации ведения технологических процессов.

### **Список литературы**

1. Титоров А.И., Баранов А.Н. Применение методов регрессионного анализа при диагностике износостойкости пуансона в процессе полугорячего выдавливания // Региональная научная студенческая конференция «Современные проблемы математики, механики, информатики». Тула, ТулГУ. С. 144 – 145.

2. Титоров А.И., Баранов А.Н., Баранова Е.М. Автоматизированная система по определению прогнозной величины ударного выдавливания в процессе полугорячего выдавливания при изготовлении моноблочных оболочек // III Международная научно-практическая конференция «Техника и технологии». 2015. С. 166 – 167.

3. Чернова Н.А., Налимов В.В. Статистические методы планирования экспериментов. М.: Наука, 2012. 340 с.

*Баранов Андрей Николаевич, канд. техн. наук, доц., [an111111@mail.ru](mailto:an111111@mail.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

*Баранова Елизавета Михайловна, канд. техн. наук, доц., [elisafine@yandex.ru](mailto:elisafine@yandex.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

*Титоров Александр Игоревич, инженер, [sit138@mail.ru](mailto:sit138@mail.ru), Россия, Тула, ООО «Солид Системс»*

OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF TECHNOLOGICAL PROCESS FROM THE  
STANDPOINT OF DECREASING WEAR RESISTANCE OF THE TOOL AND MINIMIZE  
THE NUMBER

A.N. Baranov, E.M. Baranova, A.I. Titorov

*The article presents the results of experimental determination of optimal parameters of technological operations polygonacea backward extrusion on the basis of maximize the wear resistance of the producing punching tools.*

*Key words: optimization, wear-resistance, tooling, process operation, extrude, gradient descent, gradient ascent, experiments, experiment.*

*Baranov Andrej Nikolaevich, candidate of technical sciences, docent, [an111111@mail.ru](mailto:an111111@mail.ru), Russia, Tula, Tula State University,*

*Baranova Elizaveta Mihajlovna, candidate of technical sciences, docent, [elisa-fine@yandex.ru](mailto:elisa-fine@yandex.ru), Russia, Tula, Tula State University,*

*Titorov Aleksandr Igorevich, engineer, [sit138@mail.ru](mailto:sit138@mail.ru), Russia, Tula, LLC «Solid Systems»*

УДК 531.8

**О ЧИСЛЕННОМ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ  
В ИНЖЕНЕРНОЙ ПРАКТИКЕ**

Л.А. Белая, И.М. Лавит

*Рассматривается компьютерное моделирование механических процессов – важная составная часть проектирования машин и аппаратов. Сложившаяся в последние десятилетия практика предполагает применение универсальных пакетов программ, предназначенных для решения широкого класса задач. Сложность использования этих пакетов иногда приводит к серьезным ошибкам в расчетах. Предлагается иной подход, суть которого в создании узконаправленных программ, ориентированных на типичные конструкции, разрабатываемые конкретным предприятием. Эксплуатация этих программ проста и не может быть источником ошибок. Приводится пример такой программы, реализующей прочностной расчет оболочки вращения.*

*Ключевые слова: проектирование, моделирование, численные методы, прочность, оболочка вращения.*

**1. Введение.** Эффективное решение задач проектирования всегда включает в себя математическое моделирование тех или иных процессов, использующее методы механики, термодинамики и т. п. Математические модели получаются подчас весьма сложными. В докомпьютерную эпоху был возможен только один путь – упрощение модели до тех пор, пока

не удавалось получить аналитическое решение. При этом, однако, терялась точность моделирования, а иногда даже получались качественно неверные результаты.

В наше время математические модели, даже очень сложные, не нуждаются в упрощениях, так как разработаны надежные численные методы, позволяющие решать с использованием компьютера системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, моделировать ударные волны, турбулентность и др. Однако, применение этих методов к решению конкретных задач, то есть создание компьютерных программ, требует высокой научной квалификации. Поэтому инженерные предприятия вынуждены обращаться к рынку научной продукции. Там им предлагаются пакеты программ, способные, по мнению разработчиков, решать практически любую задачу. Это утверждение подкрепляется решением тестовых задач – простейших задач, легко решаемых аналитически. После покупки пакета инженеры-пользователи остаются один на один с трудностями, которых не было при решении тестовых задач, но которые всегда возникают при решении задач сложных. Из этого не следует, конечно, что упомянутые пакеты непригодны для инженерной практики. Но использовать их без риска серьезно ошибиться может только опытный специалист, хорошо разбирающийся и в создании математических моделей, и в используемых в том или ином пакете математических методах. Наличие или отсутствие таких специалистов означает серьезное влияние человеческого фактора на результат инженерных исследований, что недопустимо.

Поясним сказанное на примере прочностных расчетов. Как правило, расчет более 90% деталей можно выполнить, основываясь на расчетных схемах стержня, пластинки или оболочки. Конечно, всегда есть концентраторы напряжений: какие-либо отверстия, места крепления. Обычный подход заключается в двухэтапном расчете. На первом этапе рассчитываются так называемые номинальные напряжения по схемам без концентраторов напряжений. Второй этап – расчет влияния концентратора как возмущения в номинальном поле напряжений. Этот этап, как правило, не требует применения численных методов: достаточно обратиться к справочной литературе.

Реализовать такой двухэтапный расчет, используя универсальный пакет, и сложно, и долго. Да и зачем, если можно все рассчитать сразу, за один этап, задавая геометрию конструкции со всеми ее сложностями и формулируя задачу тем самым как трехмерную? Обычно так и поступают, и в этом – источник ошибок. Получаемые результаты – напряжения в зонах их концентрации – могут отличаться от правильных результатов в разы. Это объясняется тем, что используемый численный метод (а это, как правило, метод конечных элементов [1, 2]) решает задачу в перемещениях. Относительная погрешность решения оценивается по суммарному вкладу всех узлов расчетной сетки, из которых лишь небольшая часть попадает в

зону концентрации напряжений. Поэтому даже при малой общей погрешности решения погрешность в зоне больших градиентов перемещений – зоне концентрации напряжений может быть велика. Это один источник ошибок. Другой заключается в том, что напряжения – это результат дифференцирования перемещений, и, следовательно [3], даже небольшие ошибки в вычислении перемещений могут серьезно снизить точность определения напряжений.

Наряду с указанными объективными источниками ошибок появляются и субъективные, ибо, чем сложнее конструкция, тем сложнее и неоднозначней становится процесс задания граничных условий.

В качестве альтернативы универсальным пакетам предлагается подход, учитывающий специфику конструкторских задач того или иного предприятия. Основных программ, рассчитывающих номинальные напряжения, оказывается совсем немного. Если при этом они будут снабжены похожими интерфейсами, понятными инструкциями по вводу исходных данных и анализу результатов расчета, польза от их внедрения с лихвой окупит расходы на их разработку.

Ниже представлен алгоритм вычислений типичной такой программы, позволяющей рассчитать напряженное состояние и определить запас прочности оболочки вращения переменной толщины, нагруженной внутренним давлением. Такая задача с точки зрения фундаментальной науки не обладает научной новизной: и уравнения математической модели [4], и численные методы их решения [1, 2] известны. Но получение решения этими методами отнюдь не тривиально. Это задача прикладной науки. Решение такой задачи – компьютерная программа, удобная для применения в инженерной практике.

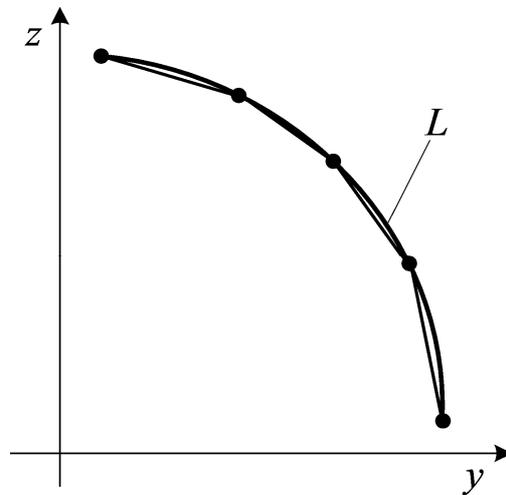
**2. Алгоритм расчета напряженного состояния оболочки вращения.** Рассматривается статическое осесимметричное нагружение осесимметричной изотропной упругой оболочки. Срединная поверхность оболочки образована вращением некоторой непрерывной непересекающейся линии  $L$  вокруг оси аппликат (рис. 1).

Положение точек линии  $L$  определяется цилиндрическими координатами  $r, \varphi, z$ , где

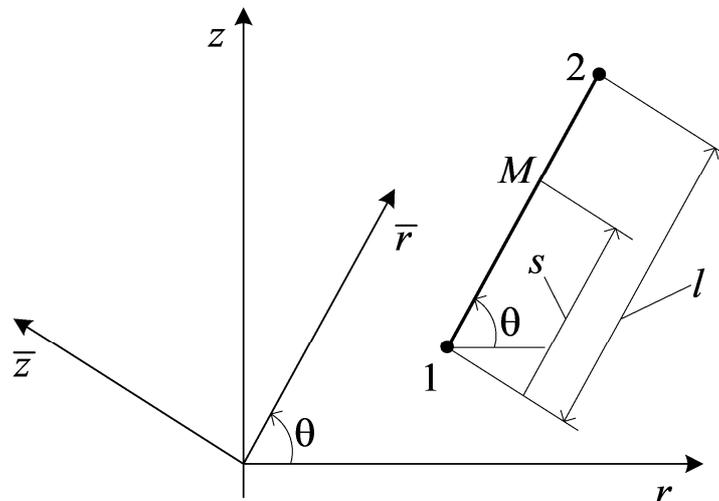
$$x = r \cos \varphi; \quad y = r \sin \varphi.$$

В силу осевой симметрии задачи достаточно двух координат:  $r$  и  $z$ . При численном решении контур  $L$  аппроксимируется ломаной (рис. 1). Исходная оболочка рассматривается как совокупность последовательно соединенных конических оболочек – конечных элементов, вследствие чего для решения задачи необходимы лишь формулы, описывающие деформирование конической оболочки (рис. 2). Пусть  $M$  – произвольная точка образующей конечного элемента, отстоящая от узла 1 на расстоянии  $s$ . Ее координаты определяются формулами

$$\begin{cases} r = r_1 + s \cos \theta \\ z = z_1 + s \sin \theta \end{cases}$$



**Рис. 1.** Образующая срединной поверхности оболочки (на плоскости  $x = 0$ ) и ее конечно-элементная аппроксимация



**Рис. 2.** Образующая конечного элемента: 1, 2 – номера начального и конечного узлов

Введем систему координат  $\bar{r}, \bar{z}$ , связанную с конечным элементом (рис. 2). Перемещение точки  $M$  под нагрузкой складывается из перемещения  $\bar{u}(s)$  вдоль образующей и перемещения  $\bar{w}(s)$  перпендикулярно образующей. Деформации в любой точке конечного элемента определяются, согласно гипотезам Кирхгофа-Лява, формулами [4]

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{s0} + \zeta \kappa_s; \quad \varepsilon_\varphi = \varepsilon_{\varphi0} + \zeta \kappa_\varphi,$$

где  $\varepsilon_{s_0}, \varepsilon_{\varphi_0}$  – меридиональная и окружная деформации срединной поверхности;  $\kappa_s, \kappa_\varphi$  – приращения главных кривизн;  $\zeta \in [-h/2; h/2]$  – координата, определяющая положение точки по нормали к срединной поверхности;  $h$  – толщина оболочки (вообще говоря, переменная). Для конической оболочки справедливы соотношения [4]

$$\varepsilon_{s_0} = \frac{d\bar{u}}{ds}; \quad \varepsilon_{\varphi_0} = \frac{1}{r}(\bar{u} \cos \theta - \bar{w} \sin \theta); \quad \kappa_s = -\frac{d^2\bar{w}}{ds^2}; \quad \kappa_\varphi = -\frac{1}{r} \frac{d\bar{w}}{ds} \cos \theta.$$

Меридиональное и окружное напряжения определяются формулами [4]

$$\sigma_s = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_s + \nu\varepsilon_\varphi); \quad \sigma_\varphi = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_\varphi + \nu\varepsilon_s),$$

где  $E$  – модуль Юнга;  $\nu$  – коэффициент Пуассона. Вариационное уравнение задачи (для одного элемента) имеет вид [1]

$$\int_V (\sigma_s \delta\varepsilon_s + \sigma_\varphi \delta\varepsilon_\varphi) dV = \int_S (p_\tau \delta\bar{u} + p_n \delta\bar{w}) dS, \quad (1)$$

где  $V$  – объем элемента;  $S$  – его поверхность, к которой приложена распределенная нагрузка;  $p_\tau, p_n$  – касательная и нормальная составляющая нагрузки. Будем рассматривать только один вид нагрузки – внутреннее давление  $p$ . При этом получается

$$p_\tau = 0; \quad p_n = -p.$$

Цель дальнейших преобразований – сведение континуальной задачи к дискретной. Деформирование каждого конечного элемента определяется узловыми неизвестными: перемещениями  $\bar{U}_k$  и  $\bar{W}_k$ , а также углом поворота  $\Phi_k$ , где  $k = 1, 2$  – номер узла. Введем в рассмотрение новую переменную  $\eta$ , интерполяционные полиномы Лагранжа  $L_k(\eta)$  и Эрмита  $H_k(\eta), G_k(\eta)$ :

$$\eta \in [-1; 1]; \quad s = \frac{l}{2}(1 + \eta); \quad L_1 = \frac{1}{2}(1 - \eta); \quad L_2 = \frac{1}{2}(1 + \eta);$$

$$H_1 = \frac{1}{4}(2 - 3\eta + \eta^3); \quad H_2 = \frac{1}{4}(2 + 3\eta - \eta^3);$$

$$G_1 = \frac{1}{4}(1 - \eta - \eta^2 + \eta^3); \quad G_2 = \frac{1}{4}(-1 - \eta + \eta^2 + \eta^3)$$

Перемещения точки  $M$  (см. выше) представляются в виде [1, 2]:

$$\bar{u} = L_k(\eta)\bar{U}_k; \quad \bar{w} = H_k(\eta)\bar{W}_k + \frac{l}{2}G_k(\eta)\Phi_k,$$

где по повторяющемуся индексу производится суммирование от 1 до 2.

Теперь можно выполнить интегрирование в уравнении (1). Опуская громоздкие промежуточные преобразования, запишем конечный результат

$$\mathbf{V}^T \mathbf{D} \delta \mathbf{V} = \mathbf{G}^T \delta \mathbf{V}, \quad (2)$$

где индекс  $T$  обозначает транспонирование матрицы и введены следующие обозначения

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} \bar{U}_1 \\ \bar{W}_1 \\ \Phi_1 \\ \bar{U}_2 \\ \bar{W}_2 \\ \Phi_2 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{D} = l \int_{-1}^1 \mathbf{N}^T \mathbf{E} \mathbf{N} r d\eta; \quad \mathbf{G} = -\frac{p(1-\nu^2)l}{E} \int_{-1}^1 \mathbf{C} r d\eta; \quad \mathbf{C} = \begin{pmatrix} 0 \\ H_1 \\ \frac{l}{2} G_1 \\ 0 \\ H_2 \\ \frac{l}{2} G_2 \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{N} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{l} & 0 & 0 & \frac{1}{l} & 0 & 0 \\ \frac{\cos\theta}{r} L_1 & -\frac{\sin\theta}{r} H_1 & -\frac{l \sin\theta}{2r} G_1 & \frac{\cos\theta}{r} L_2 & -\frac{\sin\theta}{r} H_2 & -\frac{l \sin\theta}{2r} G_2 \\ 0 & -\frac{4}{l^2} H_1'' & -\frac{2}{l} G_1'' & 0 & -\frac{4}{l^2} H_2'' & -\frac{2}{l} G_2'' \\ 0 & -\frac{2 \cos\theta}{lr} H_1' & -\frac{2 \cos\theta}{r} G_1' & 0 & -\frac{2 \cos\theta}{lr} H_2' & -\frac{2 \cos\theta}{r} G_2' \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} h & h\nu & 0 & 0 \\ h\nu & h & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{h^3}{12} & \frac{h^3\nu}{12} \\ 0 & 0 & \frac{h^3\nu}{12} & \frac{h^3}{12} \end{pmatrix}$$

Интегрирование выполняется численно методом Гаусса [3].

Далее необходимо преобразовать узловые перемещения, определенные в локальной, элементной системе координат  $\bar{r}, \bar{z}$ , к определенным в глобальной системе координат  $r, z$  (рис. 2). Введем в рассмотрение матрицу-столбец этих перемещений  $\mathbf{T}$  и матрицу поворота  $\mathbf{R}$ :

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} U_1 \\ W_1 \\ \Phi_1 \\ U_2 \\ W_2 \\ \Phi_2 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{V} = \mathbf{R}\mathbf{T}.$$

При этом уравнение (2) преобразуется к виду

$$\mathbf{T}^T \mathbf{S} \delta \mathbf{T} = \mathbf{K}^T \delta \mathbf{T},$$

где обозначено

$$\mathbf{S} = \mathbf{R}^T \mathbf{D} \mathbf{R}; \quad \mathbf{K} = \mathbf{R}^T \mathbf{G}.$$

Далее вклады всех конечных элементов суммируются, при этом локальная нумерация узловых неизвестных заменяется глобальной. Условие произвольности вариаций узловых неизвестных приводит к системе линейных уравнений

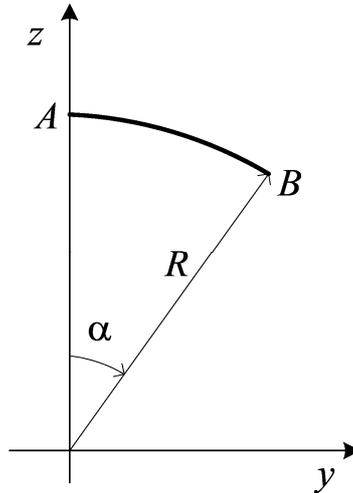
$$\mathbf{A} \mathbf{X} = \mathbf{B},$$

где  $\mathbf{X}$  – матрица-столбец узловых неизвестных в глобальной нумерации. Граничные условия – шарнирное опирание или заделка – учитываются следующим образом [1]: обнуляются соответствующие строка и столбец матрицы  $\mathbf{A}$  (за исключением диагонального элемента), а также соответствующий элемент матрицы  $\mathbf{B}$ . При решении системы уравнений используются известные свойства матрицы  $\mathbf{A}$ : она симметрическая, положительно определенная, ленточная; ширина ленты равна, как это следует из рис. 2, девяти. Порядок системы уравнений равен  $3(n+1)$ , где  $n$  – число конечных элементов.

Важный вопрос при проведении инженерных расчетов – это задание геометрических параметров оболочки и разбиение образующей на конечные элементы. Анализ конструкций показывает, что осесимметричные оболочки, применяемые в технике, состоят из участков, каждый из которых является либо цилиндрической оболочкой, либо конической, либо сферической, либо тороидальной. Образующие первых двух типов оболочек – прямые, вторых двух – части окружностей. Их разбиение на конечные элементы (равномерное или неравномерное по какому-либо закону) не составляет труда. Можно также задать закон изменения толщины.

Приведенный алгоритм представляет собой характерный пример отличия численного решения от аналитического. Результатом последнего, каким бы сложным оно ни было, является формула, которую легко использовать в инженерных расчетах. Численное решение – это алгоритм вычислений и численное решение инженерной задачи, что далеко не одно и то же, и переход от одного к другому представляет собой вполне достойную задачу прикладной науки.

**3. Примеры расчетов.** Рассмотрим вначале решение тестовой задачи. Сферическая оболочка (рис. 3), защемленная по параллели  $B$ , нагружена внешним давлением  $p$ . Сформулируем граничные условия задачи. В точке  $A$  образующей задаются условия симметрии:  $U = 0; \Phi = 0$ , в точке  $B$  – условия защемления:  $U = 0; W = 0; \Phi = 0$ .



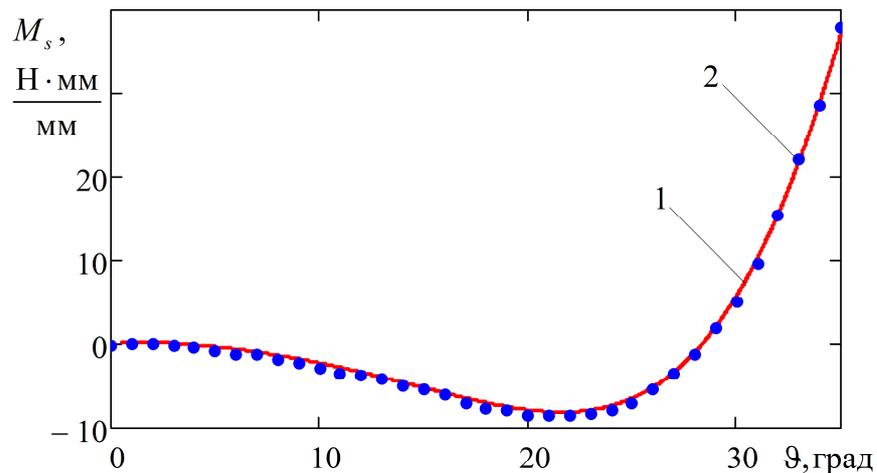
**Рис. 3. Образующая срединной поверхности сферической оболочки (на плоскости  $x = 0$ ) – часть окружности**

Расчет проводился при следующих исходных данных [2]:  $R = 91,5 \text{ мм}$ ;  $h = 3 \text{ мм}$ ;  $p = 1 \text{ Н/мм}^2$ ;  $\alpha = 35^\circ$ ;  $\nu = 0,2$ . На рис. 4 представлены результаты расчета при  $n = 1000$  (относительная погрешность расчета составляет при этом менее  $10^{-3}$ ) меридионального изгибающего момента в зависимости от угловой координаты  $\vartheta \in [0; \alpha]$ :

$$M_s = (\sigma_{s2} - \sigma_{s1}) \frac{h^2}{12},$$

где  $\sigma_{s1}$  – значение  $\sigma_s$  при  $\zeta = -h/2$ ;  $\sigma_{s2}$  – значение  $\sigma_s$  при  $\zeta = h/2$ .

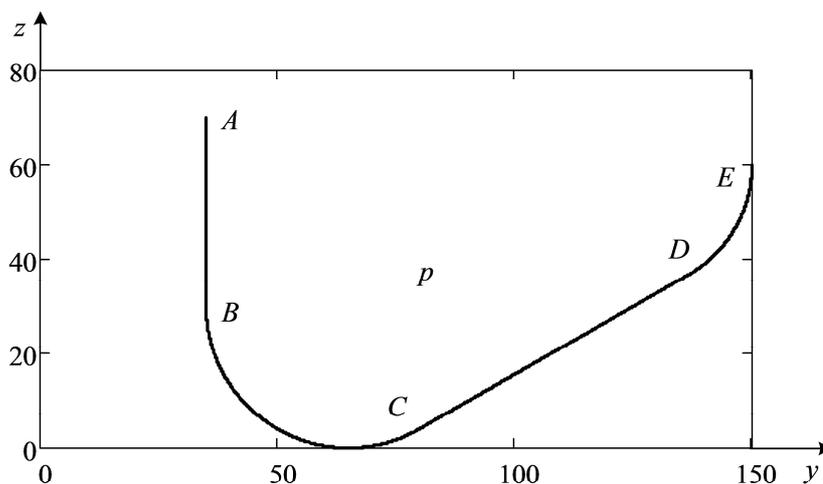
Графики, приведенные на рис. 4, свидетельствуют о достоверности результатов, получаемых изложенным методом. Этот вывод подтверждают и решения других тестовых задач.



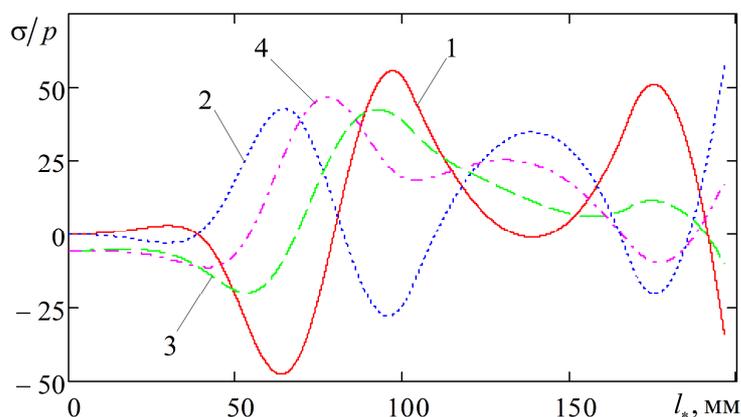
**Рис. 4. Зависимость  $M_s(\vartheta)$ : 1 – результаты расчета разработанным методом; 2 – данные работы [2]**

Рассмотрим теперь второй пример: решение задачи, поставленной инженерной практикой. Оболочка, образующая которой изображена на рис. 5, нагружена давлением  $p$  и заземлена по параллели  $E$ .

Оболочка состоит из четырех участков. Участок  $AB$  представляет собой цилиндрическую оболочку, участок  $BC$  – тороидальную, участок  $CD$  – коническую и  $DE$  – тороидальную. Коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ ; количество конечных элементов  $n = 4000$ . Толщина оболочки постоянна и равна 6 мм.



**Рис. 5. Образующая срединной поверхности оболочки (на плоскости  $x = 0$ ): размеры по обеим осям даны в мм**



**Рис. 6. Графики напряжений по длине образующей срединной поверхности оболочки: 1 – меридиональное напряжение  $\sigma_s$  при  $\zeta = -h/2$ ; 2 – меридиональное напряжение  $\sigma_s$  при  $\zeta = h/2$ ; 3 – окружное напряжение  $\sigma_\varphi$  при  $\zeta = -h/2$ ; 4 – окружное напряжение  $\sigma_\varphi$  при  $\zeta = h/2$**

На рис. 6 представлены результаты расчета напряжений на обеих поверхностях оболочки в зависимости от текущей длины образующей  $l_*$ , отсчитываемой от точки А (рис. 5).

Расчитанные значения напряжений могут быть непосредственно использованы в прочностном расчете, основанном на той или иной теории прочности, или рассматриваться как номинальные напряжения при наличии концентраторов напряжений.

**4. Заключение.** Как следует из описания алгоритма и примеров расчета осесимметричной оболочки, применение на практике изложенного метода требует и знания основ теории оболочек [4], и умения составлять расчетные схемы, то есть идеализировать конструкцию и нагрузку, отбрасывая второстепенные факторы. Есть еще несложная работа по подготовке исходных данных. А эффективная, то есть, прежде всего, безошибочная работа с универсальными пакетами предполагает не просто большой, а гораздо больший объем знаний и навыков. Универсальные пакеты сложны в эксплуатации в силу своей универсальности. Эффективное же использование основано на принципе «одна задача – одна программа». При этом, конечно, желательна максимальная близость интерфейсов программ и процедур подготовки исходных данных.

### **Список литературы**

1. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 541 с.
2. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The finite element method. V. 2. Solid mechanics. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. 463 p.
3. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. М.: Бином, 2003. 630 с.
4. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. М.: Наука, 1966. 625 с.

*Белая Лилия Александровна, канд. техн. наук, доц., [bliliy@yandex.ru](mailto:bliliy@yandex.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

*Лавит Игорь Михайлович, д-р физ.-мат. наук, проф., [IgorLavit@yandex.ru](mailto:IgorLavit@yandex.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет*

*ON THE NUMERICAL SOLUTION OF APPLIED MECHANICS PROBLEMS IN  
ENGINEERING*

*L.A. Belaya, I.M. Lavit*

*The computer modelling of mechanical processes is considered. It is significant component of designing of machinery and devices. Formed in latest ten years, practice supposes use of universal program packages that destine for solution of extensive class of problems. The complexity of use of these packages leads sometimes to serious mistakes in calculations. Other approach is proposed. Its essence is the creation of targeting computer programs that oriented to typical structural systems of concrete enterprise. The use of these programs is simple and cannot be source of errors. The example of this program that intends for strength analysis of shell of revolution is considered.*

*Key words: designing, modelling, numerical methods, strength, shell of revolution.*

*Belaya Liliya Alexandrovna, candidate of technical sciences, docent, [bliliy@yandex.ru](mailto:bliliy@yandex.ru), Russia, Tula, Tula State University,*

*Lavit Igor Mihailovich, doctor of physics and mathematics sciences, professor, [Igor-Lavit@yandex.ru](mailto:Igor-Lavit@yandex.ru), Russia, Tula, Tula State University*

УДК 608.3

## **ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ПАТЕНТНОГО ПОИСКА**

С.Ю. Борзенкова, И.А. Шкиря

*Разработан программный комплекс для хранения патентов, проведения патентного поиска по различным критериям и его анализа. Данный программный комплекс содержит базу данных, разработанной на основе системы управления базами данных Microsoft Office Access. Разработанный программный комплекс позволяет представить результаты патентного поиска в виде текстового и графического представлений информации.*

*Ключевые слова: программный комплекс, патентный поиск, база данных.*

В настоящее время наблюдается стремительное развитие новых объектов техники и технологий. При этом при их создании необходимо учитывать уровень техники и обеспечивать их патентную чистоту. Количество выданных патентов с каждым годом стремительно растет. Так, например, в Китае в среднем за год выдается более 1,5 млн патентов на изобретения и полезные модели, в США более 1 млн, в России более 50 тыс., а в мире в целом более 3 млн. Ввиду этого появляется необходимость хранения и возможности проведения анализа всех ранее выданных патентов.

Существует несколько информационных систем для хранения патентов и проведения патентного поиска. Патентный поиск предполагает поиск патентов по заданным критериям. Патентное ведомство практически каждой экономически развитой страны мира имеет свои информационные ресурсы для хранения патентов. Самые широко используемые в России - «Роспатент» и «PATENTSCOPE», однако данные информационные системы при большом их функционале имеют существенные недостатки для рядового пользователя. Бесплатная версия этих систем имеет существенно ограниченный функционал и не имеет блока хранения и анализа найденных в результате проведенного патентного поиска патентов. Также для работы с указанными системами необходимо подключение к сети Интернет, что, в свою очередь, не всегда возможно осуществить. Данный недостаток особенно актуален для оборонной отрасли.

С целью повышения эффективности проведения патентного поиска пользователем и работы с патентами, а именно просмотра, сохранения, систематизации их как в условиях ограниченности доступа к сети Интернет, так и при пользовании бесплатными базами данных был создан программный комплекс патентного поиска. Так как программа является локальной, то есть для работоспособности не требуется подключение к сети Интернет, в ней может присутствовать информация, отсутствующая в патентах, например, подразделение в котором работает автор, что позволяет проводить более подробную аналитику по предприятию.

Программный комплекс написан в IDE RAD Studio XE8 на высокоуровневом языке программирования Delphi, состоит из нескольких модулей, а именно: «Поиск», «Международная патентная классификация» (МПК), «Настройки», «Статистика». Его основной отличительной особенностью по отношению к ранее рассмотренным является вложенная база данных, организованная на Microsoft Office Access. Все составляющие базы данных находятся в одном файле с расширением \*.mdb, что упрощает работу с ними. Главными элементами базы данных являются ключевые поля, такие, как номер патента, наименование, дата регистрации, МПК, авторы. Программа подключается к базе данных, создает запрос по заданным критериям, затем считывает данные, которые она получила, и выводит на специальное поле.

Каждый модуль предназначен для решения отдельной задачи.

Модуль «Поиск» предназначен для поиска по уже имеющимся патентам, помещенным в базу данных, для этого создается запрос, и из базы данных выводится информация, которая удовлетворяет условиям запроса. Поиск можно проводить по нескольким полям по названию патента, по его номеру, по автору и т.д. Сбросить условия поиска можно кнопкой «Все». После поиска поле «Список патентов» обновляется и выводит патенты, удовлетворяющие поиску (рис. 1).

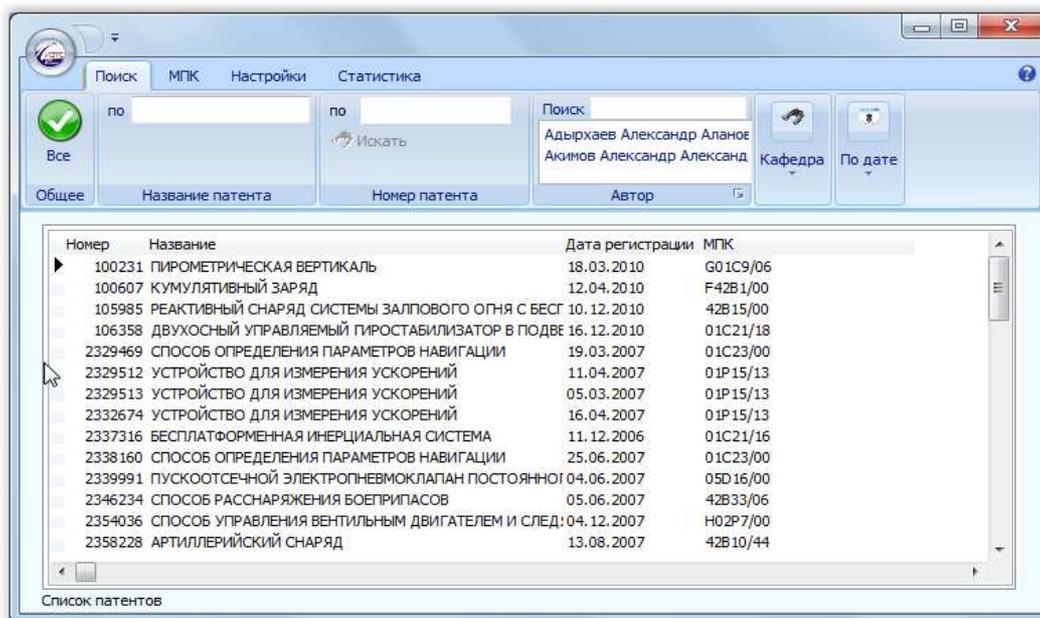


Рис. 1. Модуль «Поиск»

При двойном нажатии на патент появится дополнительное окно, в котором будет выведена страница патента (рис. 2). Страницы патентов сохранены на диске в виде HTML-страниц.



Рис. 2. Страница патента

Модуль «Статистика» предназначен для визуального представления результатов. Данный модуль имеет функции по построению гистограмм и таблиц. Гистограмму можно построить по выбранным критериям. В этом случае создается массив данных, по которому программа строит гистограмму. Пример гистограммы, построенной по авторам и выданным им патентам за определенное время, представлен на рис. 3.

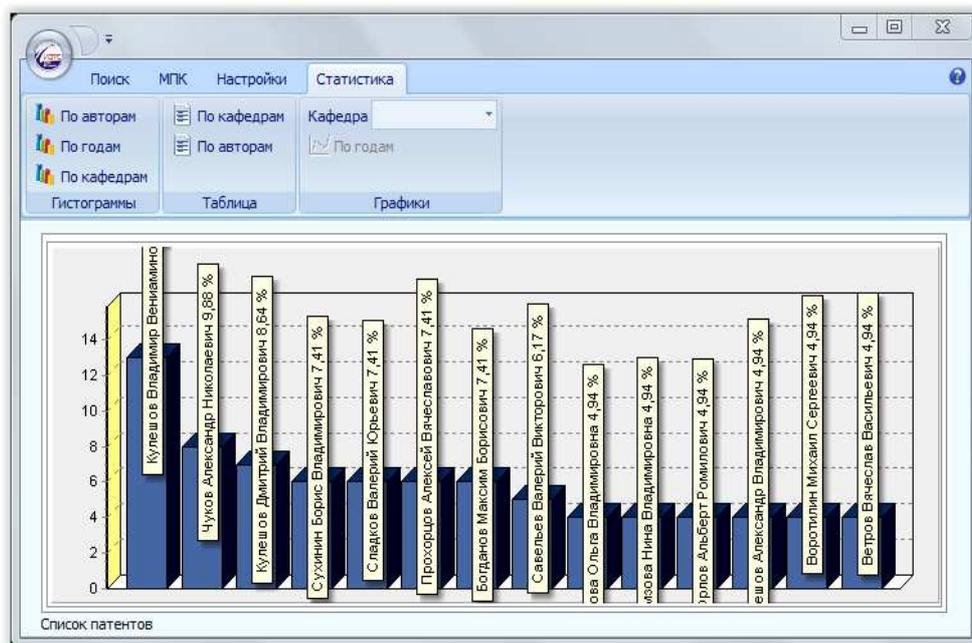


Рис. 3. Гистограмма, построенная по авторам

Таблицы строятся по аналогичной схеме, однако в них информация представлена не в виде визуальных объектов, а в виде текста. В таблицы вводятся такие данные, как персональные данные автора и количество выданных ему патентов за определенный промежуток времени. Пример таблицы представлен на рис. 4.

Модуль настройки позволяет пользователю выбирать и подстраивать под себя интерфейс программного комплекса. Интерфейс может быть выполнен в трех цветовых гаммах: синей, черной, серой.

Автор	Количество патентов
Кулешов Владимир Вениаминович	13
Чуков Александр Николаевич	8
Кулешов Дмитрий Владимирович	7
Богданов Максим Борисович	6
Прохорцов Алексей Вячеславович	6
Сладков Валерий Юрьевич	6
Сухинин Борис Владимирович	6
Савельев Валерий Викторович	5
Ветров Вячеслав Васильевич	4
Воротилин Михаил Сергеевич	4
Кулешов Александр Владимирович	4
Орлов Альберт Ромилович	4
Рамзова Нина Владимировна	4

Рис. 4. Таблица «Автор-Патент»

Таким образом, программный комплекс позволяет хранить патенты, проводить анализ патентного поиска в условиях ограниченного доступа к сети Интернет, а также не требует от рядовых пользователей покупки платной версии «Роспатент» для работы с патентами.

### **Список литературы**

1. Токарев В.Л. Основы теории обеспечения рациональности решений: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2000.

2. Алешичева Л.И., Дехтяр Д.А., Троицкий А.Н. Обучающий модуль локальной базы данных патентов на изобретения и полезные модели // Сборник статей III Всероссийской научно-методической конференции «Методы обучения и организация учебного процесса в вузе». Рязань: Редакционно-издательский центр РГРТУ, 2013. С. 225 – 227.

*Шкиря Иван Андреевич, студент, [shkirya.v@yandex.ru](mailto:shkirya.v@yandex.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

*Борзенкова Светлана Юрьевна, канд. техн. наук, доц., [tehnol@rambler.ru](mailto:tehnol@rambler.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет*

#### *PATENT SEARCH SOFTWARE*

*S.Y. Borzenkova, I.A. Shkirya*

*A software package for the analysis of patent search under the conditions of limited access to the Internet, created on the basis of Microsoft Office Access database. The developed software package makes it possible not only to analyze the patent search in the form of text information, but also in the form of graphical representations.*

*Key words: software complex, patent search database.*

*Borzenkova Svetlana Yurievna, candidate of technical sciences, docent, [tppzi@tsu.tula.ru](mailto:tppzi@tsu.tula.ru), Russia, Tula, Tula State University,*

*Shkirya Ivan Andreevich, student, [shkirya.v@yandex.ru](mailto:shkirya.v@yandex.ru), Russia, Tula, Tula State University*

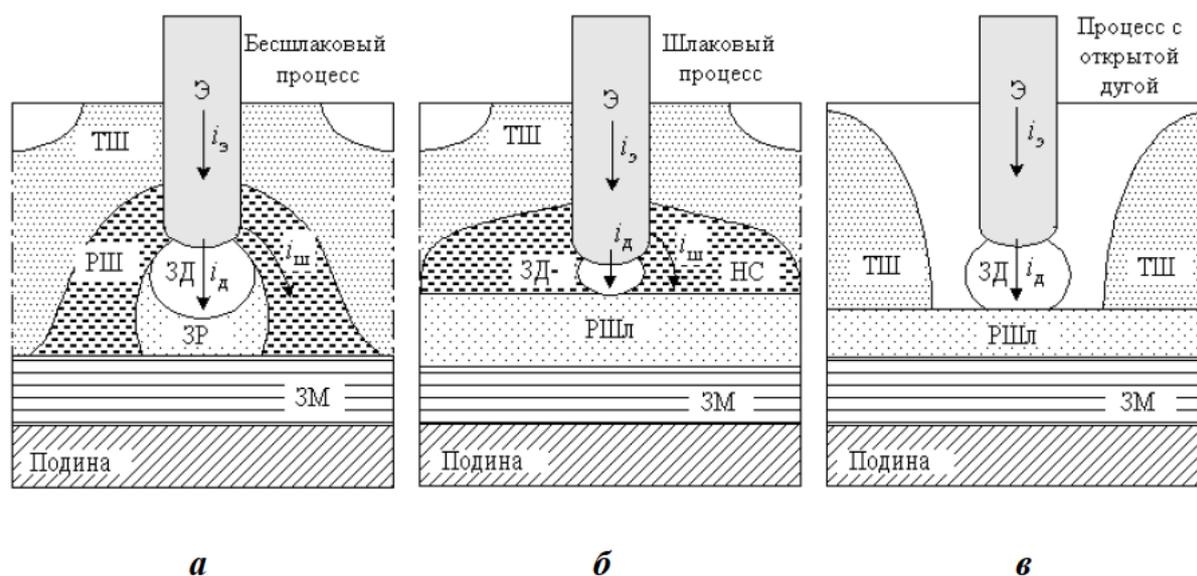
## ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ СХЕМНЫХ МОДЕЛЕЙ

А.В. Лукашенко, А.А. Фомичев

*Рассмотрены алгоритмы параметрической идентификации нелинейных динамических моделей электродуговых процессов в информационно-измерительной системе на основе измерения спектральных составляющих внешних периодических сигналов при представлении характеристик нелинейных элементов в виде разложения в ряд по базисным функциям на основе степенных.*

*Ключевые слова: информационно-измерительная система, электродуговые процессы, схемные модели, параметрическая идентификация.*

Проблема автоматизации контроля и управления технологическими процессами в электродуговых печах переменного тока, эксплуатируемых в металлургической и химической промышленности, в машиностроении [1], непосредственно связана с задачами получения оперативной информации о текущем состоянии внутренних электроэнергетических параметров, анализа мощности в недоступных для прямого контроля зонах токопроводящей среды (рис.1), определения и поддержания рациональных режимов работы.



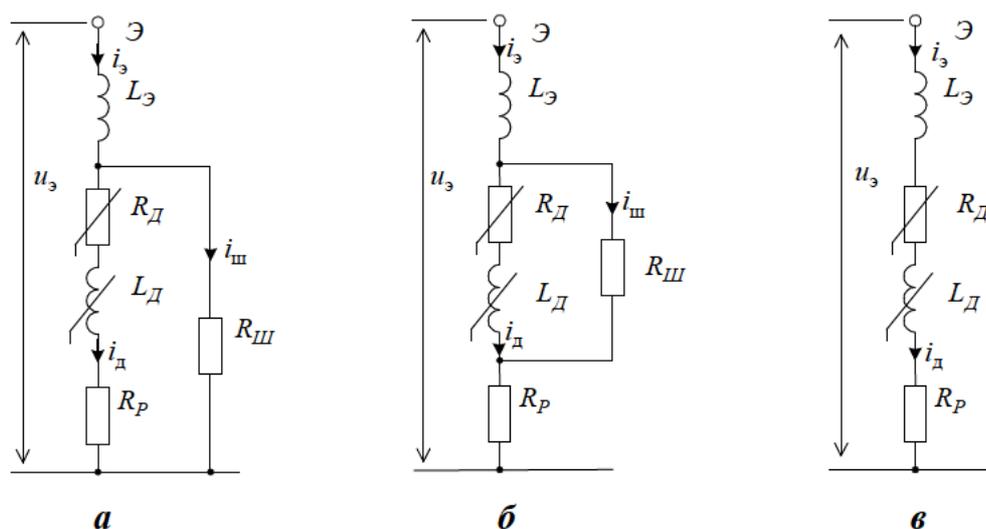
**Рис. 1. Зонная структура подэлектродной токопроводящей среды типовых электротехнологических процессов: а – бесшлаковый; б – шлаковый; в – с открытой дугой Э-электрод; ТШ – твердая шихта; РШ – расплавленная шихта; ЗД – зона дуги; ЗР – зона расплава; РШл – расплав шлака; НС – науглероженный слой; ЗМ – зона металла**

Недостаточная информативность существующих систем контроля рассматриваемого класса процессов из-за недоступности для прямых измерений технологического состояния токопроводящей среды обуславливает применение математических моделей для оценки и текущего контроля скрытых внутренних параметров и переменных по их косвенным проявлениям во внешних измеряемых сигналах и создание микропроцессорных «интеллектуальных датчиков». Решение этих задач требует построения и идентификации в реальном времени математических моделей внутренних процессов и явлений в токопроводящей подэлектродной среде электропечей по измеряемым внешним рабочим электрическим сигналам переменного тока и напряжения в ходе нормальной эксплуатации.

Наличие нелинейностей, обусловленных существованием электрической дуги в токопроводящих подэлектродных зонах электротехнологических объектов работающих на переменном токе, приводит к несинусоидальности периодических функций мгновенных значений входных и выходных сигналов тока и напряжения, к расширению их спектрального состава. Величина и соотношение спектральных составляющих рабочего тока и напряжения несут информацию о внутренних параметрах и характеристиках зон токопроводящей среды, что позволяет использовать их для решения задачи идентификации схемных моделей.

### 1. Схемные модели токопроводящей среды

Для решения задач оперативного контроля токопроводящая среда в цепи каждого электрода представляется в виде схемных моделей содержащих реактивные (динамические) и резистивные (статические) элементы, как линейные, так и нелинейные (рис.2).



**Рис. 2. Схемные модели токопроводящей среды электротехнологических процессов: а – бесшлаковый; б – шлаковый; в – с открытой дугой;  $L_э$  – индуктивность электрода;  $R_р$  – сопротивление зоны расплава;  $R_ш$  – сопротивление шихты;  $R_д$  – сопротивление дуги;  $L_д$  – индуктивность дуги**

Каждый элемент схемной модели соответствует определенной зоне токопроводящей среды. Обобщенные одномерные схемные модели токопроводящей среды в цепи одного электрода описываются нелинейными дифференциальными уравнениями следующего вида [2]

$$\frac{dS(x)}{dt} + F(x) = y(t), \quad (1)$$

где  $y(t)$  и  $x(t)$  – входные и выходные сигналы тока и напряжения в цепи электрода;  $F(x)$  – нелинейная характеристика эквивалентной резистивной статической части;  $S(x)$  – нелинейная характеристика эквивалентной реактивной динамической части модели.

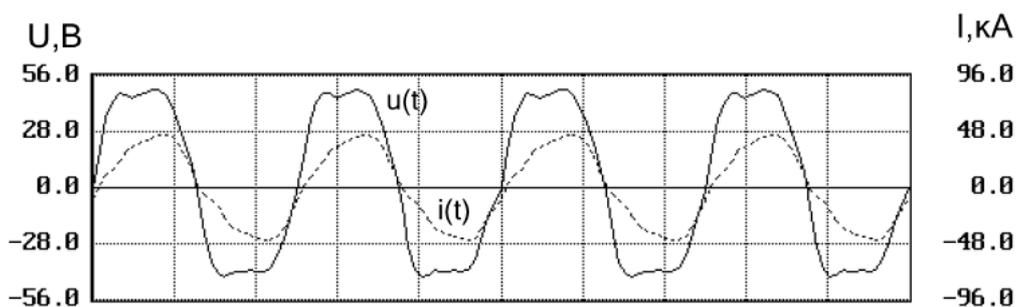
Уравнение (1) может быть представлено в виде

$$P(x) \frac{dx}{dt} + F(x) = y(t), \quad (2)$$

где  $P(x) = \frac{dS(x)}{dx}$  – дифференциальная характеристика динамической части.

Задача идентификации динамических моделей нелинейных объектов (1) – (2) состоит в определении нелинейных зависимостей характеристик  $S(x)$ ,  $P(x)$  динамических и  $F(x)$  статических элементов на основе измерения временных функций рабочих выходных и входных периодических сигналов  $x(t) = x(t+T)$ ,  $y(t+T)$  и их спектральных составляющих.

На рис. 3 представлены осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений электродов промышленной руднотермической трехфазной электродуговой печи переменного тока, полученные экспериментально.



**Рис. 3. Осциллограммы сигналов мгновенных значений токов и напряжений промышленной трёхэлектродной руднотермической электродуговой печи**

Как видно, форма мгновенных значений тока и напряжения существенно отличается от синусоидальной, искажения формы зависят от степени развития электрической дуги, условий ее горения и электротехнологического режима работы печи.

**2. Решение задачи параметрической идентификации схемных моделей.** Для практического решения задачи идентификации, нелинейные характеристики статической и динамической частей модели будем представлять в виде разложения по известным базисным функциям  $\varphi_k(x)$ , степенным функциям, многочленам Лежандра, Чебышева [3], с неизвестными коэффициентами  $r_k$  и  $l_k$

$$F(x) = \sum_{k=1}^{\infty} r_k \varphi_k(x), \quad S(x) = \sum_{k=1}^{\infty} l_k \varphi_k(x). \quad (3)$$

Уравнение модели (1) при этом принимает вид

$$\sum_{k=1}^{\infty} l_k \frac{d\varphi_k(x)}{dt} + \sum_{k=1}^{\infty} r_k \varphi_k(x) = y(t). \quad (4)$$

Уравнение можно представить в частотной области, воспользовавшись преобразованием Фурье

$$\sum_{k=1}^m l_k X'_k(j\omega) + \sum_{k=1}^n r_k X_k(j\omega) = Y(j\omega), \quad (5)$$

где  $X_k(j\omega) = F[\varphi_k(t)]$ ;  $X'_k(j\omega) = F\left[\frac{d\varphi_k(t)}{dt}\right] = j\omega X_k(j\omega)$ ;  $Y(j\omega) = F[y(t)]$  – преобразование Фурье соответствующих сигналов.

Поскольку выходные и входные сигналы  $x(t)$  и  $y(t)$ , а также сигналы базисных функций  $\varphi_k(t)$  являются периодическими функциями времени, удовлетворяющими условиям Дирихле, то они разлагаются в ряд Фурье и имеют линейчатый, дискретный спектр (рис. 4).

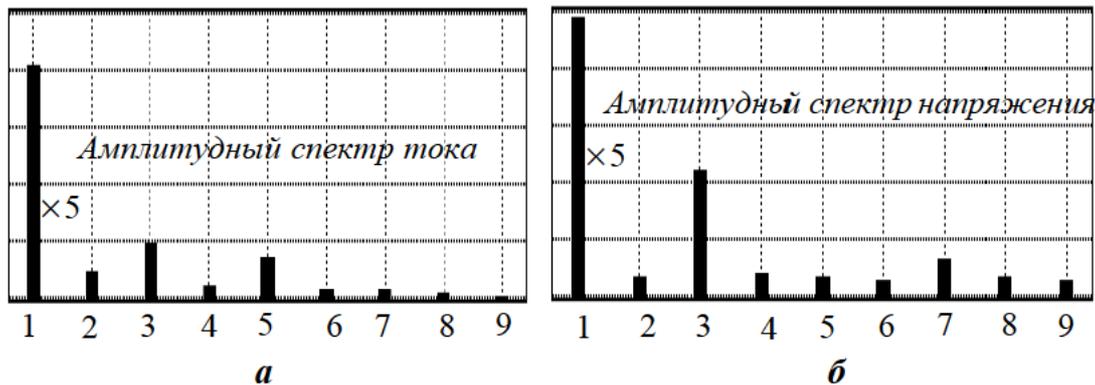


Рис. 4. Амплитудные спектры сигналов: а – тока; б – напряжения

При этом уравнение модели (5) может быть представлено относительно комплексных коэффициентов ряда Фурье (относительно комплексных амплитуд гармонических составляющих сигналов) базисных функций

$$\sum_{k=1}^m j\omega_q \cdot X_k(\omega_q) \cdot l_k + \sum_{k=1}^n X_k(\omega_q) \cdot r_k = Y(\omega_q), \quad q = 0, 1, \dots, N, \dots, \quad (6)$$

где  $q$  – номер гармонической составляющей;  $N$  – количество гармоник, учитываемых при разложении сигналов в ряд Фурье.

Таким образом, при представлении сигналов рядом Фурье схемная модель (4) описывается системой алгебраических уравнений [3]

$$\begin{bmatrix} X_1(0) & \dots & X_n(0) & | & j\omega_0 X_1(0) & \dots & j\omega_0 X_m(0) \\ X_1(1) & \dots & X_n(1) & | & j\omega_1 X_1(1) & \dots & j\omega_1 X_m(1) \\ \vdots & \ddots & \vdots & | & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_1(q) & \dots & X_n(q) & | & j\omega_q X_1(q) & \dots & j\omega_q X_m(q) \\ \vdots & \dots & \vdots & | & \vdots & \dots & \vdots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_n \\ l_1 \\ \vdots \\ l_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y(0) \\ Y(1) \\ \vdots \\ Y(q) \\ \vdots \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Неизвестные параметры  $l_k, r_k$  являются вещественными величинами, т. е. система линейных алгебраических уравнений (7) с комплексными коэффициентами должна иметь вещественное решение. При этом достаточно в комплексной системе иметь количество уравнений в два раза меньше, чем действительных неизвестных. В то же время эту систему с комплексными коэффициентами и вещественными неизвестными можно представить в виде двух вещественных подсистем для действительной и мнимой частей коэффициентов, поскольку вещественное решение должно удовлетворять и одной, и другой системе.

От системы с комплексными коэффициентами (7) перейдем к системе с действительными коэффициентами, которая будет содержать в два раза больше уравнений

$$\begin{bmatrix} X_1(0) & \dots & X_n(0) & | & X'_1(0) & \dots & X'_m(0) \\ X_1(1_C) & \dots & X_n(1_C) & | & X'_1(1_C) & \dots & X'_m(1_C) \\ \vdots & \ddots & \vdots & | & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_1(q_C) & \dots & X_n(q_C) & | & X'_1(q_C) & \dots & X'_m(q_C) \\ \vdots & \dots & \vdots & | & \vdots & \dots & \vdots \\ X_1(1_S) & \dots & X_n(1_S) & | & X'_1(1_S) & \dots & X'_m(1_S) \\ \vdots & \ddots & \vdots & | & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_1(q_S) & \dots & X_n(q_S) & | & X'_1(q_S) & \dots & X'_m(q_S) \\ \vdots & \dots & \vdots & | & \vdots & \dots & \vdots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_n \\ l_1 \\ \vdots \\ l_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y(0) \\ Y(1_C) \\ \vdots \\ Y(q_C) \\ \vdots \\ Y(1_S) \\ \vdots \\ Y(q_S) \\ \vdots \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Каждому уравнению системы (7) для  $q$ -й гармоники в новой системе (8) будет соответствовать два уравнения: для амплитуд синусной и косинусной составляющих  $q$ -й гармоники сигналов. Если сигнал  $x(t)$  содержит только первую гармонику, то сигнал, формируемый каждой базисной функцией, будет содержать ряд гармонических составляющих. Номер частоты высшей гармоники каждой базисной функции  $\varphi_k(t)$  определяется её порядком  $k$ . Таким образом, при гармоническом входном сигнале необ-

ходимым и достаточным условием для формирования невырожденной квадратной матрицы  $\mathbf{M}_k$  и получения единственного решения системы (8) относительно неизвестных параметров нелинейных характеристик элементов схемных моделей является измерение амплитуд синусных и косинусных гармонических составляющих базисных функций с первой по  $n$ -ю включительно [3 – 4]. С учётом треугольности блоков матрицы  $\mathbf{M}_k$  укороченная система относительно неизвестных параметров будет иметь вид

$$\begin{bmatrix} X_1(1_C) & \dots & X_n(1_C) & \omega X_1(1_S) & \dots & \omega X_n(1_S) \\ 0 & \dots & X_n(2_C) & 0 & \dots & 2\omega X_n(2_S) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & X_n(n_C) & 0 & \dots & n\omega X_n(n_S) \\ \hline X_1(1_S) & \dots & X_n(1_S) & -\omega X_1(1_C) & \dots & -\omega X_n(1_C) \\ 0 & \dots & X_n(2_S) & 0 & \dots & -2\omega X_n(2_C) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & X_n(n_S) & 0 & \dots & -n\omega X_n(n_C) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_n \\ l_1 \\ \vdots \\ l_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y(1_C) \\ Y(2_C) \\ \vdots \\ Y(n_C) \\ Y(1_S) \\ Y(2_S) \\ \vdots \\ Y(n_S) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

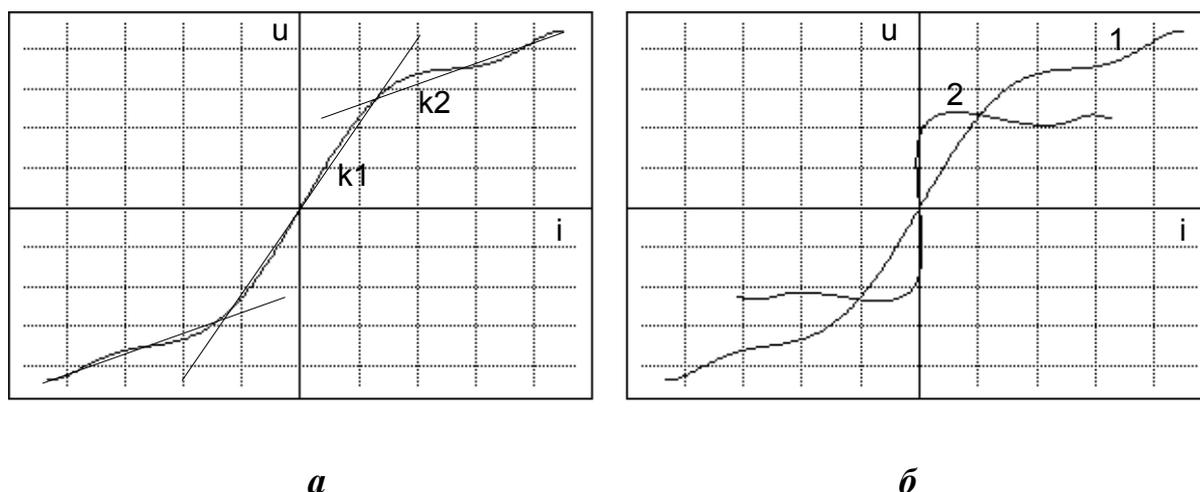
На основе идентифицированных параметров  $r_k, l_k$  нелинейных характеристик (3) статической и динамической частей разработана и реализована методика определения сопротивлений, активных мощностей, выделяемых в характерных зонах ванны: в дуге, в шихте, в расплаве и общих энергетических показателей цепи каждого электрода: активной, реактивной и полной мощности, коэффициента мощности.

Из полученных нелинейных характеристик резистивной части выделяются электрические параметры и характеристики элементов схемных моделей подэлектродной среды, структура которых соответствует определенным электротехнологическим процессам, а элементы отражают свойства внутренних зон шихты, дуги, расплава. Процесс выделения сопротивлений подэлектродных зон и вольт-амперной характеристики дуги из идентифицированной нелинейной характеристики резистивной части обобщенной модели показан на рис. 5.

Величины сопротивлений, шунтирующих дугу  $R_{ш}$ , и сопротивления расплава  $R_p$  определяются в предположении их линейности исходя из особенностей вида идентифицированной нелинейной характеристики эквивалентной резистивной части модели для различных типов процессов (рис. 5, кривая 1) на основе усредненных коэффициентов наклона начального и конечного участков.

При постоянно существующей газовой полости дугового разряда в подэлектродной среде наклон начального участка характеристики всегда больше, чем наклон конечного участка. Коэффициент наклона начального участка характеристики, когда дуговой разряд в газовой полости еще не

возник, определяет величину шунтирующего сопротивления шихты для бесшлаковых процессов  $R_{ш} = k_1$  и сумму шунтирующего и последовательного сопротивлений для шлаковых процессов:  $R_{ш} + R_p = k_1$ . Коэффициент наклона конечного участка характеристики, соответствующего горению дуги, равен сопротивлению параллельного соединения шунтирующего и последовательного сопротивлений для бесшлаковых процессов  $R_{ш} \parallel R_p = k_2$  и величине последовательного сопротивления расплава для шлаковых процессов  $R_p = k_2$ , а также для процессов с открытой дугой.



**Рис. 5. Определение сопротивлений подэлектродных зон и вольт амперной характеристики: а – дуги из идентифицированной характеристики; б – нелинейные характеристики; 1 – эквивалентная; 2 – дуги; 3 – промежуточная**

На основе рассчитанных сопротивлений зон шихты и расплава восстанавливается резистивная составляющая нелинейной вольт-амперной характеристики дуги. Процесс выделения вольт-амперной характеристики дуги из идентифицированной нелинейной характеристики резистивной части обобщенной модели показан на рис. 5, кривая 2.

Линейная составляющая характеристики динамической части определяет линейную индуктивность цепи «электрод-ванна»:  $L_3 = l_1$ , а нелинейная составляющая определяет нелинейную индуктивность

$$L_d(i) = \sum_{k=2}^m l_k \varphi_k(i),$$

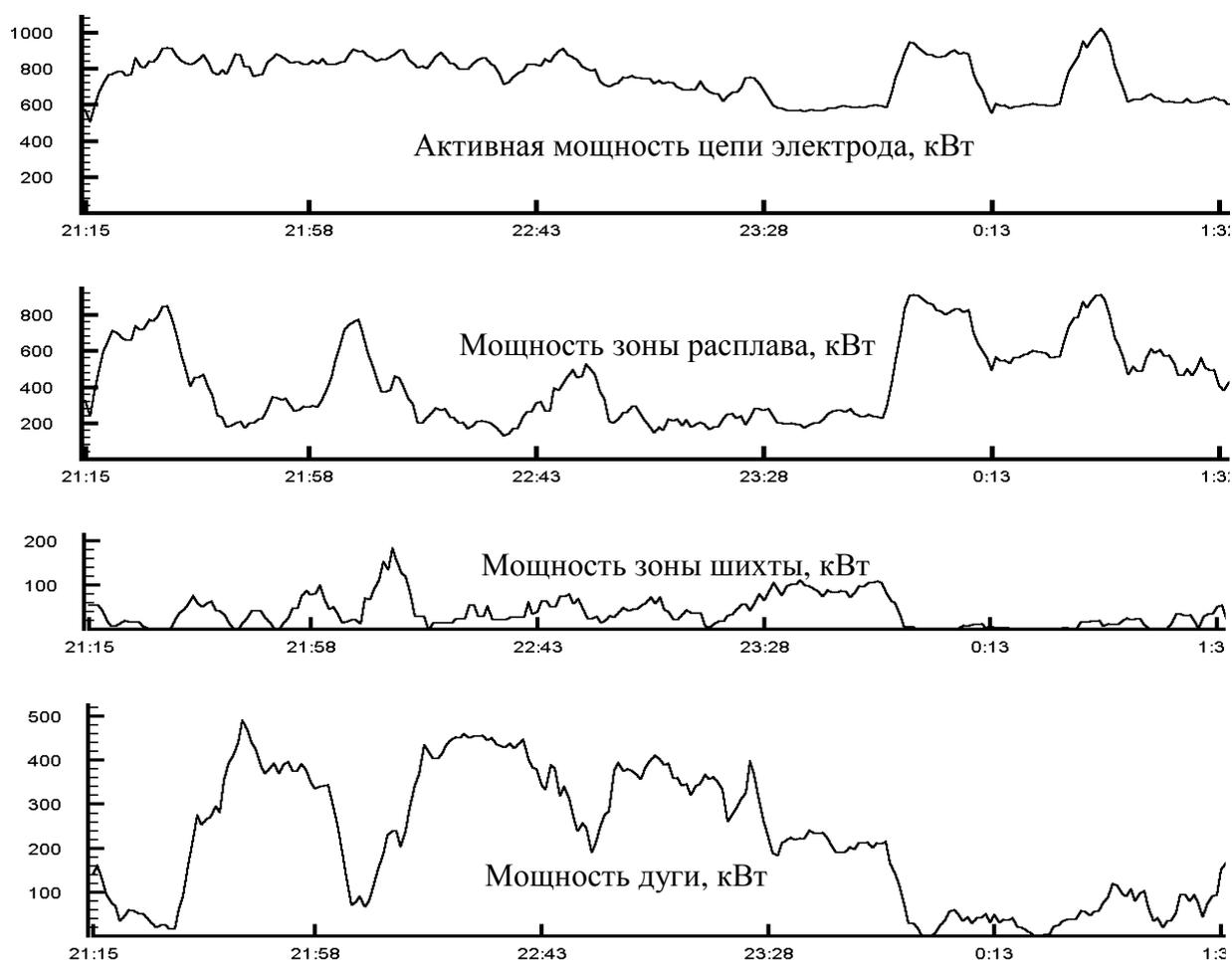
моделирующую гистерезис дуги.

На основе полученных значений сопротивлений зон шихты и расплава, индуктивностей цепи электрода и дуги, а также измеряемых мгновенных и действующих значений тока и напряжения электрода определя-

ются временные функции и действующие значения токов и напряжений, активные и реактивные мощности отдельных внутренних зон и электрода в целом.

### 3. Реализация разработанных алгоритмов в информационно-измерительной системе

Разработанные алгоритмы и методика идентификации прошли опытно-промышленную эксплуатацию в информационно-измерительной системе промышленных технологических процессов различных типов, применялись в промышленных условиях для текущего контроля распределения мощности, внутренних электротехнологических параметров и переменных технологических процессов. На рис. 6 показано полученное системой распределение мощности в подэлектродных зонах печи в процессе плавки феррованадия.



**Рис. 6. Распределение мощности в подэлектродных зонах печи в процессе плавки**

В процессе экспериментальных исследований показано, что при практически постоянной активной мощности в цепи электрода, распределение мощности по внутренним зонам может быть различно на различных

этапах плавки. Стабилизация общей мощности электрода не гарантирует постоянства мощности в дуге и соответственно стабильности скорости протекания восстановительных реакций. И только использование оперативной информации о распределении мощности в электропечи, получаемой информационно-измерительной системой при идентификации в ходе технологического процесса, позволяет поддерживать необходимую мощность дуги, распределение энергии по зонам и наиболее эффективные электроэнергетические и технологические режимы работы. Это повышает восстанавливаемость целевого продукта и снижает удельный расход электроэнергии.

Таким образом, разработанные алгоритмы позволяют идентифицировать на основе измерения гармонических составляющих сигналов рабочего тока и напряжения электрода параметры схемных моделей токопроводящей среды дуговых печей и получать в информационно-измерительной системе оперативную информацию о внутренних электроэнергетических параметрах, не доступных для непосредственного контроля. Определяется величина электрических сопротивлений внутренних, недоступных для непосредственного контроля, подэлектродных зон, нелинейная вольтамперная характеристика дуги, сигналы мгновенных значений токов и напряжений в зонах, индуктивность электрода и соответственно активные и реактивные мощности, выделяемые в каждой зоне и в дуге. Штатные средства контроля не позволяют получить такую информацию о внутренних электроэнергетических параметрах зон токопроводящей среды. Разработанные алгоритмы могут быть применены при создании новых интеллектуальных информационно-измерительных систем и интеллектуальных датчиков оперативного контроля внутренних электроэнергетических параметров электродуговых печей по измерениям внешних рабочих сигналов.

### **Список литературы**

1. Марков Н.А., Баранник О.В. Эксплуатационный контроль электрических параметров дуговых электропечей. М.: Энергия, 1973. 105 с.
2. Лукашенко А.В., Фомичев А.А. Методы идентификации нелинейных схемных моделей электродуговых процессов. Тула: Изд-во ТулГУ, 2004. 228 с.
3. Фомин В.Н. Рекуррентное оценивание и адаптивная фильтрация. М.: Наука, 1984. 288 с.
4. Лукашенко А.В., Грачев А.Н., Фомичев А.А. Алгоритмы идентификации нелинейных динамических моделей электротермических объектов при периодических сигналах // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. Вып. 9. Ч. 1. С. 98 – 107.

*Лукашенко Анатолий Викторович, д-р техн. наук, проф., [luav50@mail.ru](mailto:luav50@mail.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

*Фомичев Александр Александрович, д-р техн. наук, проф., [Fomichev71@gmail.com](mailto:Fomichev71@gmail.com), Россия, Тула, Тульский государственный университет*

***INFORMATION-MEASURING SYSTEM OF THE ELECTRIC ARC PROCESS BASED ON THE IDENTIFICATION OF CIRCUIT MODELS***

*A.V. Lukashenkov, A.A. Fomichev*

*Algorithms of parametrical identification of nonlinear dynamic models of the electric arc process in the information-measuring system on the basis of measurement of spectral making external periodic signals are considered at representation of the characteristics of nonlinear elements as decomposition in a series on basic functions on the basis of power functions.*

*Key words: information-measuring system, electric arc process, circuit models, parametrical identification.*

*Lukashenkov Anatoliy Viktorovich, doctor of technical sciences, professor, [luav50@mail.ru](mailto:luav50@mail.ru), Russia, Tula, Tula State University,*

*Fomichev Aleksandr Aleksandrovich, doctor of technical sciences, professor, [Fomichev71@gmail.com](mailto:Fomichev71@gmail.com), Russia, Tula, Tula State University*

УДК 004.514

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОГРАММНЫХ ИНТЕРФЕЙСОВ  
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ШАБЛОННЫХ ДЕЙСТВИЙ  
ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ**

**А.А. Мишин, Ю.В. Французова**

*Рассмотрены основные проблемы пользовательских интерфейсов. Определены главные эргономические показатели интерфейса и методы по которым эти показатели будут улучшаться. Разработано и описано программное обеспечение, с помощью которого будут повышаться показатели эргономичности.*

*Ключевые слова: программный интерфейс, графический пользовательский интерфейс, эргономика, юзабилити.*

В настоящее время все более актуальна задача проектирования эргономичного пользовательского интерфейса, так как для большинства пользователей именно интерфейс отождествляется с программным приложением. Соответственно не имея эргономичного интерфейса, пользователю будет тяжело работать с программой [1].

При первом открытии любой программы пользователь вначале обращает внимание на графический пользовательский интерфейс (GUI в дальнейшем) данного приложения. GUI имеет важное значение для любой программной системы и является её неотъемлемой составляющей, ориентированной на конечного пользователя. Клещев А.С. и Грибова В.В. отмечают, что пользователь судит о программе именно через интерфейс [2]. Разработка GUI является самой длительной частью разработки приложения и занимает около 70 %, ведь интерфейс должен быть эргономичен [3]. Можно выделить следующие эргономические показатели качества интерфейса:

- скорость работы пользователя;
- количество человеческих ошибок;
- скорость обучения навыкам оперирования интерфейсом, субъективная удовлетворённость;
- степень сохранности этих навыков при неиспользовании продукта.

Проблема этих показателей состоит в том, что можно улучшать только два из них, так как это приведет к ухудшению остальных. Для большинства программ, которыми люди пользуются многократно, очень важны первые два показателя.

Разработчики программного обеспечения оставляют возможность пользователю самому настроить графический интерфейс под свои нужды. Обычно это происходит в программах с большим функционалом. К таким программам можно отнести большинство графических редакторов (Adobe Photoshop, SAI, Corel Painter и др.), программы 3D-моделирования (Autodesk 3DS Max, Blender и др.), CAD-системы (Autodesk Auto CAD, Компас-3D и др.).

Возникает вопрос, как настроить человеку GUI таким образом, чтобы повысить требуемые показатели эргономичности. Для этого необходимо провести юзабилити-тестирование. Самый простой и качественный в данной ситуации метод – Маустрекинг. Данная технология позволяет зафиксировать все движения мыши пользователя. Существует мнение, что курсор мыши всегда следует за взглядом пользователя, именно поэтому его применяют как альтернативу айтрекингу – слежению за взглядом. Это позволяет установить, чему пользователь уделяет особое внимание.

Полученные данные объединяются в так называемую «карту», где наиболее «популярные» точки помечаются более теплыми тонами. Получившаяся «карта» накладывается на скриншот приложения, для которого используется данный метод. Таким образом, получим точное расположение зон, которые пользователь использует чаще.

Преимущества данного метода:

- отчет в виде наглядной карты с обозначенными точками наибольшей активности;

хороший тест на предмет юзабилити;  
возможность найти слабые места в дизайне и усилить их на основе полученных результатов.

Таким образом, этот метод позволяет настраивать каждому пользователю GUI под свои требования, исходя из данных, полученных на тепловых картах двух видов:

1) картах кликов, показывающей где наиболее часто кликал пользователь;

2) картах траекторий движения мыши.

Это позволит пользователю настроить интерфейс приложения под свои нужды, тем самым увеличив скорость работы.

Было создано прикладное программное обеспечение, реализующее метод маустрекинга и позволяющей наглядно вывести информацию для пользователя.

В начале работы с программой требуется определить, в каком приложении программа будет следить за действиями пользователя. Программа находит все открытые приложения, имеющие окна, и создает список этих приложений. Из образовавшегося списка пользователь находит и выбирает нужное ему приложение. Нажав кнопку «начать слежение», пользователь дает команду на слежение программе в выбранном приложении. Во время слежения программа записывает данные двух типов:

1) траектория движения мыши (к примеру, каждые 0,2 секунды будут записываться координаты курсора при условии, что он движется);

2) координаты нажатия левой кнопки мыши или правой кнопки мыши.

Записываются эти данные в отдельные файлы.

Собрав достаточное количество данных, пользователь может запросить результаты. В качестве отчета он получит скриншот окна приложения, на который будет нанесена одна из двух тепловых карт, соответствующих записываемым данным.

Для отчета по траекториям движения карта строится следующим образом: создается матрица размерностью равной разрешению экрана монитора, изначальные значения которой равны нулю. Начинается считывание файла. Считывая каждую новую координату, в матрице происходят следующие изменения:

$$Y_i = Y_{i-1} + X,$$

где  $Y_i$  – ячейка матрицы после перерасчета;  $Y_{i-1}$  – текущее состояние ячейки матрицы;  $i$  – итерация перерасчета;  $X$  – изменение ячейки;  $X=5$  - при нахождении пикселя соответствующего клетке матрицы в радиусе 0-3 пикселя от пикселя с координатами считанными из файла;  $X=4$  - при нахождении пикселя соответствующего клетке матрицы в радиусе 4-6 пикселя от пикселя с координатами считанными из файла;  $X=3$  - при нахождении пикселя соответствующего клетке матрицы в радиусе 7...9 пикселя от пикселя

с координатами считанными из файла;  $X=2$  - при нахождении пикселя соответствующего клетке матрицы в радиусе 10...13 пикселя от пикселя с координатами считанными из файла;  $X=1$  - при нахождении пикселя соответствующего клетке матрицы в радиусе 14...15 пикселя от пикселя с координатами считанными из файла;  $X=0$  - в остальных случаях.

Там, где значение  $Y$  будет более высоким, цвет будет более теплым.

Для отчета по координатам нажатия карта строится следующим образом: так же, как и в случае с тепловой картой траекторий движения, создается матрица размерностью, равной разрешению экрана, изначальные значения которой равны нулю. При считывании каждой новой координаты из файла в матрице происходят следующие изменения:

$$Y_i = Y_{i-1} + X,$$

где  $Y_i$  – ячейка матрицы после перерасчета;  $Y_{i-1}$  – текущее состояние ячейки матрицы;  $i$  – итерация перерасчета;  $X$  – изменение ячейки;  $X=1$  - при нахождении пикселя соответствующего клетке матрицы в радиусе 0-2 пикселя от пикселя с координатами считанными из файла;  $X=0$  - в остальных случаях.

При формировании тепловой карты программа работает с палитрой RGB, но использует основные цвета палитры RYB. Для простоты реализации разница между максимальным попаданием в клетку и минимальным разделена, на 5 частей

$$\Delta = \frac{X_{max} - X_{min}}{5},$$

где  $X_{max}$  – наибольший процент попадания среди всех зон;  $X_{min}$  – наименьший процент попадания среди всех зон.

При  $X_{min} + 4\Delta \leq X < X_{min} + 5\Delta$  отмечается красным цветом.

При  $X_{min} + 3\Delta \leq X < X_{min} + 4\Delta$  зона отмечается оранжевым цветом.

При  $X_{min} + 2\Delta \leq X < X_{min} + 3\Delta$  зона отмечается желтым цветом.

При  $X_{min} + 1\Delta \leq X < X_{min} + 2\Delta$  зона отмечается зеленым цветом.

При  $X_{min} \leq X < X_{min} + \Delta$ , зона отмечается синим цветом, где  $X$  – процент попадания в зону.

К вышеперечисленным видам отчета добавлен следующий: траектория движения мыши без использования тепловой карты. При этом будет использоваться файл координат нажатия кнопок мыши. Работает этот метод по следующему алгоритму: считывается координата точки из файла и отмечается на скриншоте. Далее считывается следующая координата и так же отмечается на скриншоте. Далее эти точки соединяются линией. Процедура повторяется до конца файла с координатами кликов.

Функциональная модель работы с программой и диаграмма вариантов использования изображены на рис. 1 – 3.

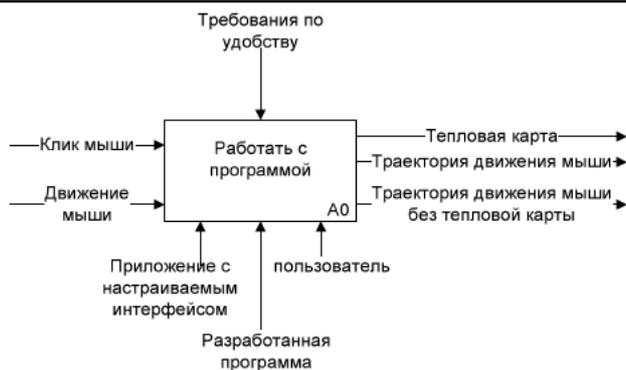


Рис. 1. Функциональная модель работы с программой

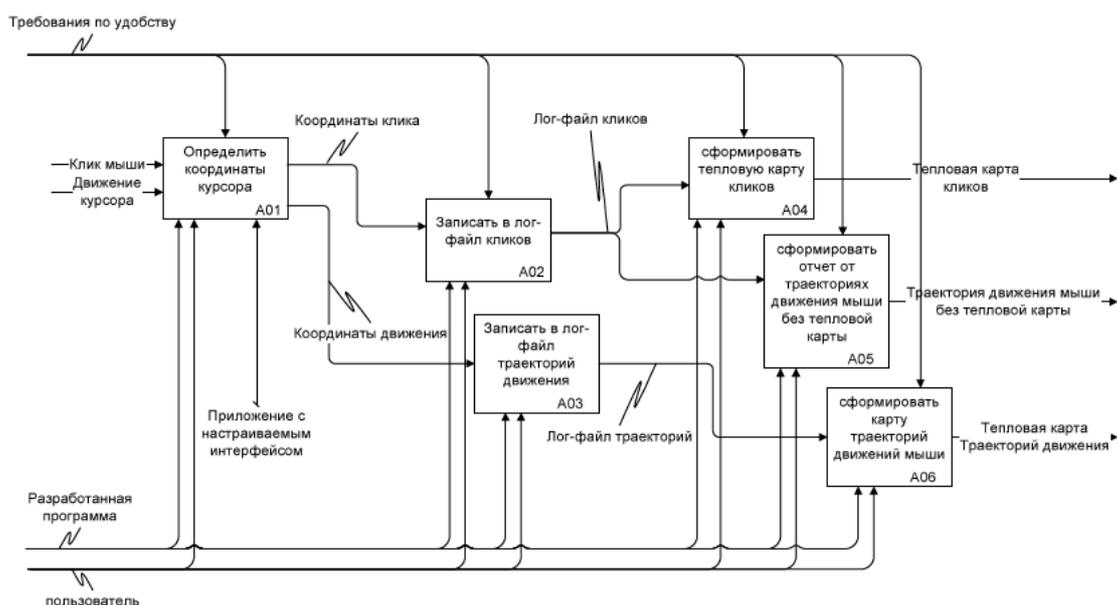


Рис. 2. Декомпозиция процесса работы программы

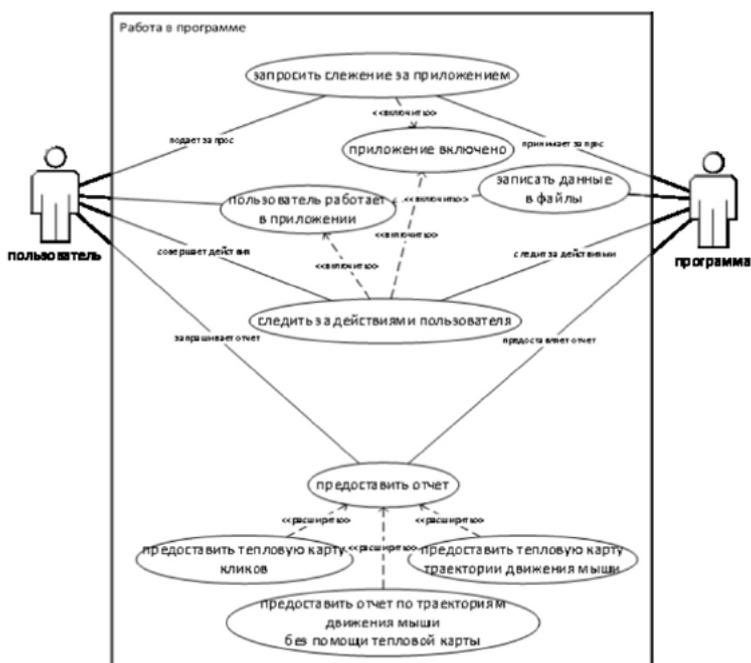


Рис. 3. Диаграмма вариантов использования программы

Таким образом, программа помогает пользователю спроектировать более эргономичный интерфейс, исходя из полученных данных на температурных картах. Это ускорит работу пользователя, уменьшит количество его ошибок, что полезно как в обучающей, так и в производственной сфере.

### **Список литературы**

1. Shneiderman B. Designing the User Interface: Strategies for Effective Human–Computer Interaction, 2010.

2. Клещев А.С., Грибова В.В. Управление проектированием и реализацией пользовательского интерфейса на основе онтологий // Проблемы управления. 2006. Вып. 2.

3. Попов А.А. Эргономика пользовательских интерфейсов в информационных системах: учеб. пособие. М.: РУСАЙНС, 2016.

*Мишин Антон Андреевич, студент, [nocpedhnk1994@gmail.com](mailto:nocpedhnk1994@gmail.com), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

*Французова Юлия Вячеславовна, канд. техн. наук, доц., [julianna\\_1204@mail.ru](mailto:julianna_1204@mail.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет*

#### **DESIGN SOFTWARE INTERFACE BASED ON TEMPLATE USER ACTIONS**

*A.A. Mishin, Y.V. Frantsuzova*

*In this article considered problems of user interfaces. Identified ergonomic parameters and methods for improving, these parameters. Described software, which will increase ergonomic parameters.*

*Key words: programming interface, graphical user interface, ergonomics, usability.*

*Mishin Anton Andreevich, student, [nocpedhnk1994@gmail.com](mailto:nocpedhnk1994@gmail.com), Russia, Tula, Tula State University,*

*Frantsuzova Yulia Vyacheslavovna, candidate of technical sciences, docent, [julianna\\_1204@mail.ru](mailto:julianna_1204@mail.ru), Russia, Tula, Tula State University*

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ КОНТУРА ОТОПЛЕНИЯ В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ САУ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕМ

Т.В. Николаева, А.В. Лукашенко

*Рассмотрены цели создания и преимущества использования математической модели контура отопления, как ключевого звена информационно-измерительной системы автоматического управления теплоснабжением здания. Приведены этапы построения модели в виде системы дифференциальных уравнений. Описана методика разработки, которая основана на идеи автоматической адаптации модели к режиму работы отопительной системы. Использование предложенной методики возможно при учете динамики функционирования отопительного контура в целом.*

*Ключевые слова: информационно-измерительная система теплоснабжения, автоматическое управление, математическая модель, контур отопления.*

Проблема эффективного применения при проектировании инженерных систем тепловых пунктов автоматического оборудования, которое призвано обеспечить стабилизацию температуры в помещении в рамках заданного диапазона комфортности с учетом влияния внешнего тепла при оптимальных затратах энергоресурсов, стоит сегодня наиболее остро [1]. Решение задачи анализа информационных потоков в измерительной системе и формирование принципов контроля, управления и регулирования является актуальным, особенно в контексте увеличения темпов строительства в целом в стране.

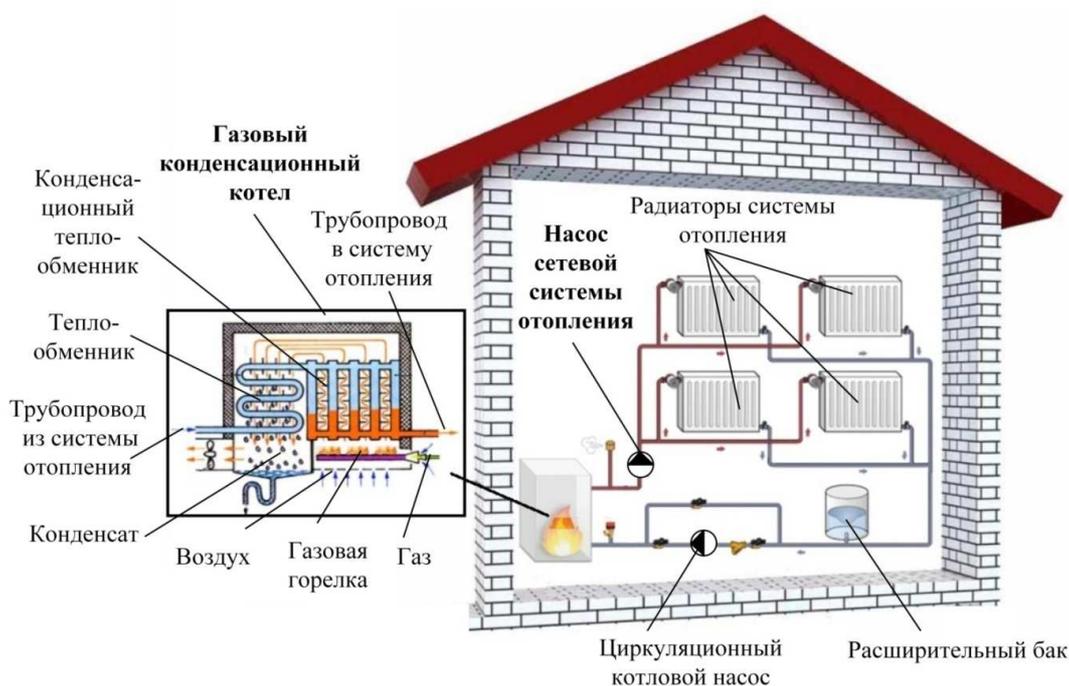
В данном исследовании рассмотрен индивидуальный тепловой пункт офисно-выставочного центра, представляющий собой отопительную систему с газовым конденсационным котлом и модулируемой горелкой (рис. 1), который является ключевым звеном теплотехнической системы, и обладает теплопроизводительностью 380 кВт.

Исходя из проведенного анализа современного состояния проблемы в сфере автоматизации работы тепловых пунктов, установлено, что в научной литературе отсутствует описание оптимальных по энергоэффективности алгоритмов регулирования ИИСАУ теплоснабжением. А представленные алгоритмы управления не полностью решают указанные проблемы.

Разработка оптимального по энергоэффективности алгоритма регулирования ИИСАУ технологическим процессом теплоснабжения представляет собой комплексную задачу, решение которой возможно только при ее декомпозиции. Основная задача разделяется на составляющие, что приводит к рассмотрению контура отопления (рис. 1) и построению его математической модели как основы создания оптимальной ИИСАУ.

Регулирование температуры в подающей линии системы отопления основано на анализе в специализированном контроллере данных с датчиков комнатной и наружной температуры, что позволяет проводить комплексное погодозависимое управление с учетом изменения температуры в помещении [2].

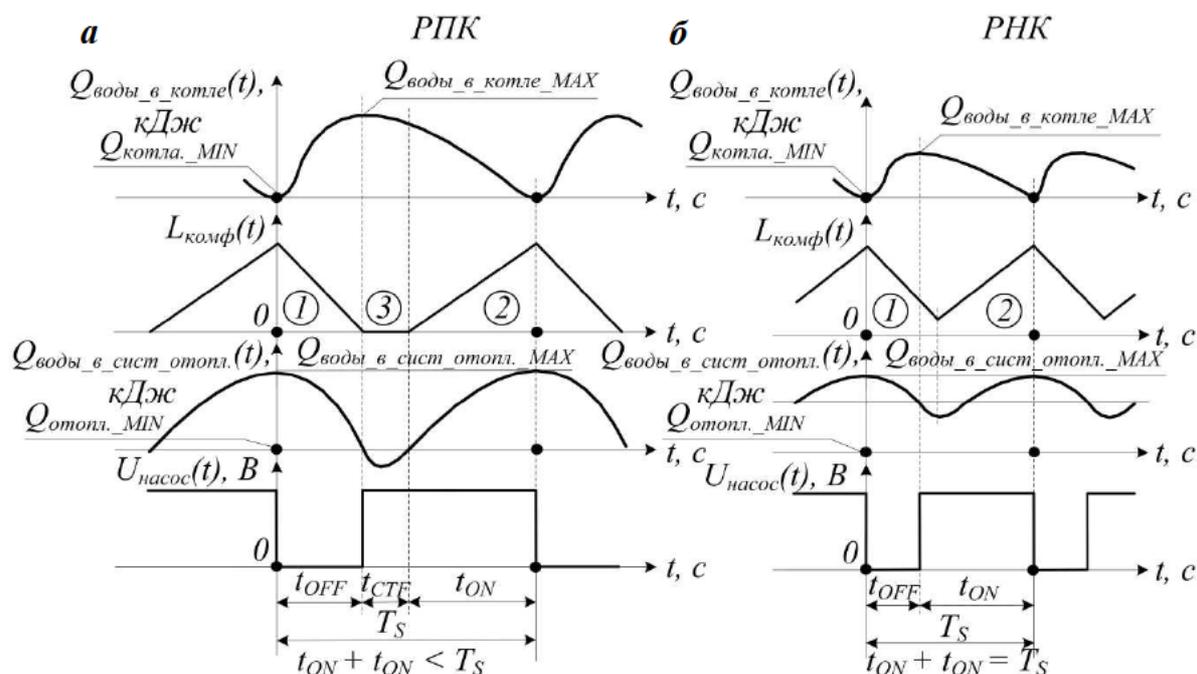
Ключевым элементом системы управления температурой в подающей линии отопления является сетевой насос системы отопления, который периодически коммутируется и нагнетает горячую воду непосредственно в систему для поддержания комнатной температуры на определенном уровне на основе измерительной информации, поступающей с датчика температуры в помещении и снаружи.



**Рис. 1. Схема теплоснабжения здания по контуру отопления**

Регулирование и управление температурой подающей линии осуществляется за счет широтно-импульсной модуляции (ШИМ) коммутирующих функций, формируемых на основе измерительной информации. В результате такого построения информационно-измерительной системы автоматического управления теплоснабжением происходит учет влияния внешнего тепла, оптимальный расход энергоресурсов и стабилизация температуры в помещении в рамках заданного диапазона комфортности.

Насос системы отопления в процессе своей работы имеет три интервала непрерывности в режиме прерывания состояния комфорта (РПК) и два – в режиме непрерывного комфортного состояния (РНК) (рис. 2). Под комфортным состоянием будем понимать нахождение температуры воздушной массы в помещении в определенном установленном диапазоне.



**Рис. 2. Диаграммы изменения тепловой энергии и уровня комфорта нахождения в помещении: а – в режиме прерывания отопительного комфорта; б – в режиме непрерывного состояния комфортности**

Изображенные диаграммы показывают изменение уровня комфорта  $L_{комф.}(t)$  нахождения в помещении, тепловой энергии в системе отопления  $Q_{воды\_в\_сист\_отопл.}(t)$  и жидкостного теплоносителя внутри котла  $Q_{воды\_в\_котле}(t)$  в течение периода коммутации  $T_S$  на различных интервалах непрерывности  $t_{OFF}$ ,  $t_{CTF}$ , и  $t_{ON}$  в режимах прерывания и непрерывного состояния комфортности.

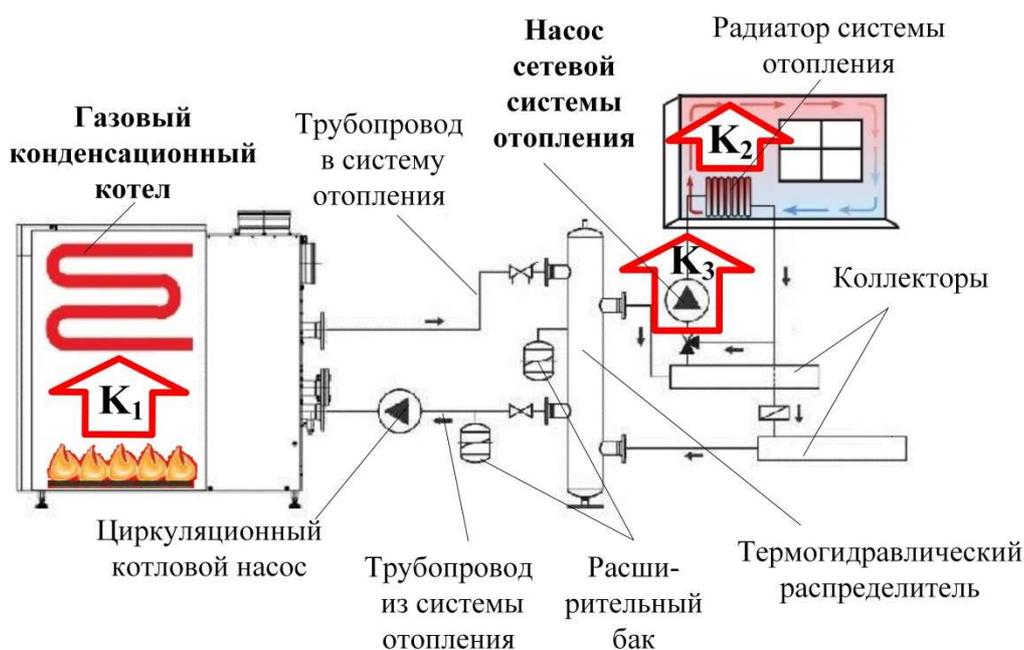
В режиме РПК (рис. 2, а) тепловая энергия в системе отопления с максимального значения  $Q_{воды\_в\_сист\_отопл.}_{MAX}$  опускается ниже  $Q_{отопл.}_{MIN}$ , что приводит к падению температуры в помещении ниже отметки минимальной температуры комфортного диапазона. Для предотвращения этого предлагается осуществлять коммутацию насоса с упреждением [3], то есть при включении насоса системы отопления раньше, чем выполнится условие  $Q_{воды\_в\_сист\_отопл.}_{MAX} = Q_{отопл.}_{MIN}$ , система будет работать в режиме непрерывного состояния комфортности (рис. 2, б).

Процесс теплообмена с визуализированными тепловыми потоками, реализованный с помощью стандартной гидравлической схемы, имеет вид, показанный на рис. 3. Каждый тепловой поток обозначен соответствующим коэффициентом теплопередачи:

$K_1$  – коэффициент теплопередачи в системе «горелка котла» – «жидкостный теплоноситель внутри котла»;

$K_2$  – коэффициент теплопередачи в системе «отопление» – «воздушная масса в помещении»;

$K_3$  – коэффициент теплопередачи между жидкостными теплоносителями в подающих линиях: котла и контура отопления.



**Рис. 3. Процесс теплообмена в контуре отопления**

Разработка математической модели для переменных состояния, отражающей как режим прерывания состояний комфорта, так и режим непрерывной комфортности, а также переходы из одного режима в другой, необходима для формирования оптимального по энергоэффективности алгоритма автоматического управления ИИС теплоснабжения. При этом будет решена задача обеспечения функционирования технологического процесса теплоснабжения с высокой эффективностью благодаря рациональному использованию энергоресурсов, а также его устойчивую и надежную работу при различных внешних условиях и нагрузках[4].

На каждом интервале непрерывности внутри периода коммутации  $T_S$  (рис. 2) схема теплоснабжения описывается определенной системой линейных дифференциальных уравнений. Поэтому будем искать математическую модель контура отопления в виде системы дифференциальных уравнений.

Рассмотрим работу насоса отопительного контура и процессы теплопередачи в информационно-измерительной системе теплоснабжения на каждом из интервалов непрерывности.

**1. Интервал накопления тепловой энергии в жидкостном носителе внутри котла.** Длительность интервала  $t_{OFF}$  определяется длительностью импульса, выключающего насос системы отопления. На интервале  $t \in [0, t_{OFF}]$  на него не подается напряжение  $U_{насос}(t)$ , и в системе теплоснабжения происходят два основных процесса теплообмена:

- 1) нагрев теплоносителя внутри котла за счет сжигания топлива  $K_1$ ;
- 2) нагрев воздушной массы помещения за счет энергии, накопленной ранее в системе отопления здания  $K_2$ .

Рассмотрим отдельно каждый из этих процессов и представим его в виде дифференциального уравнения. Система таких уравнений будет представлять собой полное описание схемы теплоснабжения на интервале накопления тепловой энергии.

Подходя к пониманию первого процесса, следует отметить, что количество теплоты, которое передается воде внутри котла посредством сжигания газа в его топке, определяется, в первую очередь, удельной теплоемкостью жидкости постоянного объема, которая является величиной неизменной и равной для воды  $c_V = 1,38$ , кДж/м<sup>3</sup>; объемом нагреваемой жидкости  $V$ , м<sup>3</sup>; ее плотностью  $\rho = 0,9982$ , г/см<sup>3</sup> и временем  $t$ , в течение которого происходит теплообмен.

Переданная жидкости тепловая энергия влияет на повышение температуры  $\Delta T$ , °C воды в котле. Таким образом, на рассматриваемом временном интервале  $t \in [0, t_{OFF}]$  происходит нарастание тепловой энергии жидкостного носителя внутри котла  $Q_{воды\_в\_котле}(t)$ , кДж; а полная энергия, переданная воде за время  $t_{OFF}$ , с; определяется по формуле:

$$Q_{воды\_в\_котле}(t_{OFF}) = c_V \cdot \rho \cdot V \cdot \Delta T \cdot t_{OFF}$$

Поскольку удельная теплоемкость и плотность воды – величины постоянные, а объем жидкости внутри котла остается фиксированным в силу конструктивных особенностей котлового оборудования, обозначим эти неизменные параметры в системе теплообмена внутри котла коэффициентом  $K_1$ :

$$K_1 = c_V \cdot \rho \cdot V.$$

Тогда запишем дифференциальное уравнение, описывающее процесс нагрева теплоносителя внутри котла за счет сжигания топлива, в виде

$$\frac{dQ_{воды\_в\_котле}(t)}{dt} = K_1 \cdot \Delta T(t),$$

где  $Q_{\text{воды\_в\_котле}}(t)$  – тепловая энергия жидкостного теплоносителя внутри котла, определяющая температуру в его подающей линии, кДж;  $\Delta T(t)$  – изменение температуры воды в котле в процессе теплообмена, происходящего за счет сжигания топлива, °С.

К концу интервала  $t_{OFF}$  тепловая энергия котла от минимального  $Q_{\text{котла\_MIN}}$ , кДж достигает максимального  $Q_{\text{воды\_в\_котле\_MAX}}$ , кДж:

$$Q_{\text{воды\_в\_котле\_MAX}} = Q_{\text{котла\_MIN}} + Q_{\text{воды\_в\_котле}}(t_{OFF})$$

Схемой автоматики безопасности функционирования котла предусмотрено автоматическое прекращение подачи газа к котлу при достижении температуры воды в котле определенного максимального значения. Кроме этого, незамедлительное отключение газовой горелки обеспечивается в следующих случаях: повышение давления воды в котле; понижение и повышение давления газа за пределы допустимых значений; погасание факела; уменьшение разряжения за котлом; неисправность системы автоматики и отсутствие напряжения в цепях защиты.

Во всех остальных случаях, котел работает непрерывно, происходит лишь модуляция мощности котлового насоса посредством изменения мощности горелки в зависимости от скорости вращения котлового насоса. При блокировке работы котла в аварийной ситуации, котловой насос также прекращает функционировать.

Для понимания второго процесса теплообмена следует иметь в виду, что до момента выключения насоса, температура в подающей линии контура отопления была доведена до определенного значения  $Q_{\text{воды\_в\_сист\_отопл\_MAX}}$ , кДж, в зависимости от требуемого запроса на тепло от потребителя, в роли которого выступает рассматриваемая система отопления. Таким образом, воде в прямом отопительном контуре ранее была передана определенная тепловая энергия.

Поддержание комнатной температуры в заданном диапазоне на интервале  $t \in [0, t_{OFF}]$  происходит именно за счет теплообмена, который реализуется путем передачи воздушной массе помещения тепловой энергии, накопленной ранее в системе отопления здания, с определенным коэффициентом теплопередачи  $K_2 = const$ . Энергия в прямом отопительном контуре при этом постепенно убывает, как и температура в самом помещении, поскольку дополнительная тепловая энергия в систему не поступает в связи с отключением насоса, а все накопленное тепло отдается в окружающую среду.

Подходя к описанию такого процесса в виде дифференциального уравнения, отметим динамику изменения еще одного ни мало важного параметра – уровня комфорта нахождения в помещении. Он напрямую зависит от комнатной температуры и прямо пропорционально определяется тепловой энергией в системе отопления.

Тогда дифференциальное уравнение, описывающее процесс нагрева воздушной массы помещения за счет энергии, накопленной в системе отопления здания примет вид:

$$\frac{dL_{\text{комф}}(t)}{dt} = -K_2 \cdot Q_{\text{воды\_в\_сист.\_отопл.}}(t),$$

где  $L_{\text{комф}}(t)$  – уровень комфорта нахождения в помещении, регламентируемый оптимальным температурным диапазоном, измеряется в долях от единицы;  $Q_{\text{воды\_в\_сист.\_отопл.}}(t)$  – тепловая энергия воды в системе отопления, кДж.

Таким образом, поведение системы теплоснабжения на интервале накопления тепловой энергии внутри котла описывается в базисе переменных состояния следующей системой дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\begin{cases} \frac{dQ_{\text{воды\_в\_котле}}(t)}{dt} = K_1 \cdot \Delta T(t), \\ \frac{dL_{\text{комф}}(t)}{dt} = -K_2 \cdot Q_{\text{воды\_в\_сист.\_отопл.}}(t), \end{cases} \quad t \in [0, t_{OFF}], \quad (1)$$

где  $[Q_{\text{воды\_в\_котле}}(t), L_{\text{комф}}(t)]^T$  – вектор переменных состояния.

**2. Интервал отсечки (характерен только для режима прерывания отопительного комфорта).** Интервал отсечки  $t_{CTF}$  возникает из-за инерционности системы теплоснабжения, которая проявляется следующим образом: в определенный момент времени комнатная температура, снижаясь, становится равной минимальной температуре диапазона комфортности, падение температуры свидетельствует о том, что тепловая энергия, накопленная в системе отопления здания, исчерпана:  $Q_{\text{воды\_в\_сист.\_отопл.}} = Q_{\text{отопл.}_MIN}$  (рис. 2). Датчик температуры в помещении подает сигнал о том, что комнатная температура опустилась ниже установленного значения, на контроллер, который, в свою очередь, посылает сигнал управления на включение насоса системы отопления путем подачи на него напряжения  $U_{\text{насос}}(t)$ .

За счет подбора оптимального времени включения и выключения насоса, реализуется функция защиты от перегрева прямого отопительного контура, обеспечивающая подачу в него тепловой энергии.

Отопительный насос начинает качать горячую воду, подогретую в котле, напрямую в подающий трубопровод системы отопления, обеспечивая подпитку отопительной системы тепловой энергией с коэффициентом теплопередачи  $K_3$ . Однако даже при мгновенной передаче сигнала от датчика комнатной температуры непосредственно в контроллер повышение

температуры в самом помещении происходит не сразу (рис. 2, интервал «3»), поскольку требуется некоторое время  $t_{CTF}$ , во-первых, на то, чтобы горячая вода, нагнетенная насосом, прошла по всем трубопроводам отопительной системы, а, во-вторых, произошел теплообмен с воздушной массой помещения. В связи с этим следует обратить внимание на то, что после включения насоса комнатная температура продолжает некоторое время падать, а состояние комфорта находится на нулевом уровне (рис. 2). При таком управлении насосом системы отопления следует говорить об отсутствии предикативного управления температурой в помещении.

Длительность интервала отсечки  $t_{CTF}$  определяется от момента снижения до нуля уровня комфорта до момента времени, когда тепловая энергия в системе отопления снова возрастет до значения, минимально необходимого для поддержания комнатной температуры в заданном комфортном диапазоне  $Q_{воды\_в\_сист.\_отопл.} = Q_{отопл.\_MIN}$ .

Итак, на интервале отсечки происходят два процесса теплообмена:

- 1) нагрев теплоносителя внутри котла за счет сжигания топлива  $K_1$ ;
- 2) передача тепловой энергии в отопительный контур  $K_3$ .

Интервалу отсечки соответствует следующая система дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dQ_{воды\_в\_котле}(t)}{dt} = K_1 \cdot \Delta T(t) - K_3 \cdot Q_{воды\_в\_сист.\_отопл.}(t), \\ \frac{dL_{комф.}(t)}{dt} = 0, \end{array} \right. \quad (2)$$

$$t \in [t_{OFF}, t_{OFF} + t_{CTF}], \quad L_{комф.}(t_{CTF}) = 0.$$

Нагрев воздушной массы помещения за счет энергии, оставшейся в системе отопления здания, на интервале отсечки незначителен ( $K_2 \rightarrow 0$ ) и недостаточен для комфортного состояния.

**3. Интервал передачи тепловой энергии в отопительный контур.** На протяжении интервала отдачи энергии  $t_{ON}$  насос системы отопления включен, на основе данных, полученных с датчиков, что позволяет ему продолжать перекачивать нагретую котлом воду непосредственно к потребителю тепла, повышая тем самым температуру в подающей линии контура отопления.

В системе теплоснабжения происходят следующие процессы теплообмена:

- 1) передача тепловой энергии в отопительный контур  $K_3$ ;
- 2) нагрев теплоносителя внутри котла за счет сжигания топлива  $K_1$ ;
- 3) Нагрев воздушной массы помещения  $K_2$ ;

Передача тепловой энергии в отопительный контур возможна благодаря теплообмену между жидкостными носителями в подающих линиях: котла и контура отопления, который происходит с коэффициентом теплопередачи  $K_3 = const$ . Этот процесс имеет место при продолжающемся нагреве теплоносителя внутри котла за счет сжигания топлива, который, как было сказано ранее, происходит непрерывно, вне зависимости от включения или выключения насоса системы отопления, за исключением аварийных ситуаций.

Дифференциальное уравнение, описывающее изменение тепловой энергии жидкости в котле посредством передачи ее в отопительный контур и получение дополнительной энергии при нагреве теплоносителя внутри котла за счет сжигания топлива, примет вид

$$\frac{dQ_{\text{воды\_в\_котле}}(t)}{dt} = K_1 \cdot \Delta T(t) - K_3 \cdot Q_{\text{воды\_в\_сист.\_отопл.}}(t)$$

Нагрев воздушной массы в помещении на интервале отдачи тепловой энергии в отопительный контур происходит за счет энергии, переданной в систему отопления здания, и некоторой энергии, оставшейся после интервала накопления тепловой энергии, но которой уже не достаточно для поддержания комфортных условий нахождения в комнате.

Тогда дифференциальное уравнение, описывающее процесс повышения уровня комфорта при нагреве воздушной массы помещения, примет вид

$$\frac{dL_{\text{комф}}(t)}{dt} = -K_2 \cdot Q_{\text{воды\_в\_сист.\_отопл.}}(t) + K_3 \cdot Q_{\text{воды\_в\_котле}}(t) .$$

Из всего вышесказанного следует, что системе теплоснабжения на интервале отдачи тепловой энергии в отопительный контур соответствует следующая система дифференциальных уравнений в пространстве состояний в том же базисе, что и на интервале накопления энергии внутри котла:

$$\begin{cases} \frac{dQ_{\text{воды\_в\_котле}}(t)}{dt} = K_1 \cdot \Delta T(t) - K_3 \cdot Q_{\text{воды\_в\_сист.\_отопл.}}(t), \\ \frac{dL_{\text{комф.}}(t)}{dt} = -K_2 \cdot Q_{\text{воды\_в\_сист.\_отопл.}}(t) + K_3 \cdot Q_{\text{воды\_в\_котле}}(t), \end{cases} \quad (3)$$

$$t \in [t_{\text{OFF}} + t_{\text{CTF}}, T_S].$$

В режиме прерывания отопительного комфорта сумма двух рассмотренных интервалов  $t_{\text{ON}}$  и  $t_{\text{OFF}}$ , определяющая длительность интервала комфортного нахождения в помещении, меньше периода коммутации:

$$t_{\text{ON}} + t_{\text{OFF}} \leq T_S. \quad (4)$$

Неравенство (4) имеет место, поскольку в РПК происходит так называемая «отсечка» на графике уровня комфортности нахождения в помещении (рис. 2), когда  $L_{комф}(t_{CTF}) = 0$  в момент времени  $t_{CTF}$ .

Приведенные системы дифференциальных уравнений (1, 2, 3) для различных интервалов непрерывности имеют единый базис переменных состояния  $[Q_{воды\_в\_котле}(t), L_{комф.}(t)]^T$  – тепловой энергии воды в котле и уровня комфорта нахождения в помещении. Эти системы могут быть объединены и представлены одной общей системой дифференциальных уравнений, справедливой для всех интервалов, для любого момента времени с помощью ступенчатых периодических коммутирующих функций  $d(t)$ , определяющих каждый из интервалов непрерывности на периоде коммутации:

$$d_{OFF}(t) = d_{OFF}(t + T_S) = \begin{cases} 1, & t \in [0, t_{OFF}], \\ 0, & t \in [t_{OFF}, t_{OFF} + t_{CTF}], \\ 0, & t \in [t_{OFF} + t_{CTF}, T_S], \end{cases} \quad (5)$$

$$d_{CTF}(t) = d_{CTF}(t + T_S) = 1 - [d_{ON}(t) + d_{OFF}(t)] = \begin{cases} 0, & t \in [0, t_{OFF}], \\ 1, & t \in [t_{OFF}, t_{OFF} + t_{CTF}], \\ 0, & t \in [t_{OFF} + t_{CTF}, T_S], \end{cases} \quad (6)$$

$$d_{ON}(t) = d_{ON}(t + T_S) = \begin{cases} 0, & t \in [0, t_{OFF}], \\ 0, & t \in [t_{OFF}, t_{OFF} + t_{CTF}], \\ 1, & t \in [t_{OFF} + t_{CTF}, T_S], \end{cases} \quad (7)$$

где  $d_{ON} = t_{ON} / T_S$  – относительная длительность интервала передачи тепловой энергии в отопительный контур (коэффициент заполнения управляющих импульсов), измеряется в долях от единицы, соответственно  $d_{OFF} = t_{OFF} / T_S$ ,  $d_{CTF} = t_{CTF} / T_S$ , причем, сумма всех коммутирующих периодических функций на периоде коммутации, всегда равна 1:

$$d_{ON}(t) + d_{OFF}(t) + d_{CTF}(t) = 1.$$

В результате, умножая каждую систему (1) – (3) на соответствующую коммутирующую функцию (5) – (7) и суммируя их, получим единую общую систему дифференциальных уравнений (8), описывающую процессы теплопередачи в системе теплоснабжения здания в произвольный момент времени  $t$ :

$$\begin{cases} \frac{dQ_{воды\_в\_котле}(t)}{dt} = \\ = K_1 \cdot \Delta T(t) - K_3 \cdot Q_{воды\_в\_сист.\_отопл.}(t) \times [d_{CTF}(t) + d_{OFF}(t)], \\ \frac{dL_{комф.}(t)}{dt} = -K_2 \cdot Q_{воды\_в\_сист.\_отопл.}(t) \cdot [d_{ON}(t) + d_{OFF}(t)], \\ \quad + K_3 \cdot Q_{воды\_в\_котле}(t) \cdot d_{ON}(t) . \end{cases} \quad (8)$$

Для текущего момента времени общая система (8) превращается в одну из частных систем (1) – (3).

Таким образом, управление состоянием комфортного нахождения в помещении при широтно-импульсной модуляции (ШИМ) осуществляется путем изменения длительности включения насоса системы отопления  $t_{ON}$ , то есть длительности интервала передачи достаточного количества тепловой энергии в отопительный контур, на основе информации, полученной с датчиков информационно-измерительной системы. При этом будут изменяться длительность и соотношение интервалов  $t_{OFF}$  и  $t_{CTF}$ , поскольку изменяется количество энергии, переданной в систему отопления.

Итак, получили обобщенную для режимов прерывания (РПК) и непрерывного (РНК) состояния комфортности нахождения в помещении систему уравнений (8) для значений основных переменных состояния. Таким образом, динамическая система отопления, с коммутируемыми параметрами, описывается математической моделью в пространстве состояний относительно значений тепловой энергии жидкостного теплоносителя внутри котла и уровня комфорта нахождения в помещении. Полученная в виде системы дифференциальных уравнений модель соответствует схеме теплоснабжения здания (см. рис. 1) и отражает основные процессы теплообмена (см. рис. 3).

Использование модели предоставляет широкие возможности для проведения расчетов переходных процессов и установившихся режимов колебаний значений переменных состояния в информационно-измерительной системе автоматического управления теплоснабжением здания. Расчет режимов может быть произведен с помощью численных методов, реализованных в таких математических пакетах, как MathCAD, MathLab или, например, Mathematica.

### Список литературы

1. СП 89.13330.2012. Котельные. СНиП II-35-76. Котельные установки. Введ. 2012-01-01. М.: Росстандарт: Изд-во стандартов, 2012. 74 с.
2. Грановский В.Л., Прижижецкий С.И. Система отопления жилых зданий массового строительства и реконструкции с комплексным автоматизированием теплоснабжения // Промышленное и гражданское строительство. 2002. № 5. С. 42 – 45.
3. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. СПб.: Профессия, 2004. 752 с.
4. Жук А.З., Козлов Б.М. Оптимизация систем отопления и водоснабжения // Проблемы энергосбережения. 2002. № 9. С. 13 – 15.

Николаева Татьяна Владимировна, асп., [div1@cdae.ru](mailto:div1@cdae.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Лукашенко Анатолий Викторович, д-р техн. наук, проф., [luav50@mail.ru](mailto:luav50@mail.ru),  
Россия, Тула, Тульский государственный университет

**ENGINEERING THE HEATING CIRCUIT MODEL IN INFORMATION MEASURING  
AND AUTOMATIC CONTROL HEAT SUPPLY SYSTEM**

*T.V. Nikolayeva, A.V. Lukashenkov*

*Creation intentions and usage advantages of heating circuit mathematical model are considered in this article. Such circuit is a key unit in the information measuring and automatic control heat supply system. The construction stages of model in the form of differential equations system are contained in the article. The development methodology, which is based on automation model adaptation idea by the heating system operation mode, is described here. It is possible to apply the offered methodology in case on heating circuit working dynamics accounting totally.*

*Key words: information measuring heat supply system, automatic control, mathematical model, heating circuit.*

*Nikolayeva Tatyana Vladimirovna, postgraduate, [div1@cdbae.ru](mailto:div1@cdbae.ru), Russia, Tula, Tula State University,*

*Lukashenkov Anatoly Viktorovich, doctor of technical science, professor, [luav50@mail.ru](mailto:luav50@mail.ru), Russia, Tula, Tula State University*

УДК 004.02

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ВЫБОРА СРЕДСТВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ  
ТЕХНИКИ ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЯ**

**А.В. Новиков**

*Рассмотрен подход, позволяющий автоматизировать процесс выбора средств вычислительной техники для предприятия. Показаны механизмы приведения факторов, характеризующих производственную задачу, к набору требований к параметрам вычислительной техники. Описаны принципы агрегации параметров вычислительных средств при их применении в составе комплексов.*

*Ключевые слова: вычислительная техника, предприятие, факторы, требования, характеристики.*

Задача закупки вычислительной техники для предприятия имеет важное значения как на этапе создания нового предприятия, так и на этапе его модернизации. Неправильный выбор оборудования может привести, с одной стороны, к неоправданным финансовым затратам, с другой – к невозможности осуществлять эффективную деятельность из-за недостаточной вычислительной или информационной поддержки.

Автоматизация решения задачи выбора вычислительной техники предполагает следующие этапы:

- выявление факторов, характеризующих производственную задачу предприятия и определение на их основе требований к вычислительной технике;

- формирование произвольного набора вычислительной техники из ограниченного множества вариантов и определение его характеристик на основе параметров каждого средства, входящего в этот набор;

- сопоставление характеристик набора вычислительной техники и требований, определенных на основе производственных факторов, определение критерия качества набора;

- осуществление управляемого перебора вариантов для выявления лучшего по критерию качества.

Для указания факторов, характеризующих производственную задачу и условия ее выполнения, задается кортеж  $E$ . Каждый из элементов кортежа  $E$  может иметь один из следующих типов: дискретная переменная, непрерывная переменная, нечеткая переменная.

Дискретная переменная  $d_i$ , входящая в состав кортежа  $E$ , принимает одно из известного множества значений. Примерами дискретных переменных являются:

- вид производственной задачи;
- отрасль промышленности;
- соответствие стандарту качества;
- наличие открытого доступа в интернет и т.д.

Непрерывная переменная  $x_i$ , входящая в состав кортежа  $E$ , используется для факторов, имеющих известное значение физической или экономической величины. К ним относятся:

- производственная площадь предприятия;
- средняя фактическая продолжительность рабочего дня;
- среднее число клиентов в день;
- число сотрудников;
- температура в помещении и т. д.

Нечеткая переменная  $[1]f_i$ , входящая в состав кортежа  $E$ , задается в виде нескольких лингвистических термов с указанием принадлежности.

- сложность задачи (например, СЛОЖНАЯ с принадлежностью 0.7, ПРОСТАЯ с принадлежностью 0.3)

- квалификация сотрудников (ВЫСОКАЯ с принадлежностью 0.4, СРЕДНЯЯ с принадлежностью 0.6) и т. д.

Дискретная переменная может перейти в разряд нечетких переменных, если в выборе значения для дискретной переменной отсутствует определенность.

Таким образом, кортеж  $E$  может быть записан следующим образом:

$$E = (x_1, x_2, \dots, x_m, d_1, d_2, \dots, d_n, f_1, f_2, \dots, f_k).$$

Задача выбора необходимого комплекта оборудования заключается в установлении значений указанных переменных в непрерывном, дискретном или нечетком виде с дальнейшим соотносением полученного кортежа с характеристиками выбранного комплекта вычислительного оборудования.

Однако в исходном виде кортеж  $E$  не подходит для определения качества выбора вычислительного оборудования. Характеристика производственной задачи и условия ее выполнения диктуют определенный набор требований к характеристикам вычислительной техники.

$$R = (r, r_2, \dots, r_N).$$

Вектор требований представляет собой набор числовых значений, показывающий характеристики вычислительного комплекса, наиболее подходящие для данной производственной задачи и внешних условий. Очевидно, что вектор  $R$  и кортеж  $E$  могут быть связаны между собой неким оператором  $\Phi$ , который может быть представлен набором функционалов  $\varphi_j$ , вычисляющих значение каждой компоненты вектора  $R$ :

$$R = \Phi(E) = (\varphi_1(E), \varphi_2(E), \dots, \varphi_N(E)).$$

Несмотря на то, что кортеж  $E$  может иметь достаточно большое количество компонентов, многие из них влияют на различные компоненты вектора требований  $R$ . Следовательно, каждый из функционалов  $\varphi_j$  учитывает лишь некоторые компоненты кортежа  $E$ .

Реализация каждого из функционалов  $\varphi_j$  может быть различной, однако, учитывая тот факт, что расчет значения функционала  $\varphi_j$  в большинстве случаев является трудноформализуемой задачей, предлагается для построения функционалов  $\varphi_j$  использовать принципы нечеткого вывода [2], которые предполагают в каждом из функционалов следующие стадии вычислений.

1. Фаззификация используемых в функционале компонентов  $x_i$  кортежа  $E$ , являющихся непрерывными переменными - преобразование значения параметра в набор значений лингвистических переменных, для каждого из которых задается уровень принадлежности.

Например, значение непрерывного компонента “Численность сотрудников”, равному 100 человек, в соответствии с установленными экспертом правилами фаззификации может являться СРЕДНИМ (с принадлежностью 0.2), БОЛЬШИМ (с принадлежностью 0.7) и ОЧЕНЬ БОЛЬШИМ (с принадлежностью 0.1).

Фаззификацию не следует проводить для компонентов  $f_i$ , поскольку они уже являются нечеткими. Приведение дискретных компонентов  $d_i$  к лингвистическим переменным тривиально (каждому значению дискретной переменной ставится в соответствие значение лингвистической переменной).

2. Формирование набора логических заключений на основе лингвистической базы знаний - нечетких продукционных правил, отражающих знания экспертов о рассчитываемых требованиях к данной характеристике вычислительной техники в различных производственных задачах и при различных условиях. Нечеткие продукционные правила строятся по принципу «ЕСЛИ... ТО...» и содержат в правой части значения входных лингвистических переменных-факторов, а в правой – переменных-требований. Например:

*ЕСЛИ* “Численность”=БОЛЬШАЯ *И* “Сложность задачи” = ВЫСОКАЯ, *ТО* “Требуемый объем памяти” = БОЛЬШОЙ;

*ЕСЛИ* “Численность” = БОЛЬШАЯ *И* “Сложность задачи” = НИЗКАЯ, *ТО* “Требуемый объем памяти ” = СРЕДНИЙ.

В результате проверки каждого из продукционных правил и их аккумуляции формируется нечеткая переменная “Требуемый объем памяти” со своей функцией принадлежности.

3. Агрегирование и активизация нечетких продукционных правил, в результате которой определяется функция принадлежности переменных-требований к каждому терму.

4. Аккумуляция, заключающаяся в нахождении функции принадлежности для каждой из выходных переменных-требований. Выполняется объединение функций принадлежности всех подзаключений по принципу тах-объединения.

5. Дефазификация - приведение нечеткой переменной, полученной в результате применения нечеткой базы знаний, к четкому значению функционала  $\varphi_j$ .

В результате расчета каждого из функционалов  $\varphi_j$  формируется вектор требований  $R$ , для которого следует подобрать наилучшим образом соответствующий набор вычислительной техники.

В качестве множества элементов вычислительной техники, из которого осуществляется выбор, рассматривается каталог поставщика вычислительной техники (или объединенный каталог нескольких поставщиков). Если каталог содержит  $m$  товаров, то любому варианту выбора можно сопоставить вектор

$$Y = (y_1, y_2, \dots, y_m),$$

в котором элемент  $y_1$  равен единице, если товар закуплен и нулю, если нет.

Каждому варианту вектора  $Y$  можно поставить некий вектор параметров, характеризующий полученный вычислительный комплекс.

Однако до определения вектора параметров необходимо осуществить проверку вектора  $Y$  на соответствие логическим ограничениям по следующим показателям:

- обязательные/необязательные средства;
- совместимые/несовместимые средства;
- связанные/несвязанные средства.

Данные ограничения тесно связаны с группировкой средств вычислительной техники.

Определим множество групп

$$\{G_1, G_2, \dots, G_{Ng}\}.$$

Принадлежность к группам задается матрицей групповой принадлежности  $V^G$ , элемент  $v_{i,j}^G$  которой равен единице, если средству  $u_i$  входит в группу  $G_i$ .

Для описания реализации ограничений в автоматизированной системе в интерактивном режиме, введем логическую переменную  $F$  – флаг ошибки, обозначающий соответствие набора средств вычислительной техники ограничениям.  $F = 1$  означает, что средства набраны с ошибкой и продолжение работы автоматизированной системы невозможно до ее устранения. В данном случае система не может устранить ошибку самостоятельно и требуется вмешательство оператора.

Обязательность средства вычислительной техники осуществляется двумя векторами:

- *жесткая обязательность* – вектор  $L_j^1$  размером  $1 \times Ng$ ,  $i$ -й элемент которого равен единице, если в вычислительный комплекс должны входить **все** элементы группы  $G_i$ . В любой момент времени работы системы автоматически, вне зависимости от пожеланий оператора, должны быть выбраны средства вычислительной техники из групп, определяемых данным вектором.

- *нежесткая обязательность* – вектор  $L_j^2$  размером  $1 \times Ng$ ,  $i$ -й элемент которого равен единице, если в вычислительный комплекс должен входить **хотя бы один** элемент группы  $G_i$ . В любой момент времени система должна проверять группы, определяемые данным вектором. При нахождении групп, в которых ни одного элемента не выбрано, система выставляет флаг ошибки  $F$  и запрещает выполнение дальнейших расчетов.

Совместимость средств вычислительной техники задается вектором и матрицей:

- *поэлементная совместимость* – вектор  $L_j^3$  размером  $1 \times Ng$ ,  $i$ -й элемент которого равен единице, если в вычислительный комплекс может входить **только один** элемент из группы  $G_i$ . При выборе оператором элемента из группы  $G_i$  *автоматически* снимается выбор со всех остальных элементов данной группы.

- *групповая совместимость* – матрица  $L_j^4$  размером  $Ng \times Ng$ ,  $(i, j)$ -й элемент которой равен единице, если в вычислительный комплекс не могут одновременно входить элементы из групп  $G_i$  и  $G_j$ . При выборе любого элемента из группы  $G_i$  *автоматически* снимается выбор со всех элементов группы  $G_j$ .

Связь между элементами БЭВ задается двумя матрицами:

- жесткая связь – матрица  $L_j^5$  размером  $Ng \times Ng$ ,  $(i, j)$ -й элемент которой равен единице, если добавление в вычислительный комплекс средства из группы  $G_i$  требует добавить в вычислительный комплекс *все* элементы группы  $G_j$ . При выборе любого элемента из группы  $G_i$  автоматически выбираются все элементы группы  $G_j$ .

- нежесткая связь – матрица  $L_j^6$  размером  $Ng \times Ng$ ,  $(i, j)$ -й элемент которой равен единице, если добавление в вычислительный комплекс средства из группы  $G_i$  требует добавить в вычислительный комплекс *хотя бы один* элемент группы  $G_j$ .

При выборе оператором элемента из группы  $G_i$  система осуществляет проверку группы  $G_j$ , если ни один из элементов этой группы не выбран, система выставляет флаг ошибки  $F_i$  и запрещает выполнение дальнейших расчетов.

Для получения вектора  $P$  из вектора  $Y$  предлагается использовать обобщенное выражение

$$p_i = a_{i,1}y_1 * a_{i,2}y_2 * \dots * a_{i,m}y_m,$$

где  $m$  – количество средств вычислительной техники в каталоге;  $a_{i,j}$  –  $i$ -я техническая характеристика - госсредства вычислительной техники; \* – оператор, агрегирующий характеристики свойств вычислительной техники, если они закуплены одновременно.

В качестве данного оператора для каждого из свойств могут быть указаны:

- операция суммирования, если свойство вычислительного средства является аддитивным, например, «стоимость»:

$$p_i = a_{i,1}y_1 + a_{i,2}y_2 + \dots + a_{i,m}y_m,$$

- операция вычисления максимума, если характеристика средства вычислительной техники является конкурирующей по принципу «чем больше – тем лучше», например, «пиковая производительность»:

$$p_i = \max(a_{i,1}y_1, a_{i,2}y_2, \dots, a_{i,m}y_m),$$

- операция вычисления минимума, если характеристика средства вычислительной техники является конкурирующей по принципу «чем меньше – тем лучше», например, «вес самого легкого ноутбука»:

$$p_i = \min(a_{i,1}y_1, a_{i,2}y_2, \dots, a_{i,m}y_m),$$

- операция вычисления среднего значения, если характеристика средства является распределяемой величиной, например, «среднее время решения стандартной задачи»:

$$p_i = \frac{a_{i,1}y_1 + a_{i,2}y_2 + \dots + a_{i,m}y_m}{m},$$

- операция вычисления произведения, если характеристика средства является вероятностной величиной, например, «вероятность отказа за 1000 часов»:

$$p_i = a_{i,1}y_1 \cdot a_{i,2}y_2 \cdot \dots \cdot a_{i,m}y_m,$$

- операция подсчета различных значений, если характеристика средства является отличительным признаком, выбираемым из конечного множества значений, например, «Название производителя».

В результате применения указанных операций к каждой из характеристик формируется вектор характеристик набора вычислительной техники

$$P = (p_1, p_2, \dots, p_N).$$

Особенность данного сравнения в том, что пары значений  $p_i$  и  $r_i$  имеют одну и ту же единицу измерения.

Сравнение векторов  $P$  и  $R$  предлагается произвести, вычислив средний квадрат отклонения соответствующих компонентов данных векторов.

Однако для обеспечения корректности данного сравнения следует произвести нормирование параметров  $p_i$  и  $r_i$  для приведения их к единому числовому пространству:

$$P' = (p'_1, p'_2, \dots, p'_N) = (p_1/P_1^{max}, p_2/P_2^{max}, \dots, p_N/P_N^{max}),$$

$$R' = (r'_1, r'_2, \dots, r'_N) = (r_1/P_1^{max}, r_2/P_2^{max}, \dots, r_N/P_N^{max}).$$

Вычисление степени соответствия характеристик средств вычислительной техники рассчитанным требованиям производится следующим образом

$$Y = \sum_{i=1}^N c_i (p'_i - r'_i)^2.$$

Значения параметра  $Y$  трактуются следующим образом: чем ближе это значение к нулю, тем больше соответствие векторов  $P$  и  $R$ .

Расчет весовых коэффициентов  $c_i$ , задающих важность характеристики  $p_i$ , предлагается осуществлять с использованием парных сравнений [3]. При сравнении пары характеристик может использоваться, например, шкала следующего типа:

- 1 – равноценность;
- 3 – умеренное превосходство;
- 5 – сильное превосходство;
- 7 – очень сильное превосходство;
- 9 – высшее (крайнее) превосходство.

Лицо, принимающее решение, должно попарно сравнить важность характеристик. Результат парных сравнений характеристик записывается в виде таблицы, в ячейки которой заносится численное значение превосходства одной характеристики над другой (используются как числа от 1 до 9, так и числа, обратные им – от 1/9 до 1). Далее простые дроби переводятся в десятичные, а таблица дополняется столбцом  $c_i$ , значения в котором рассчитываются как сумма по строке.

Значения, полученные в столбце, используются в качестве весовых коэффициентов при определении параметра  $Y$ .

Приведенные принципы и подходы позволяют воспользоваться любым известным методом дискретной оптимизации (градиентный спуск, метод ветвей и границ, динамическое программирование) для определения

наиболее эффективного по сформированному критерию набора вычислительной техники, что может существенно снизить неоправданные затраты на оснащение предприятия вычислительными ресурсами и повысить качество информационной поддержки его деятельности.

### **Список литературы**

1. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 166 с.
2. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzy TECH. Санкт-Петербург: Изд-во «БХВ-Петербург», 2005. 736 с.
3. Саати Т.Л. Об измерении неосязаемого. Подход к относительным измерениям на основе главного собственного вектора матрицы парных сравнений // Журнал "Cloud Of Science", 2015. Т. 2. № 1.

*Новиков Алексей Владимирович, канд. техн. наук, доц., [novikov82@gmail.com](mailto:novikov82@gmail.com), Россия, Тула, Тульский государственный университет*

#### ***AUTOMATION OF THE CHOICE OF COMPUTER AIDS FOR THE ORGANIZATION***

*A.V. Novikov*

*The approach allowing to automate selection process of computer aids for the organization is considered. Mechanisms of reduction of the factors characterizing a production task to a set of requirements to parameters of computer facilities are shown. The principles of aggregation of parameters of computing means in case of their application as a part of complexes are described.*

*Key words: computer aids equipment, organization, factors, requirements, characteristics.*

*Novikov Aleksey Vladimirovich, candidate of technical sciences, docent, [novikov82@gmail.com](mailto:novikov82@gmail.com), Russia, Tula, Tula State University*

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ОБЩЕГО АЛГОРИТМА РАБОТЫ МОДУЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ «МАТЕРИНСКИЙ СКРИНИНГ»**

Н.С. Просоедова, А.Г. Трошина

*Сформированы общий алгоритм работы и структура модуля прогнозирования автоматизированной системы «Материнский скрининг». Проведены анализ и выбор на его основе технологий и подходов к разработке модулей автоматизированной системы. Разработана и нормализована база данных на основе предложенной ранее концептуальной модели.*

*Ключевые слова: материнский скрининг, пренатальный скрининг, биохимический скрининг, нейронные сети, прогнозирование, разработка, нормализация.*

В настоящее время все будущие мамы проходят скрининговые исследования. Пренатальный скрининг – комплекс массовых диагностических мероприятий у беременных для поиска грубых аномалий развития и косвенных признаков (маркеров) патологии плода. В медицине под скринингом понимают простые, безопасные массовые (большой группе населения) исследования с целью выделения групп повышенного риска. Пренатальный скрининг включает в себя: ультразвуковое исследование (УЗИ) плода в течение беременности (ультразвуковой скрининг) и исследование крови для определения некоторых специфических веществ («маркеров»), которые изменяются при определенных патологиях [1] (биохимический скрининг).

Наиболее актуальной проблемой при проведении биохимического скрининга в медико-генетических консультациях является точность рассчитываемой вероятности развития патологий плода или некорректно протекающей беременности. Было выявлено, что на точность результатов биохимического скрининга значительное влияние оказывает группа факторов, связанная с реактивами, которые используются в ходе анализов, проводимых лабораторией.

Была разработана математическая модель на основе работ [2] – [4], которая учитывает эти факторы путем ограничения рассматриваемого периода интервалом использования одной и той же партии реактивов, что дает некоторое повышение точности результатов скрининга. Данная модель также учитывает уточнение медианных отклонений маркеров (далее – МОМ) с течением времени и накоплением данных об исследованиях.

Для реализации указанных особенностей модели требуется разработка отдельного модуля АС, который будет определять примерный период пригодности к использованию реактивов, примерную дату их замены, а

также планировать календарь перерасчета с целью уточнения МОМов и проверки точности и корректности их значений. Таким модулем является модуль прогнозирования АС.

Модуль прогнозирования представляет собой совокупность методов и функций для составления календаря перерасчета таблицы МОМов и определения путем прогнозирования периода пригодности реактивов. Основной задачей модуля является определение периода пригодности реактивов, так как задача составления календаря уточнения таблицы МОМов может быть полностью реализована на промежуточных данных, получаемых в ходе прогнозирования. Рассмотрим подробнее алгоритм работы модуля.

В настоящее время методы прогнозирования достаточно широко используются для решения различного рода задач. Существуют несколько основных методов прогнозирования временных рядов, среди которых наиболее часто применяются методы прогнозирования на нейронных сетях [5] и авторегрессионные модели прогнозирования [6]. В модуле прогнозирования разрабатываемой АС был выбран метод прогнозирования на нейронных сетях. Общий алгоритм работы модуля представлен на рис. 1.

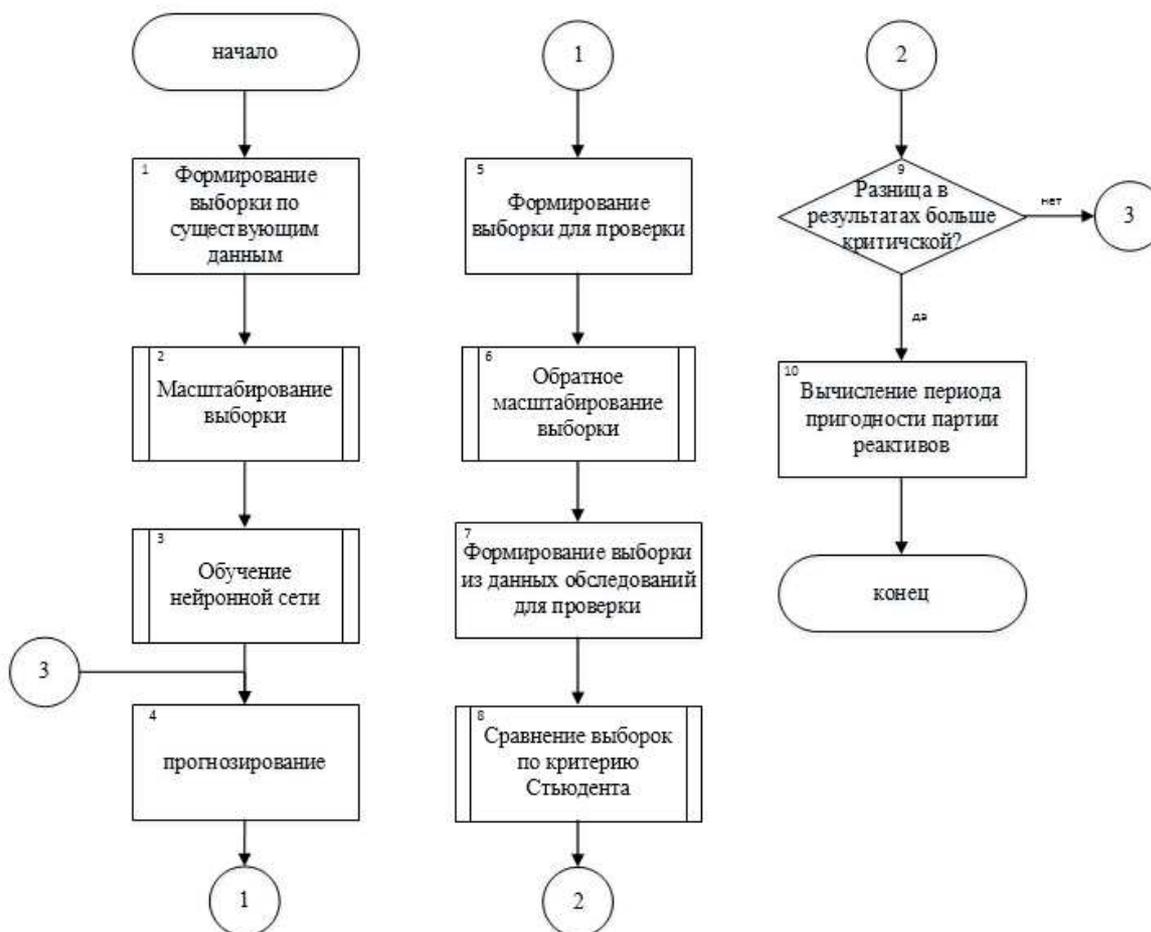


Рис. 1. Алгоритм работы модуля прогнозирования АС

При разработке модуля прогнозирования не требуется создавать нейронную сеть с нуля – будет использована модификация нейронной сети [7] из учебника Хайкина [5]. Данная модификация, как и оригинальная нейронная сеть, разработана под математический пакет MatLab [8] и свободно может быть интегрирована в проект АС в качестве библиотеки. Для использования этой нейронной сети необходимо подготовить данные. Для этого необходимо сформировать выборку из данных обследований (шаг 1) и масштабировать её до интервала варьирования значения [0,1] (шаг 2). Далее производится обучение нейронной сети (шаг 3) и выполняется прогнозирование (шаг 4). Получив выборку в результате прогнозирования, формируем выборку для проверки (шаг 5) методом Стьюдента и выполняем обратное масштабирование (шаг 6). На данном этапе сформирована одна из выборок для проверки. Следующим шагом формируем из данных обследований вторую выборку и сравниваем её с выборкой, полученной на шаге 6, по критерию Стьюдента. На этом шаге аналитический модуль АС генерирует новую таблицу МОМов, рассчитанную на основе прогнозируемых данных, а также – результаты сравнения этих таблиц по критерию Стьюдента. Если разница критическая, имеется возможность рассчитать период пригодности реактивов, на основе полученных в ходе работы модуля данных. Если же результат приемлем, необходимо вернуться к шагу 4 и повторить процесс прогнозирования и расчетов на уже обученной сети.

Описанный алгоритм формирует «скользящее окно», которое сканирует данные после прогноза и проверяет, критичны ли изменения результата, или в пределах нормы. Основываясь на этой информации, можем составить календарь перерасчета таблицы МОМов.

На этом этапе проектирования АС «Материнский скрининг» заканчивается формирование структуры алгоритмов работы модулей системы. Следующий этап – выбор технологий реализации АС.

Предполагается, что приложение будет настольным с локальной базой данных (БД). Наличие локальной БД устранил необходимость установки дополнительного программного обеспечения для её поддержки и работоспособности. В связи с указанными особенностями разработки будут использованы следующие языки и технологии:

база данных: MySQL;

язык разработки: C#;

интерфейс модулей АС: WPF;

подход к программированию модулей АС: объектно-ориентированный, с использованием паттерна MVVM;

подключение к БД с использованием Entity Framework Code First.

Данный набор подходов и технологий выбран потому, что является наиболее популярным набором для разработки настольных бизнес-приложений. Это облегчает процесс разработки, так как на сегодняшний день для этого набора технологий и подходов существует немало разработанных и обкатанных решений.

Итак, основной набор средств и концепций разработки определен. Переходим к непосредственно разработке АС.

Ранее была спроектирована концептуальная схема базы данных АС (рис. 2). Данная схема отражает минимальный необходимый для функционирования АС набор данных. Прежде, чем приступить к реализации БД, внесем несколько дополнительных таблиц и полей.

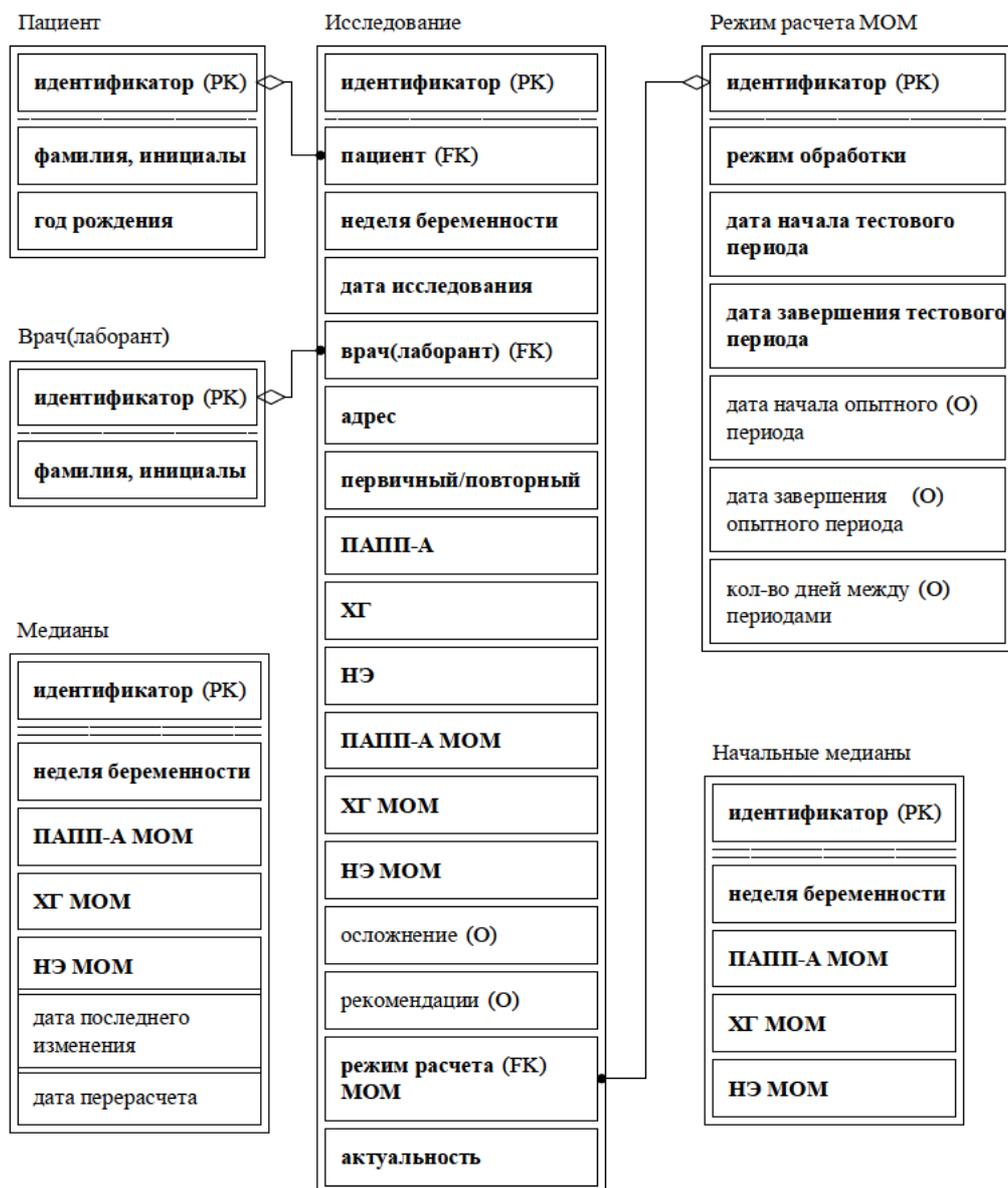


Рис. 2. Концептуальная схема базы данных

Для корректной генерации отчетов потребуется дополнительная информация об анализируемом материале, возможных рекомендациях и осложнениях. Для каждого из перечисленных полей информации возможно излишнее дублирование, поэтому согласно правилам нормализации БД выносим их в отдельные таблицы.

В ходе реализации БД будем использовать подход Entity Framework Code First. Согласно этому подходу сначала разрабатывается модель БД и определяются параметры подключения к ней. При первом запуске приложения Entity Framework обнаруживает модель БД и по указанной строке подключения генерирует базу данных в соответствии с моделью. Полученная структура БД представлена на рис. 3.

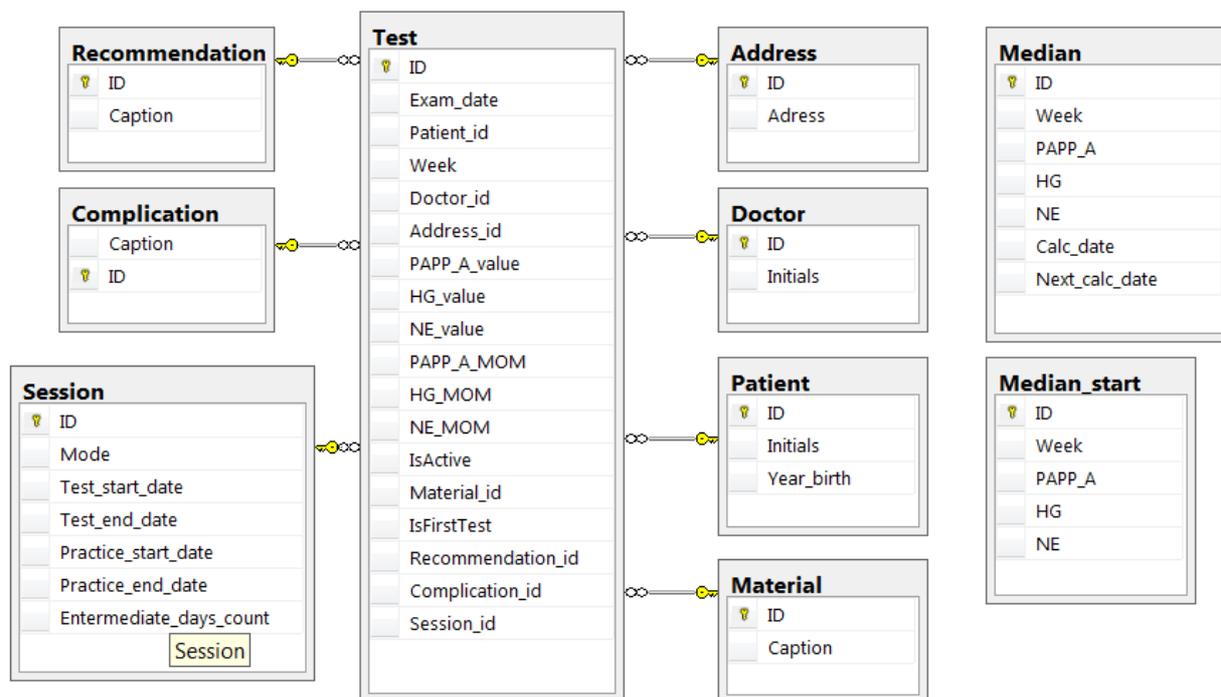


Рис. 3. Диаграмма базы данных

Основной таблицей, хранящей общую информацию об исследованиях пациентов, является таблица Test. Таблица Address хранит адреса учреждений, в которых (для которых) проводятся исследования. Таблица Doctor хранит информацию о враче (лаборанте), проводящем исследование. Информация о пациенте хранится в таблице Patient. Для информации о материале, принятом на исследование, разработана таблица Material. Возможные осложнения, возникающие во время беременности, представлены в таблице Complication. В зависимости от отклонений, выявленных в процессе исследования, врач дает рекомендации, основные варианты которых представлены в таблице Recommendation. Информация о статистических данных исследований представлены в таблицах Session (о способе расчета показателей), Median (используемые для расчетов медианы по каждой неделе беременности), Median\_start (начальные стабильные медианы, которые требуются для прогнозирования даты смены реактивов).

Таким образом, разработка БД АС полностью зависит от составленной модели БД. Дальнейшая модификация модели должна сопровождаться добавлением миграций в БД.

Таким образом, был разработан алгоритм работы модуля прогнозирования АС, выбран набор технологий и подходов, который позволит наиболее просто и эффективно реализовать весь требуемый функционал, реализована модель и сама база данных автоматизированной системы, которая является основным и общим компонентом системы.

### **Список литературы**

1. Блог акушера-гинеколога Владимира Сурякова [Электронный ресурс] // Пренатальный скрининг [сайт]. URL: <http://www.sursyakov.ru/prenatalnyj-skrining.html> (дата обращения: 25.09.2016).

2. Павлов О.Г., Кисилева А.Ю. Программа для обеспечения материнского скрининга на альфа-фетопротеин и хорионический гонадотропин. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2010610951, Российская Федерация, заявл. 07.12.2009; зарегистрировано 29.01.2010.

3. Павлов О.Г., Кисилева А.Ю. Программа для расчета параметров альфа-фетопротеина и хорионического гонадотропина при обследовании беременных. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2010615296, Российская Федерация, заявл. 28.06.2010; зарегистрировано 18.08.2010.

4. Павлов О.Г., Кисилева А.Ю., Клыков А.В. Программа для обеспечения биохимического скрининга беременных. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014613628, Российская Федерация, заявл. 07.02.2014; зарегистрировано 01.04.2014.

5. Хайкин, Саймон X15 Нейронные сети: полный курс. 2-е изд. / пер. с англ. М.: Издательский Дом "Вильямс", 2006. 1104 с.

6. Box G., Jenkins G.M., Reinsel G. Time Series Analysis: Forecasting & Control, Prentice Hall – 1994. 614 p.

7. Чучуева И. Создаем нейронную сеть для прогнозирования временного ряда [Электронный ресурс] // Математическое бюро [сайт]. URL: <http://www.mbureau.ru/blog/sozdaem-neyronnuyu-set-dlya-prognozirovaniya-vremennogo-ryada> (дата обращения: 25.09.2016).

8. MATLAB [Электронный ресурс] // MathWorks, центр компетенций [сайт]. URL: <http://matlab.ru/products/matlab> (дата обращения: 25.09.2016).

*Просоедова Надежда Сергеевна, магистрант, [nadezhda.sergienko7116@yandex.ru](mailto:nadezhda.sergienko7116@yandex.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

*Трошина Анна Геннадьевна, канд. техн. наук, доц., [atroshina@mail.ru](mailto:atroshina@mail.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет*

*DESIGN OF THE FORECASTING MODULE'S STRUCTURE AND ALGORITHM  
OF AUTOMATED SYSTEM "MATERNAL SCREENING"*

*N.S. Prosoedova, A.G. Troshina*

*Base algorithm and structure of the forecasting module's for automated system "Maternal screening" was designed. Different technologies and patterns were considered and the most suitable of them was chosen. Based on the conceptual scheme that was offered earlier the database and entity model was developed and normalized.*

*Key words: maternal screening, prenatal screening, biochemical screening, neuron networks, forecasting, developing, normalizing.*

*Prosoedova Nadezhda Sergeevna, master, [nadezhda.sergienko7116@yandex.ru](mailto:nadezhda.sergienko7116@yandex.ru),  
Russia, Tula, Tula State University,*

*Troshina Anna Gennad'evna, candidate of technical sciences, docent, [atroshina@mail.ru](mailto:atroshina@mail.ru),  
Russia, Tula, Tula State University*

УДК 004.77:004.424

**РАЗРАБОТКА SAAS-ПОДСИСТЕМЫ ПОИСКА  
И АНАЛИЗА РЕЗЮМЕ НА ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСАХ**

**М.А. Сафронова, Е.А. Арефьева, А.С. Панченко**

*Рассмотрен подход к построению подсистем поиска и анализа резюме на Интернет-ресурсах с использованием SAAS-технологий.*

*Ключевые слова: резюме, управление персоналом, автоматизированные системы управления персоналом, облачные технологии.*

Характерной чертой нашего времени являются интенсивно развивающиеся процессы информатизации практически во всех сферах человеческой деятельности. На любом предприятии отдел кадров выполняет трудоемкую работу по подбору и анализу резюме на вакантные места на предприятии.

Спрос на персонал постоянно растет, растут и требования к отбору кандидатов, соискателей, а также к общему управлению персоналом (HRM).

В настоящее время HR-службы (аббревиатура англ. слов Human Resources, дословно переводится как "человеческие ресурсы") в процессе подбора работников сталкиваются с рядом проблем.

### **1. Сложность с массовым отбором кадров.**

Все чаще речь идет не о точечном, индивидуальном отборе, а о массовом рекрутинге, когда нужно за короткий срок подобрать множество кандидатов одновременно. И сделать это не только быстро, но и максимально эффективно (да еще и с минимальными затратами). Чтобы реализовать такой большой проект, необходимо преодолеть ряд трудностей: управление огромным объемом информации, множеством ресурсов и каналов.

### **2. Неэффективный внешний подбор кадров.**

В наше время большим спросом пользуются услуги рекрутинговых агентств и агентов. Использование такого метода поиска и подбора кандидатов значительно экономит время кадровиков компании.

### **3. Неэффективный внутренний подбор кадров.**

Бывают ситуации, когда сами клиенты рекрутинговых агентств не всегда могут правильно сформулировать свои требования, но ждут, что их заказ будет выполнен на высшем уровне.

Эффективно решить все указанные проблемы и задачи можно лишь с помощью автоматизации процессов поиска, привлечения, подбора и учета кадров (а также других бизнес-процессов, связанных с кадровой работой: оценкой, адаптацией, обучением персонала и т.д.).

Автоматизация подбора сотрудников позволяет:

- сократить трудозатраты, связанных с планированием и реализацией подбора кадров;
- минимизировать расходы на подбор кадров;
- ускорить поиск и привлечение кандидатов;
- обеспечить постоянный рост базы потенциальных кандидатов;
- осуществить грамотный учет соискателей и исключить потерю данных;
- проводить качественную, полноценную проработку каждого резюме;
- увеличить рост конверсии потенциальных кандидатов, соискателей в трудоустроившихся сотрудников, работников;
- увеличить эффективность рекламных и PR-мероприятий (public relations, или связи с общественностью), направленных на поиск и привлечение кандидатов;
- обеспечить оптимизацию управления HR-направлением компании (отделом по работе с персоналом, кадровой службой, отделом кадров) [1].

Для реализации всех упомянутых задач нужна комплексная автоматизация работы с персоналом, комплексное автоматизированное решение, полноценная многофункциональная HRM-система, которая поможет формализовать и отладить в единой информационной среде все бизнес-процессы, связанные с управлением кадрами, в том числе – с подбором.

В настоящее время для российского пользователя представлено ограниченное количество автоматизированных систем управления процессом подбора персонала. Наиболее популярными среди них являются E-staff Рекрутер и Experium, решение от компании SAP – E-Recruiting, Резюмекс. E-staff на сегодняшний день занимает позицию лидера на правах старейшей автоматизированной системы по управлению процессом подбора персонала.

Преимущества той или иной системы могут быть связаны с дополнительными возможностями программ: возможностью удаленной работы, интеграции программы с сайтами поиска работы и корпоративным сайтом, возможностью работы с социальными сетями, работы на мобильных устройствах. В связи с тенденциями в разработке автоматизированных систем подбора персонала, целесообразна разработка автоматизированной системы или подсистемы, использующей облачную технологию SaaS – «программное обеспечение как услуга».

Основные особенности SaaS-технологии:

- пользователи услуги не платят за обновления, установку, обслуживание используемого аппаратного и программного обеспечения;
- улучшение и обновление сервиса осуществляется прозрачно для пользователей – им не нужно вручную производить для этого какие-либо манипуляции;
- за использование сервиса поставщик взимает оплату. Цена определяется продолжительностью доступа к услуге (например, за месяц) или объемом выполненных операций [2].

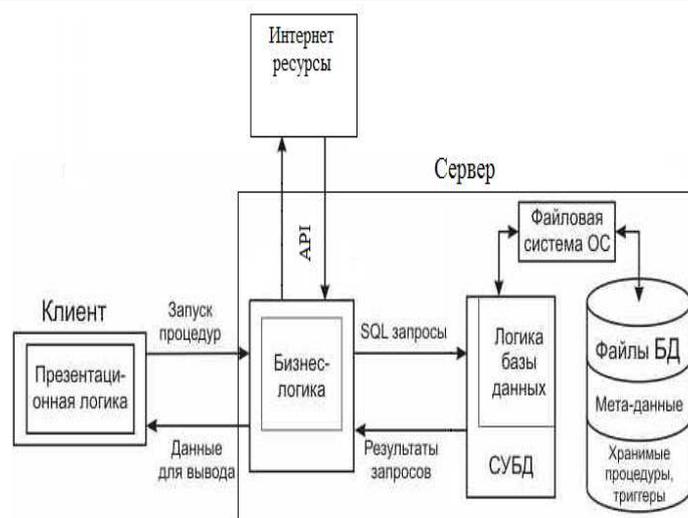
В этой модели поставщик сервиса использует свое разработанное интернет-приложение и предоставляет возможность потребителям пользоваться им через всемирную сеть Internet. По данным Freeform Dynamics 75% компаний считают использование SaaS безопасным для своих критических данных [3].

Входными данными предлагаемой подсистемы «ППиАР», использующей технологию SAAS, являются следующие.

**1. Область поиска решения.** Представляют собой ограничение области поиска решения в виде выбора региона поиска, количества выводимых записей, даты публикации на сайте.

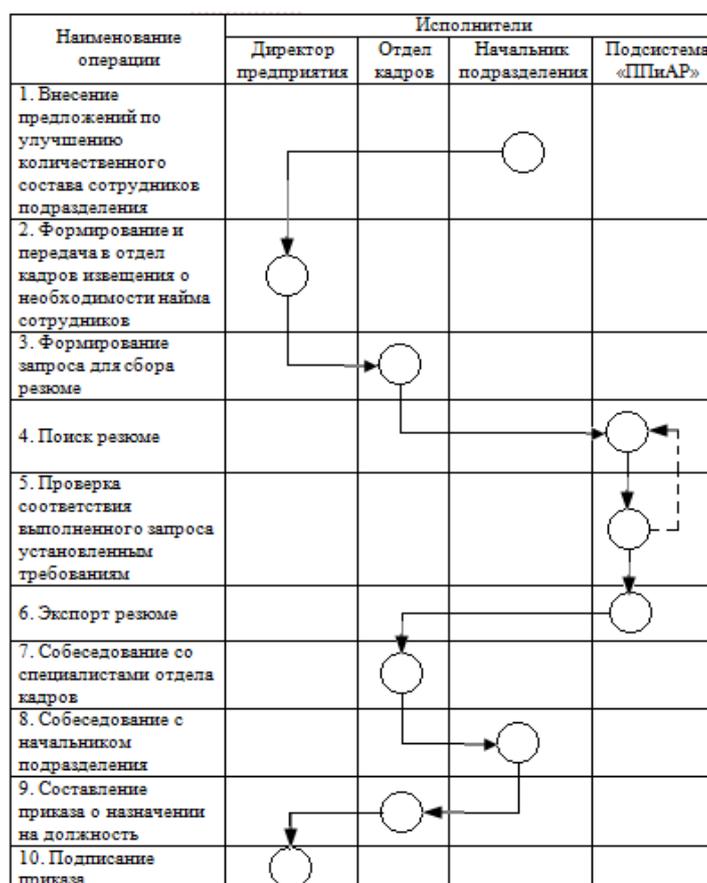
**2. Критерии поиска решения.** Представляют собой требования, предъявляемые предприятием к потенциальным соискателям. Основные критерии поиска в подсистеме «ППиАР»: стаж работы, возраст, пол, знание иностранного языка, уровень образования, желаемая заработная плата, тип занятости, опыт работы, должность и т.п.

В рассматриваемой подсистеме «ППиАР» данные передаются между клиентом и сервером. При этом прямая передача имеет ряд ограничений. В связи с этим для хранения информации используется временное хранилище (рис. 1).



**Рис. 1. Схема организации информационной базы в подсистеме «ППиАР»**

Для планирования и контроля за ходом выполнения процесса подбора резюме, соответствующего требованиям, используются оперограммы. На рис. 2 представлена оперограмма процесса подбора персонала на предприятие.



**Рис. 2. Оперограмма процедуры отбора и приема персонала на предприятие с использованием подсистемы «ППиАР»**

Оперограммы отдельных процедур по управлению персоналом относятся к числу организационно-регламентирующих документов и представляют собой таблицу с перечнем управленческих работ и их исполнителей. Операция изображается кружком. Связь между операциями указывается сплошной стрелкой. Штриховая стрелка, направленная острием к одной из предыдущих операций, указывает на необходимость выполнения части операций при невыполнении некоторого условия (в данном случае несоответствие найденного резюме установленным критериям).

Подсистема «ППиАР» содержит следующие модули:

- модуль сбора информации;
- модуль подготовки шаблонов HTML-страниц;
- модуль вывода обработанной информации через web-интерфейс;
- модуль резервного копирования баз данных.

Рассмотрим каждый модуль отдельно.

**Модуль сбора информации** состоит из следующих блоков (рис. 3):

- блок считывания конфигурационной информации;
- блок аутентификации, запрашивающий параметры авторизации на сервере для доступа к данным;
- блок загрузки данных;
- блок обработки и сохранения данных в таблицах БД.

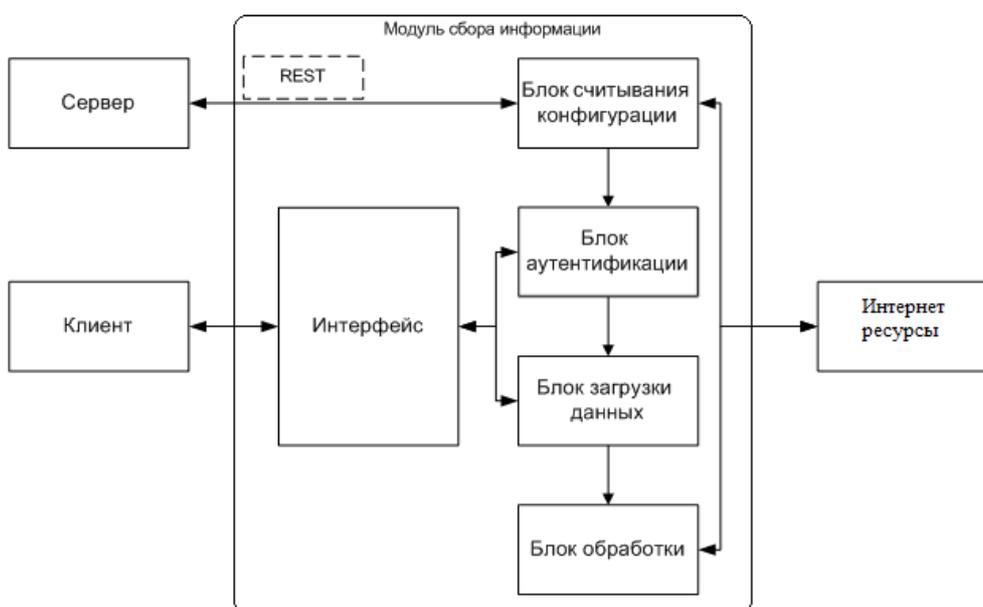


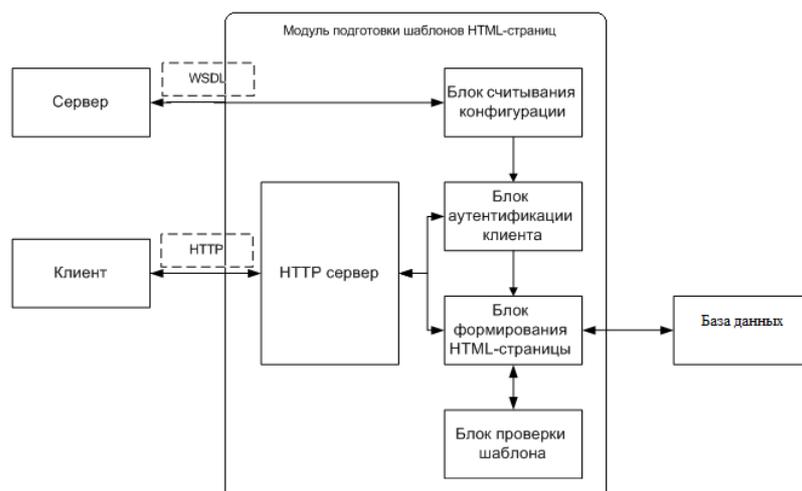
Рис. 3. Архитектура модуля сбора информации в подсистеме «ППиАР»

Конфигурационные параметры модуля хранятся в специальном каталоге, где указывается список аутентификационных данных для доступа к серверу.

**Модуль подготовки шаблонов HTML-страниц** предназначен для подготовки шаблонов и соответствующей им метаинформации описания, проверки их синтаксической и семантической корректности.

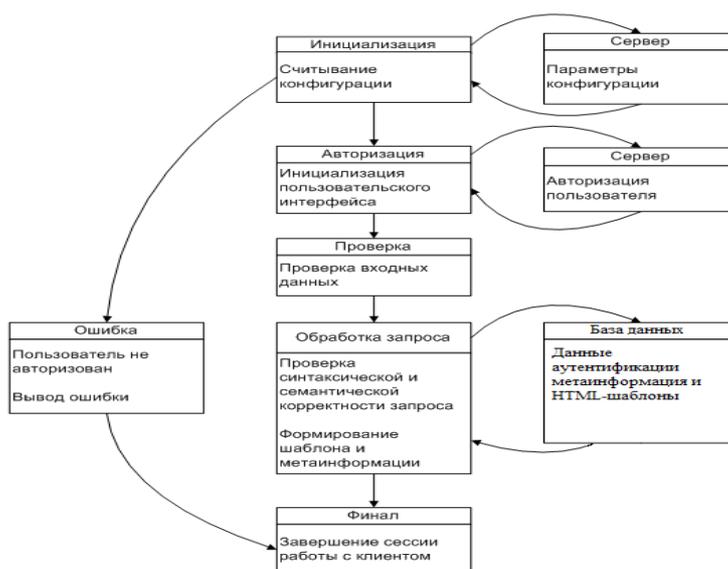
Модуль подготовки шаблонов HTML-страниц состоит из следующих блоков (рис. 4):

- блок считывания конфигурационной информации;
- web-сервер для взаимодействия с клиентом;
- блок аутентификации клиента;
- блок формирования HTML-страницы;
- блок проверки корректности шаблона HTML-страницы.



**Рис. 4. Архитектура модуля подготовки шаблонов HTML-страниц в подсистеме «ППиАР»**

Сгенерированный шаблон сохраняется на сервере вместе с метаинформацией. Для получения доступа к страницам сервиса требуется авторизация клиента. Проверка пароля и прав доступа выполняется через запрос к каталогу. На рис. 5 представлена функциональная схема модуля подготовки шаблонов HTML-страниц.

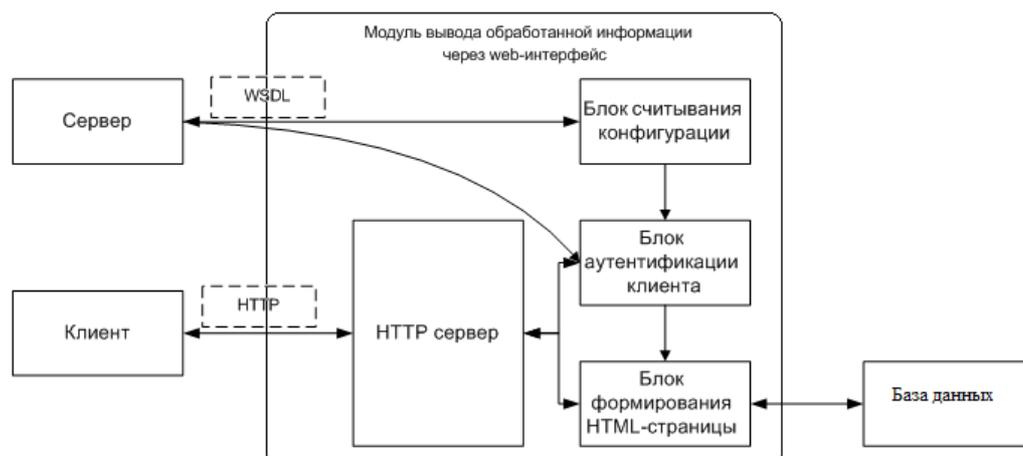


**Рис. 5. Функционирование модуля подготовки шаблонов HTML-страниц в подсистеме «ППиАР» на сервере**

**Модуль вывода обработанной информации через web-интерфейс** предназначен для предоставления клиенту web-доступа к обработанной информации в удобной и доступной форме.

Модуль вывода обработанной информации через web-интерфейс состоит из следующих блоков (рис. 6):

- блок считывания конфигурационной информации;
- web-сервер для взаимодействия с клиентом;
- блок авторизации клиента;
- блок формирования HTML-страницы.



**Рис. 6. Модуль вывода обработанной информации в подсистеме «ППиАР» через web-интерфейс**

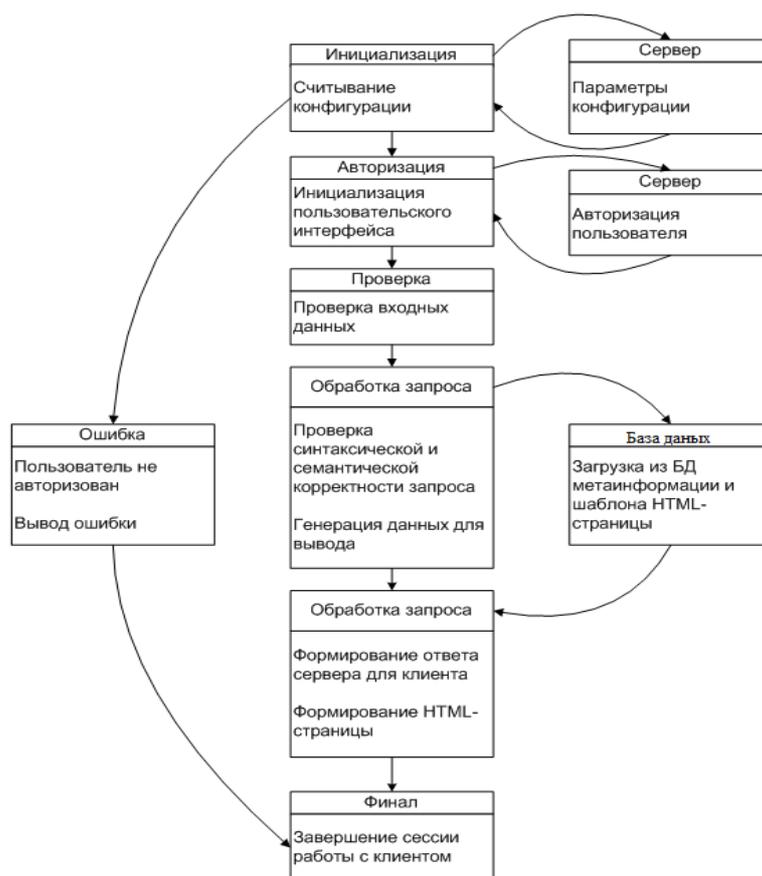
Конфигурационные параметры модуля хранятся в каталоге.

Для получения доступа к страницам сервиса требуется авторизация клиента. Проверка пароля и прав доступа выполняется через запрос к каталогу.

После успешного входа в систему пользователю предоставляется возможность посмотреть имеющиеся в подсистеме данные. Однако список возможных записей, доступных для просмотра, определяется разработчиком сервера, который сформировал соответствующие шаблоны и условия для модуля генератора HTML-страниц.

На рис. 7 представлена функциональная схема модуля вывода обработанной информации через web-интерфейс. Генерация страницы с запрошенной клиентом информацией выполняется на основе метаинформации, описывающей шаблон, условия применимости и имени таблицы, содержащей подготовленные для вывода данные.

При формировании web-страницы из сервера считываются метаинформация и шаблон запроса, выполняются необходимые подстановки и проверки, после чего формируется запрос к сгенерированной заранее таблице, содержащей шаблон HTML-страницы. Результат выводится пользователю в виде таблицы (рис. 8).



**Рис. 7. Функционирование модуля вывода обработанной информации в подсистеме «ППиАР» через web-интерфейс**

SaaS system +7 123456

Отрасль     Опыт работы     Знание иностранного языка   
 Регион     Пол     Возраст соискателя   
 Зарплата     Тип занятости     Должность

Количество записей на странице:

Список резюме

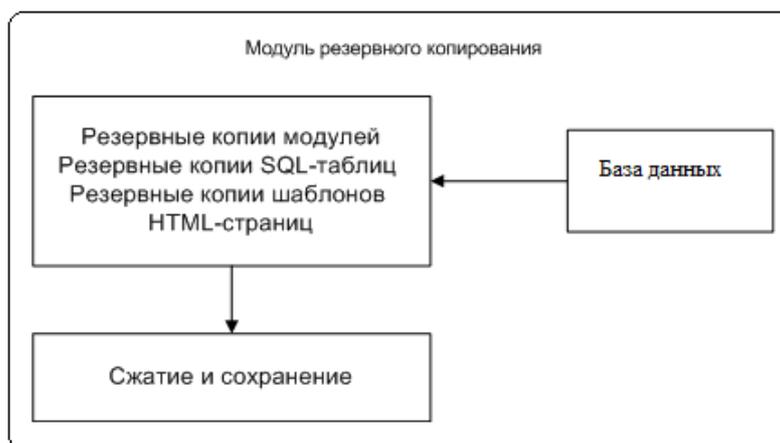
<input type="checkbox"/>	#	Отрасль	Соискатель
<input type="checkbox"/>	0	Информационные технологии	Петров Иван Васильевич
<input type="checkbox"/>	1	Информационные технологии	Моренко Игорь Александрович
<input type="checkbox"/>	2	Информационные технологии	Кулаков Владимир Петрович
<input type="checkbox"/>	3	Информационные технологии	Савушкина Наталия Ивановна
<input type="checkbox"/>	4	Информационные технологии	Мартынова Марина Алексеевна

**Рис. 8. Видеокادر «Вывод запрашиваемой информации в виде таблицы» в подсистеме «ППиАР»**

Модуль резервного копирования предназначен для сохранения конфигураций модулей и шаблонов HTML-страниц.

Информация, сохраняемая в модуле резервного копирования, позволяет полностью восстановить работоспособность системы при возможных сбоях оборудования.

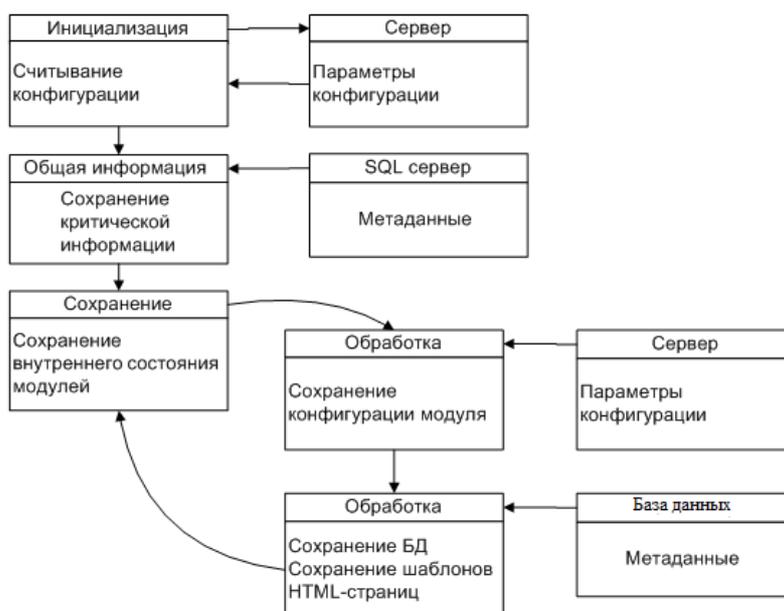
Модуль резервного копирования (рис. 9) запускается сервером и выполняет сохранение конфигураций модулей и шаблонов HTML-страниц



**Рис. 9. Модуль резервного копирования в подсистеме «ППиАР»**

После восстановления конфигураций модулей и шаблонов из резервных копий модуль генератора шаблонов HTML-страниц самостоятельно сформирует все необходимые таблицы подсистемы «ППиАР».

На рис. 10 представлена функциональная схема модуля резервного копирования.



**Рис. 10. Функционирование модуля резервного копирования в подсистеме «ППиАР»**

Периодичность сохранения и список сохраняемых таблиц указываются в специальном каталоге и конфигурационном файле модуля.

В результате работы подсистемы «ППиАР» формируется перечень резюме с требуемыми критериям отбора по претендентам.

### **Список литературы**

1. Повышение эффективности подбора персонала за счет автоматизации процесса [Электронный ресурс]. URL: <http://efsol.ru/articles/recruiting-automation.html> (дата обращения 20.09.2016).

2. Облачные системы [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kcc.ru/services/oblachnye-vychisleniya-servisy> (дата обращения 11.09.2016).

3. Freeform Dynamics [Электронный ресурс]. URL: <http://www.freeformdynamics.com> (дата обращения 26.09.2016).

4. Повышение эффективности подбора персонала за счет автоматизации процесса [Электронный ресурс]. URL: <http://efsol.ru/articles/recruiting-automation.html> (дата обращения 26.04.2016).

5. Системы управления персоналом [Электронный ресурс]. URL: <http://efsol.ru/solutions/hrm-automation.html> (дата обращения 26.04.2016).

*Сафронова Марина Алексеевна, канд. техн. наук, доц., [safronovama@rambler.ru](mailto:safronovama@rambler.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

*Арефьева Елена Анатольевна, канд. техн. наук, доц., [ar\\_el\\_an@mail.ru](mailto:ar_el_an@mail.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

*Панченко Андрей Сергеевич, студент, [safronovama@rambler.ru](mailto:safronovama@rambler.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет*

#### **DEVELOPMENT OF SAAS-SUBSYSTEM SEARCH AND ANALYSIS SUMMARY OF RESOURCES ON THE INTERNET**

*M.A. Safronova, E.A. Arefeva, A.S. Panchenko*

*An approach to the construction of the search and analysis of subsystems resume on Internet resources using SAAS-technologies.*

*Key words: resume, human resources management, automated personnel management systems, cloud technology.*

*Safronova Marina Alekseevna, candidate of technical sciences, docent, [safronovama@rambler.ru](mailto:safronovama@rambler.ru), Russia, Tula, Tula State University,*

*Aref'eva Elena Anatol'evna, candidate of technical sciences, docent, [ar\\_el\\_an@mail.ru](mailto:ar_el_an@mail.ru), Russia, Tula, Tula State University,*

*Panchenko Andrej Sergeevich, student, [safronovama@rambler.ru](mailto:safronovama@rambler.ru), Russia, Tula, Tula State University*

## КОНЕЧНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ СПЛОШНОГО ЦИЛИНДРА ИЗ НЕСЖИМАЕМОГО УПРУГОГО АНИЗОТРОПНОГО МАТЕРИАЛА

М.Ю. Соколова, В.В. Рудаков

*Получено аналитическое решение задачи об определении напряженно-деформированного состояния сплошного анизотропного цилиндрического тела из несжимаемого материала в рамках тензорно-линейной связи между напряжениями и конечными деформациями. Рассмотрены цилиндры из однородных и неоднородных в отношении упругих свойств материалов. Исследовано влияние неоднородности на характер распределения напряжений в цилиндре.*

*Ключевые слова: конечные деформации, несжимаемость, цилиндрическая ортотропия, сплошной цилиндр, кручение.*

**Введение.** В данной работе рассматривается анизотропный цилиндр, находящийся под действием крутящего момента и осевой силы. Материал цилиндра полагается цилиндрически ортотропным. Такой вид анизотропии является криволинейным, то есть характеризуется тем, что для разных его точек эквивалентными являются направления не параллельные, а подчиненные каким-то другим закономерностям. Если выбрать систему криволинейных ортогональных координат так, чтобы координатные направления ее в каждой точке совпадали с эквивалентными направлениями (в отношении упругих свойств), то бесконечно малые элементы, выделенные тремя парами координатных поверхностей, будут обладать одинаковыми упругими свойствами. Наоборот, элементы, образованные тремя парами ортогональных плоскостей, будут иметь, вообще говоря, различные упругие свойства.

Моделирование поведения цилиндра при такой общей схеме нагружения позволяет рассмотреть два частных случая, соответствующих схемам известных экспериментов [2]. В экспериментах со сплошными цилиндрами могут быть реализованы схемы нагружения, соответствующие простому и чистому кручению [2]. Под простым кручением цилиндрического образца понимают схему деформирования с зажатými торцами, а под чистым кручением – схему деформирования со свободными торцами.

В большинстве исследований [1, 4, 5, 8, 12] конечные деформации сплошного цилиндра при кручении рассматриваются в рамках гипотезы несжимаемости материала. В этом случае деформация цилиндра носит универсальный характер [5, 12]. В рамках различных определяющих соотношений нелинейной теории упругости удаётся описать экспериментально наблюдаемые эффекты при конечном кручении цилиндра [12], состоящие в удлинении цилиндра при чистом кручении и появлении осевой силы при простом кручении.

Задачи по определению напряжённо-деформированного состояния сплошного цилиндрического образца для изотропных упругих несжимаемых материалов в рамках различных моделей решены в работах [3, 4, 6, 10, 11].

**1. Основные гипотезы и допущения.** Рассматривается бесконечно длинный сплошной круговой цилиндр, находящийся под действием крутящего момента и осевой силы. Цилиндр изготовлен из несжимаемого упругого материала. Материал цилиндра обладает криволинейной анизотропией свойств и полагается цилиндрически ортотропным. Будем считать, что одна из осей анизотропии материала совпадает с осью цилиндра, а две другие лежат в поперечной плоскости. Известно [7], что в этом случае ненулевые значения имеют технические упругие характеристики  $E_r = E_\varphi$ ,  $E_z$  - модули Юнга;  $\nu_{r\varphi}, \nu_{\varphi r}, \nu_{zz}, \nu_{zr}, \nu_{\varphi z} = \nu_{z\varphi}$  - коэффициенты Пуассона,  $G_{rz} = G_{\varphi z}$ ;  $G_{r\varphi}$  - модули сдвига. В обозначениях упругих характеристик использованы обозначения осей цилиндрической системы координат  $r, \varphi, z$ , связанной с цилиндром.

Рассмотрены цилиндры, материал которых однороден, а также цилиндры, материал которых обладает неоднородностью свойств в направлении радиуса. Примером такой неоднородности является изменение свойств материала древесины, связанное с различной плотностью годовых колец.

При рассмотрении деформаций цилиндра под действием крутящего момента и осевой силы используем две геометрические гипотезы: считаем, что поперечные сечения цилиндра остаются плоскими, а волокна, направленные вдоль радиуса – прямолинейными. В этом случае закон движения точек цилиндра задаётся соотношениями [13]

$$\begin{cases} r = r_0 Q(r_0), \\ \varphi = \varphi_0 + z_0 \psi, \\ z = z_0 \lambda, \end{cases} \quad (1)$$

где  $r_0, \varphi_0, z_0, r, \varphi, z$  – цилиндрические координаты точек цилиндра в начальном и деформированном состояниях соответственно;  $Q(r_0), \psi, \lambda$  – параметры, задающие изменение радиуса, ответственные за кручение и осевое растяжение.

Если тензор истинных напряжений  $\tilde{S}$  имеет в цилиндрической системе координат компоненты  $S_{\varphi z}$  и  $S_{zz}$ , то выражение для осевой силы и крутящего момента имеет вид

$$P = 2\pi \int_0^{R_0} S_{zz} r_0 dr_0, \quad M = 2\pi \int_0^{R_0} S_{\varphi z} r_0^2 dr_0, \quad (2)$$

где  $R_0$  – наружный радиус цилиндра в недеформированном состоянии.

**2. Основные кинематические характеристики.** Введём базис используемой цилиндрической системы координат в начальном состоянии  $\bar{e}_r^0, \bar{e}_\varphi^0, \bar{e}_z^0$ . В деформированном состоянии базис цилиндрической системы  $\bar{e}_r, \bar{e}_\varphi, \bar{e}_z$  связан с начальным базисом соотношениями

$$\begin{cases} \bar{e}_r = \bar{e}_r^0 \cos(\varphi - \varphi_0) + \bar{e}_\varphi^0 \sin(\varphi - \varphi_0), \\ \bar{e}_\varphi = -\bar{e}_r^0 \sin(\varphi - \varphi_0) + \bar{e}_\varphi^0 \cos(\varphi - \varphi_0), \\ \bar{e}_z = \bar{e}_z^0 \end{cases} \quad (3)$$

или  $\bar{e}_i = \bar{e}_i^0 \cdot \underline{Q}_z = \underline{Q}_z^T \cdot \bar{e}_i^0$  ( $i = r, \varphi, z$ ).

Положение точки цилиндра в деформированном состоянии определяется радиус-вектором

$$\bar{x} = r\bar{e}_r + z\bar{e}_z, \quad (4)$$

где  $r, z$  определены законом движения (1).

Найдём аффино́р деформаций  $\underline{\Phi} = \overset{\circ}{\nabla} \bar{x}$ , где

$\overset{\circ}{\nabla} = \bar{e}_r^0 \frac{\partial}{\partial r_0} + \frac{1}{r_0} \bar{e}_\varphi^0 \frac{\partial}{\partial \varphi_0} + \bar{e}_z^0 \frac{\partial}{\partial z_0}$  – набла-оператор начального состояния.

Поэтому тензор-аффино́р в смешанном диадном базисе имеет представление

$$\underline{\Phi} = r' \bar{e}_r^0 \bar{e}_r + \frac{r}{r_0} \bar{e}_\varphi^0 \bar{e}_\varphi + r\psi \bar{e}_z^0 \bar{e}_\varphi + \lambda \bar{e}_z^0 \bar{e}_z, \quad (5)$$

где  $r' = \frac{\partial r}{\partial r_0}$ .

С учётом соотношений (3) представление (5) преобразуется к виду

$$\underline{\Phi} = \underline{\Phi}_0 \cdot \underline{Q}_z, \quad \text{где } \underline{\Phi}_0 = r' \bar{e}_r^0 \bar{e}_r^0 + Q \bar{e}_\varphi^0 \bar{e}_\varphi^0 + r\psi \bar{e}_z^0 \bar{e}_\varphi^0 + \lambda \bar{e}_z^0 \bar{e}_z^0. \quad (6)$$

Мера деформаций Коши – Грина определена как  $\underline{G} = \underline{\Phi} \cdot \underline{\Phi}^T = \underline{\Phi}_0 \cdot \underline{Q}_z \cdot \underline{Q}_z^T \cdot \underline{\Phi}_0^T = \underline{\Phi}_0 \cdot \underline{\Phi}_0^T$ . После преобразований получим соотношения

$$\underline{G} = (r')^2 \bar{e}_r^0 \bar{e}_r^0 + Qr\psi (\bar{e}_\varphi^0 \bar{e}_r^0 + \bar{e}_z^0 \bar{e}_\varphi^0) + Q^2 \bar{e}_\varphi^0 \bar{e}_\varphi^0 + (r^2 \psi^2 + \lambda^2) \bar{e}_z^0 \bar{e}_z^0. \quad (7)$$

Определитель тензора равен  $\det \underline{G} = (r')^2 Q^2 \lambda^2$ . В недеформированном состоянии  $Q = \lambda = 1, \psi = 0, \underline{G}^0 = \bar{e}_r^0 \bar{e}_r^0 + \bar{e}_\varphi^0 \bar{e}_\varphi^0 + \bar{e}_z^0 \bar{e}_z^0$ .

Тензор деформаций Коши – Грина связан с тензором  $\underline{G}$  выражением

$$\underline{\varepsilon} = \frac{1}{2}(\underline{G} - \underline{G}^0) \quad (8)$$

и после преобразований диадное представление  $\underline{\varepsilon}$  имеет вид

$$\begin{aligned} \underline{\varepsilon} = & \frac{1}{2}((r')^2 - 1)\bar{e}_r^0\bar{e}_r^0 + \frac{1}{2}Q^2r_0\Psi(\bar{e}_\varphi^0\bar{e}_z^0 + \bar{e}_z^0\bar{e}_\varphi^0) + \frac{1}{2}(Q^2 - 1)\bar{e}_\varphi^0\bar{e}_\varphi^0 + \\ & + \frac{1}{2}(r^2\Psi^2 + \lambda^2 - 1)\bar{e}_z^0\bar{e}_z^0. \end{aligned} \quad (9)$$

Условие несжимаемости материала записывается в виде равенства единице определителя тензора (7):

$$r'Q\lambda = 1. \quad (10)$$

С учётом (1)  $r' = (r_0Q(r_0, t))' = Q(r_0, t) + r_0Q'(r_0, t)$ , а условие (10) сводится к дифференциальному уравнению относительно функции  $Q(r_0, t)$ :

$$Q' + \frac{1}{r_0}Q = \frac{1}{\lambda r_0} \cdot \frac{1}{Q},$$

общий интеграл которого имеет вид  $Q^2 = \frac{1}{\lambda} + \frac{C_1}{r_0^2}$ . В соответствии с (1) и

полученным решением в деформированном состоянии  $r^2 = \frac{1}{\lambda}r_0^2 + C_1$ .

В сплошном цилиндре  $r|_{r_0=0} = C_1 = 0$ , поэтому искомая функция  $Q(r_0, t)$  в несжимаемом сплошном цилиндре постоянна по радиусу:

$$Q = \frac{1}{\lambda}, \quad r = \frac{r_0}{\sqrt{\lambda}}, \quad (11)$$

а соотношения (6), (7) и (9) преобразуются к виду

$$\begin{aligned} \underline{\Phi}_0 = & \frac{1}{\sqrt{\lambda}}\bar{e}_r^0\bar{e}_r^0 + \frac{1}{\sqrt{\lambda}}\bar{e}_\varphi^0\bar{e}_\varphi^0 + \frac{r_0\Psi}{\sqrt{\lambda}}\bar{e}_z^0\bar{e}_\varphi^0 + \lambda\bar{e}_z^0\bar{e}_z^0 \left( \det \underline{\Phi}_0 = 1 \right), \\ \underline{G} = & \frac{1}{\lambda}\bar{e}_r^0\bar{e}_r^0 + \frac{r_0\Psi}{\lambda}(\bar{e}_\varphi^0\bar{e}_z^0 + \bar{e}_z^0\bar{e}_\varphi^0) + \frac{1}{\lambda}\bar{e}_\varphi^0\bar{e}_\varphi^0 + \left( \frac{r^2\Psi^2}{\lambda} + \lambda^2 \right)\bar{e}_z^0\bar{e}_z^0 \left( \det \underline{G} = 1 \right), \quad (12) \\ \underline{\varepsilon} = & \frac{1}{2}\left(\frac{1}{\lambda} - 1\right)\bar{e}_r^0\bar{e}_r^0 + \frac{1}{2}\frac{r_0\Psi}{\lambda}(\bar{e}_\varphi^0\bar{e}_z^0 + \bar{e}_z^0\bar{e}_\varphi^0) + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{\lambda} - 1\right)\bar{e}_\varphi^0\bar{e}_\varphi^0 + \\ & + \frac{1}{2}\left(\frac{r_0^2\Psi^2}{\lambda} + \lambda^2 - 1\right)\bar{e}_z^0\bar{e}_z^0. \end{aligned}$$

**3. Определяющие соотношения для несжимаемого упругого материала.** Запишем связь между напряжениями и деформациями для несжимаемого упругого анизотропного материала. Удельная элементарная работа внешних сил  $d'A^{(e)}$ , равная изменению удельной потенциальной энергии  $\Pi$ , представляется свёрткой

$$d'A^{(e)} = \frac{1}{\rho_0} T \cdot d\varepsilon, \quad (13)$$

где  $\rho_0$  – плотность материала,  $T$  – тензор энергетических напряжений, связанный с тензором напряжений Коши соотношениями [9]

$$T = \left( \Phi^{-1} \right)^T \cdot \frac{dV}{dV_0} S \cdot \Phi^{-1}, \quad (14)$$

причём в случае несжимаемого материала  $\frac{dV}{dV_0} = 1$ .

Из закона сохранения энергии  $d'A^{(e)} = d\Pi = \frac{\partial \Pi}{\partial \varepsilon} \cdot d\varepsilon$ , тогда из по-

следнего соотношения и (12) следует, что  $\frac{1}{\rho_0} T = \frac{\partial \Pi}{\partial \varepsilon}$ .

Тензор деформаций Коши – Грина  $\varepsilon$  связан с тензором соотношением (8), поэтому  $\frac{\partial \Pi}{\partial \varepsilon} = \frac{\partial \Pi}{\partial G} \cdot \frac{\partial G}{\partial \varepsilon} = 2 \frac{\partial \Pi}{\partial G}$ .

Если  $\Pi$  есть функция  $G$ , то  $d\Pi = \frac{\partial \Pi}{\partial G} \cdot dG$  и

$$\frac{1}{\rho_0} T = 2 \frac{\partial \Pi}{\partial G}. \quad (15)$$

Для несжимаемого материала  $I_3(G) = \det G = 1$ , тогда задаётся дополнительное условие, накладываемое на тензор  $G$  в виде

$$\gamma(G) = I_3(G) - 1 = 0. \quad (16)$$

Запишем удельную потенциальную энергию деформаций в виде  $\Pi = \Pi^0 + \lambda\gamma$ , где  $\Pi^0 = \Pi$  при выполнении условия (16).

Тогда  $d\Pi = \left( \frac{\partial \Pi^0}{\partial \tilde{G}} + \lambda \frac{\partial \gamma}{\partial \tilde{G}} \right) \cdot d\tilde{G}$ . Найдём  $\frac{\partial \gamma}{\partial \tilde{G}} = \frac{\partial I_3(\tilde{G})}{\partial \tilde{G}} = I_3(\tilde{G})\tilde{G}^{-1}$

(см. [8]), поэтому

$$d\Pi = \left( \frac{\partial \Pi^0}{\partial \tilde{G}} + \lambda I_3(\tilde{G})\tilde{G}^{-1} \right) \cdot d\tilde{G}. \quad (17)$$

Из соотношений (15) и (17) следует, что

$$\frac{1}{\rho_0} \tilde{T} = 2 \left( \frac{\partial \Pi^0}{\partial \tilde{G}} + \lambda \tilde{G}^{-1} \right),$$

поскольку  $I_3(\tilde{G}) = 1$ , и  $\frac{1}{\rho_0} \tilde{T} = \frac{\partial \Pi^0}{\partial \tilde{\varepsilon}} \Big|_{I_3(\tilde{G})=1} + 2\lambda \tilde{G}^{-1}$ .

Пусть  $\tilde{\Pi}^0 = \frac{1}{2} \tilde{\varepsilon} \cdot \tilde{N}^0 \cdot \tilde{\varepsilon}$ , тогда  $\frac{1}{\rho_0} \tilde{T} = \tilde{N}^0 \cdot \tilde{\varepsilon} + 2\lambda \tilde{G}^{-1}$  и  $\tilde{T} = \rho_0 \tilde{N}^0 \cdot \tilde{\varepsilon} + 2\rho_0 \lambda \tilde{G}^{-1}$ .

Обозначим  $\rho_0 \tilde{N}^0 = \tilde{N}$ ,  $2\rho_0 \lambda = p$ , тогда связь между тензором энергетических напряжений  $\tilde{T}$  и тензором деформаций Коши  $\tilde{\varepsilon}$  для несжимаемого анизотропного материала имеет вид

$$\tilde{T} = \tilde{N} \cdot \tilde{\varepsilon} + p \tilde{G}^{-1}, \quad (18)$$

где  $p$  – скалярная функция, подобная гидростатическому давлению.

Исходя из связи между тензорами  $\tilde{T}$  и  $\tilde{S}$  (14), выразим тензор истинных напряжений, полагая  $\frac{dV}{dV_0} = 1$ :  $\tilde{S} = \tilde{\Phi}^T \cdot \tilde{T} \cdot \tilde{\Phi} = \tilde{Q}_z^T \cdot \tilde{\Phi}_0^T \cdot \tilde{T} \cdot \tilde{\Phi}_0 \cdot \tilde{Q}_z$ .

Подставляя в последнее соотношение (18), получим

$$\tilde{S} = \tilde{Q}_z^T \cdot \left( \tilde{\Phi}_0^T \cdot (\tilde{N} \cdot \tilde{\varepsilon}) \cdot \tilde{\Phi}_0 + p \tilde{\Phi}_0^T \cdot \tilde{G}^{-1} \cdot \tilde{\Phi}_0 \right) \cdot \tilde{Q}_z.$$

Поскольку

$$\tilde{G} = \tilde{\Phi}_0 \cdot \tilde{\Phi}_0^T; \quad \tilde{G}^{-1} = \left( \tilde{\Phi}_0^{-1} \right)^T \cdot \tilde{\Phi}_0^{-1}; \quad \tilde{\Phi}_0^T \cdot \left( \tilde{\Phi}_0^{-1} \right)^T \cdot \tilde{\Phi}_0^{-1} \cdot \tilde{\Phi}_0 = \tilde{E}$$

$$\tilde{S} = \tilde{Q}_z^T \cdot \left( \tilde{\Phi}_0^T \cdot (\tilde{N} \cdot \tilde{\varepsilon}) \cdot \tilde{\Phi}_0 + p \tilde{E} \right) \cdot \tilde{Q}_z, \quad (19)$$

где  $\tilde{E}$  – единичный тензор.

Запишем соотношение (19) в компонентном виде. На основании соотношений (6), (9) и полиадного представления тензора  $N = N_{ijkl} \bar{e}_i^0 \bar{e}_j^0 \bar{e}_k^0 \bar{e}_l^0$  тензор, стоящий в скобках, представляется компонентами  $S_{ij}^0$  в начальном базисе, а с учётом соотношений (3) получим  $S = Q_z^T \cdot (S_{ij}^0 \bar{e}_i^0 \bar{e}_j^0) \cdot Q_z = S_{ij}^0 \bar{e}_i \bar{e}_j$ , т.е. компоненты тензора истинных напряжений отнесены к текущему цилиндрическому базису.

Для цилиндрически ортотропного материала при условии, что ось анизотропии совпадает с осью цилиндра, имеют место следующие соотношения между ненулевыми упругими постоянными [7]:  $N_{1111} = N_{2222}$ ;  $N_{1133} = N_{2233}$ ;  $N_{1313} = N_{2323}$ .

В связи с этим компоненты тензора определяются соотношениями

$$\begin{aligned} S_{rr}^0 &= \frac{1}{\lambda} (N_{1111} \varepsilon_{rr} + N_{1122} \varepsilon_{\varphi\varphi} + N_{1133} \varepsilon_{zz}) + p(r_0), \\ S_{\varphi\varphi}^0 &= \frac{1}{\lambda} (N_{1111} \varepsilon_{rr} + N_{1122} \varepsilon_{\varphi\varphi} + N_{1133} \varepsilon_{zz}) + \frac{r_0 \Psi}{\lambda} (N_{2323} \varepsilon_{\varphi z}) + \\ &+ \frac{(r_0 \Psi)^2}{\lambda} (N_{1133} (\varepsilon_{zz} + \varepsilon_{\varphi\varphi}) + N_{3333} \varepsilon_{zz}) + p(r_0), \\ S_{zz}^0 &= \lambda^2 (N_{1133} (\varepsilon_{rr} + \varepsilon_{\varphi\varphi}) + N_{3333} \varepsilon_{zz}) + p(r_0), \\ S_{\varphi z}^0 &= r_0 \Psi \sqrt{\lambda} (N_{1133} (\varepsilon_{rr} + \varepsilon_{\varphi\varphi}) + N_{3333} \varepsilon_{zz}) + \sqrt{\lambda} N_{2323} \varepsilon_{\varphi z}, \\ S_{r\varphi}^0 &= 0, \quad S_{rz}^0 = 0, \end{aligned} \tag{20}$$

где  $p(r_0)$  – неизвестная функция, зависящая в силу принятых геометрических допущений от радиальной координаты.

**4. Равновесие однородного упругого цилиндра.** Напряжения в рассматриваемом цилиндре уравниваются осевой силой  $P$  и крутящим моментом  $M$  (2). Во внутренних точках цилиндра выполняются условия равновесия  $\bar{\nabla} \cdot \underline{S} = \bar{0}$ . Поскольку полагается, что в рассматриваемой задаче напряжённое состояние меняется только в направлении радиуса и не зависит от осевой и окружной координат, условие равновесия приводится к виду

$$\frac{1}{r'} \frac{dS_{rr}^0}{dr_0} + \frac{S_{rr}^0 - S_{\varphi\varphi}^0}{r} = 0. \tag{21}$$

Для напряжений  $S_{rr}^0$  задаются условия по наружной поверхности цилиндра ( $r_0 = R_0$ )

$$S_{rr}^0 \Big|_{r_0=R_0} = 0. \quad (22)$$

В условие равновесия (21) подставляем выражения для компонент тензора напряжений (20) и компонент тензора деформаций (12), определённых с учётом условия несжимаемости материала. После преобразований получаем дифференциальное уравнение относительно неизвестной функции  $p(r_0)$  в виде

$$\frac{dp}{dr_0} = \left( N_{2323} \frac{1}{2\lambda^2} + \frac{1}{\lambda} N_{1133} + (\lambda^2 - 1) N_{3333} \right) \psi^2 r_0 + N_{3333} \frac{1}{\lambda} \psi^4 r_0^3. \quad (23)$$

После интегрирования уравнения (23) в предположении, что упругие константы одинаковы во всех точках цилиндра, с учетом граничного условия (22) получим выражение для функции  $p(r_0)$ , записанное через относительные величины:

$$\begin{aligned} p(\bar{r}_0) = & \frac{1}{2} \left( \frac{1}{2\lambda^2} N_{2323} + \frac{1}{\lambda} N_{1133} + (\lambda^2 - 1) N_{3333} \right) \times \\ & \times \varphi^2 (\bar{r}_0^2 - 1) - \frac{1}{2\lambda} \left( \frac{1}{\lambda} - 1 \right) (N_{1111} + N_{1122}) + \\ & + \left( \lambda^2 - 1 + \frac{1}{\lambda} \varphi^2 \right) N_{1133} + \frac{1}{4\lambda} N_{3333} \varphi^4 (\bar{r}_0^4 - 1), \end{aligned} \quad (24)$$

где величина  $\varphi = \psi R_0 = \frac{\varphi - \varphi_0}{z_0} R_0$  характеризует сдвиг на наружной поверхности цилиндра;  $\bar{r}_0 = \frac{r_0}{R_0}$  – относительный радиус.

С учётом решения (24) можно получить функции, характеризующие распределение напряжений в однородном сплошном цилиндре. Известно, что в результате решения задачи о кручении сплошного цилиндра в линейной постановке единственными ненулевыми напряжениями являются напряжения  $S_{\varphi z}$ , распределенные линейно вдоль радиуса, а при растяжении – постоянные напряжения  $S_{zz}$ . Учет геометрической нелинейности при решении задачи о комбинированном нагружении цилиндра позволяет определить напряжения, распределение которых по радиусу представлено на рис. 1 – 4. Здесь приведены напряжения в анизотропном цилиндре, отнесенные к константе материала  $N_{1111}$ , определенные при кручении ( $\varphi = 1,2$ ;  $\varphi = 1,4$ ;  $\varphi = 1,6$ ;  $\varphi = 1,8$ ;  $\varphi = 2$ ), сопровождающемся растяжением ( $\lambda = 1,5$ ).

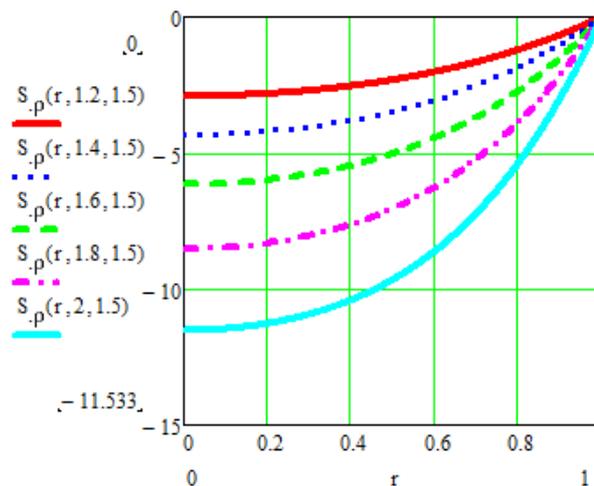


Рис. 1. Радиальные напряжения при комбинированном нагружении цилиндра

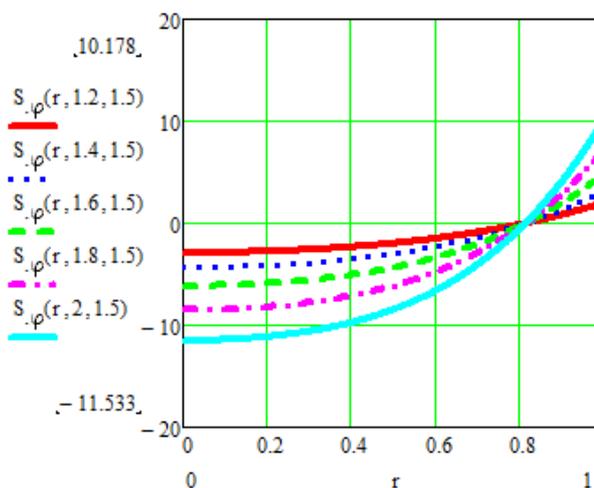


Рис. 2. Тангенциальные напряжения при комбинированном нагружении цилиндра

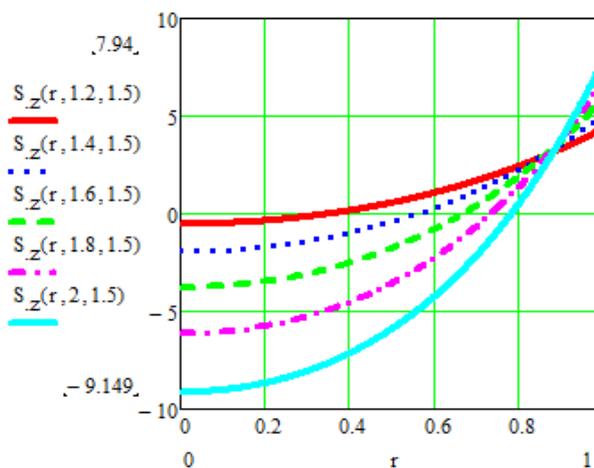


Рис. 3. Осевые напряжения при комбинированном нагружении цилиндра

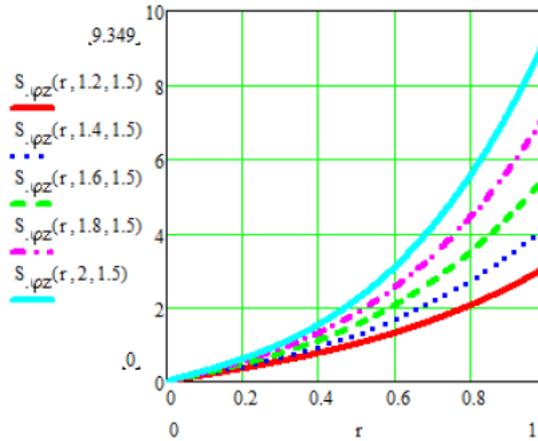


Рис. 4. Касательные напряжения при комбинированном нагружении цилиндра

Выражения для осевой силы (25) и крутящего момента (26) получим, подставляя в выражения (2) функции распределения напряжений и интегрируя

$$\frac{P}{2\pi R_0^2} = \frac{1}{4} \left( 2\lambda^2 \left( \frac{1}{\lambda} - 1 \right) - \frac{1}{\lambda} (\lambda^2 - 1) \right) N_{1133} - \frac{1}{4\lambda} \left( \frac{1}{\lambda} - 1 \right) \times$$

$$\times (N_{1111} + N_{1122}) + \frac{1}{4} \lambda^2 (\lambda^2 - 1) N_{3333} -$$

$$- \frac{1}{4} \left( \frac{1}{\lambda^2} + \frac{1}{2\lambda} \right) N_{1133} + \frac{1}{4\lambda^2} N_{2323} \varphi^2 - \frac{1}{12\lambda} N_{3333} \varphi^4; \quad (25)$$

$$\frac{M}{\pi R_0^3} = \sqrt{\lambda} \left( \frac{1}{4} \left( \frac{1}{\lambda} N_{2323} + 2 \left( \frac{1}{\lambda} - 1 \right) N_{1133} + \right. \right.$$

$$\left. \left. + (\lambda^2 - 1) N_{3333} \right) \varphi + \frac{1}{6\lambda} N_{3333} \varphi^3 \right). \quad (26)$$

Графики изменения осевой силы и крутящего момента представлены на рис. 5 и 6.

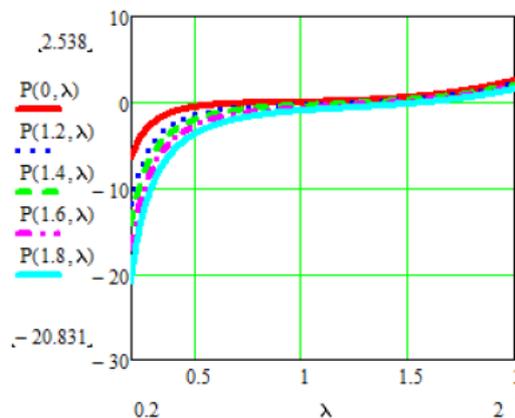


Рис. 5. Зависимость осевой силы от удлинения цилиндра

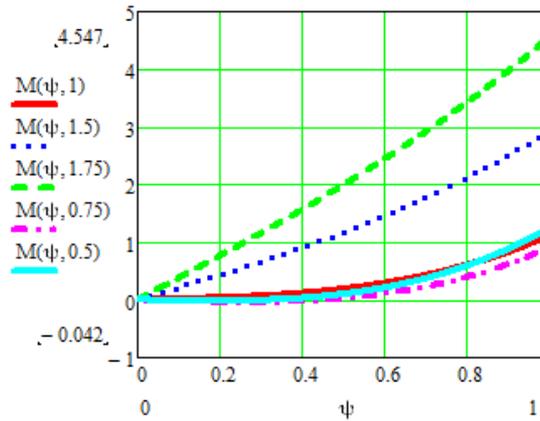


Рис. 6. Зависимость крутящего момента от угла закручивания

**5. Равновесие неоднородного упругого цилиндра.** Рассмотрим сплошной цилиндр, у которого константы упругости могут быть неодинаковыми в разных точках цилиндра. Это может быть вызвано изменениями в строении материала. Например, неоднородностью плотности годовых колец древесины, неоднородным строением композитов или тем обстоятельством, что анизотропия является деформационной.

Будем считать, что константы упругости цилиндрически ортотропного материала являются линейными функциями радиуса:

$$\begin{aligned}
 \tilde{N}_{1111} &= N_{1111} + A_{11}\bar{r}_0, & \tilde{N}_{1122} &= N_{1122} + A_{12}\bar{r}_0, \\
 \tilde{N}_{1133} &= N_{1133} + A_{13}\bar{r}_0, & \tilde{N}_{2222} &= N_{2222} + A_{22}\bar{r}_0, \\
 \tilde{N}_{2233} &= N_{2233} + A_{23}\bar{r}_0, & \tilde{N}_{3333} &= N_{3333} + A_{33}\bar{r}_0, \\
 \tilde{N}_{1212} &= N_{1212} + A_{66}\bar{r}_0, & \tilde{N}_{1313} &= N_{1313} + A_{55}\bar{r}_0, \\
 \tilde{N}_{2323} &= N_{2323} + A_{44}\bar{r}_0,
 \end{aligned} \tag{27}$$

где  $N_{ijkl}$ ,  $A_{ij}$  – константы,  $\bar{r}_0 = \frac{r_0}{R_0}$  – относительный радиус.

Функции (27) подобраны таким образом, что на оси сплошного цилиндра  $\tilde{N}_{1111} = \tilde{N}_{2222}$ ,  $\tilde{N}_{1133} = \tilde{N}_{2233}$ ,  $\tilde{N}_{1313} = \tilde{N}_{2323}$ , а в остальных точках цилиндра эти условия могут не выполняться, т.к.  $A_{11} \neq A_{22}$ ,  $A_{13} \neq A_{23}$ ,  $A_{55} \neq A_{66}$ .

В рассматриваемом случае при использовании определяющих соотношений в виде (17) в выражениях для компонент напряжений (19) следует заменить константы  $N_{ijkl}$  на функции  $\tilde{N}_{ijkl}$ . В дальнейшем при подстановке напряжений в условие равновесия (20) следует учесть, что ненулевыми являются производные  $\frac{d\tilde{N}_{ijkl}}{dr_0}$ , поэтому дифференциальное уравнение для функции  $p(r_0)$  усложняется и принимает вид

$$\begin{aligned}
 \frac{dp}{dr_0} = & -\frac{1}{2\lambda} \left( \frac{1}{R_0} (A_{11} + A_{12}) \left( \frac{1}{\lambda} - 1 \right) + \frac{1}{R_0} A_{13} \left( \lambda^2 - 1 + \frac{3}{\lambda} r_0^2 \psi^2 \right) + \right. \\
 & + N_{1133} \frac{2\psi^2}{\lambda} r_0 \left. \right) - \frac{1}{2\lambda} \left( \frac{1}{R_0} (A_{11} - A_{22}) \left( \frac{1}{\lambda} - 1 \right) + \frac{1}{R_0} (A_{13} - A_{23}) \times \right. \\
 & \times \left( \lambda^2 - 1 + \frac{1}{\lambda} r_0^2 \psi^2 \right) - \frac{1}{4\lambda^2} N_{2323} r_0 \psi^2 - \frac{1}{4\lambda^2} \frac{1}{R_0} A_{44} r_0^2 \psi^2 - \\
 & - \frac{1}{\lambda} \left( \frac{1}{\lambda} - 1 \right) N_{1133} r_0 \psi^2 - \frac{1}{2\lambda} \left( \frac{1}{\lambda} - 1 \right) \frac{1}{R_0} (A_{13} + A_{23}) r_0^2 \psi^2 - \\
 & - \frac{1}{2\lambda} \left( \lambda^2 - 1 + \frac{1}{\lambda} r_0^2 \psi^2 \right) N_{3333} r_0 \psi^2 - \frac{1}{2\lambda} \frac{1}{R_0} A_{33} (\lambda^2 - 1 + \\
 & \left. + \frac{1}{\lambda} r_0^2 \psi^2) r_0^2 \psi^2. \tag{28}
 \end{aligned}$$

Интегрирование уравнения (28) с учетом граничного условия (22) позволяет получить выражение функции  $p(r_0)$ , записанное через относительный радиус  $\bar{r}_0$  и величину  $\varphi = \psi R_0$ :

$$\begin{aligned}
 p(\bar{r}_0) = & -\frac{1}{2\lambda} \left( \left( \frac{1}{\lambda} - 1 \right) (2A_{11} + A_{12} - A_{22}) + (\lambda^2 - 1) (2A_{13} - A_{23}) \right) \times \\
 & \times (\bar{r}_0 - 1) - \frac{1}{2\lambda} \left( -\frac{1}{4} N_{2323} + N_{1133} (2 - \lambda) + \frac{1}{2} \lambda (\lambda^2 - 1) N_{3333} \right) \times \\
 & \times \varphi^2 (\bar{r}_0^2 - 1) - \frac{1}{6\lambda^2} \left( \frac{1}{2} A_{44} + (5 - \lambda) A_{13} - \lambda A_{23} + \lambda (\lambda^2 - 1) A_{33} \right) \times \\
 & \times \varphi^2 (\bar{r}_0^3 - 1) - \frac{1}{8\lambda^2} N_{3333} \varphi^4 (\bar{r}_0^4 - 1) - \frac{1}{10\lambda^2} A_{33} \varphi^4 (\bar{r}_0^5 - 1) - \\
 & - \frac{1}{2\lambda} \left( \left( \frac{1}{\lambda} - 1 \right) (N_{1111} + N_{1122} + A_{11} + A_{12}) + (N_{1133} + A_{13}) \left( \lambda^2 - 1 + \frac{1}{\lambda} \varphi^2 \right) \right). \tag{29}
 \end{aligned}$$

Распределение напряжений в неоднородном сплошном цилиндре описывается функциями (19), в которые подставлены выражения (27) и (29). Сравнивая распределение напряжений в неоднородном цилиндре с решением, приведенном в пункте 4, отметим, что учет неоднородности упругих свойств не вносит изменений в характер распределения напряжений, а приводит к изменениям их абсолютных значений. Эти изменения малы, если свойства вдоль радиуса изменяются не более чем на 20 %. Если упругие константы в наружных слоях цилиндра меньше, чем во внутренних слоях, то при расчете напряжений оказывается, что тангенциальные и касательные напряжения увеличиваются по абсолютной величине, а величина радиальных и осевых напряжений уменьшается. Когда упругие константы в наружных слоях больше, чем во внутренних, абсолютные величины радиальных и тангенциальных напряжений увеличиваются, а вели-

чины осевых и касательных напряжений уменьшаются. Эти изменения напряжений тем больше, чем больше относительный угол закручивания цилиндра.

Расчет осевой силы и крутящего момента в неоднородном анизотропном цилиндре может быть произведен по соотношениям (2) с учетом (19) и решения (29). Отметим, что учет неоднородности упругих свойств цилиндра не приводит к изменению характера зависимостей  $P(\lambda)$  и  $M(\varphi)$ , но приводит к изменению абсолютных значений этих характеристик. В частности, если упругие константы в наружных слоях цилиндра меньше, чем во внутренних слоях, то абсолютная величина момента возрастает, а абсолютная величина осевой силы увеличивается при растяжении и уменьшается при сжатии. Если же упругие константы в наружных слоях цилиндра больше, чем во внутренних слоях, то абсолютная величина момента уменьшается, а абсолютная величина осевой силы увеличивается при сжатии и уменьшается при растяжении.

Таким образом, в данной статье в рамках тензорно-линейных определяющих соотношений для несжимаемого анизотропного материала получено аналитическое решение задачи для однородного и неоднородного в отношении упругих свойств сплошного цилиндра. Проведен анализ влияния неоднородности свойств цилиндра на распределение напряжений по его радиусу.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-01-01875).

### **Список литературы**

1. Астапов В.Ф., Маркин А.А., Соколова М.Ю. Определение упругих свойств материалов из опытов на сплошных цилиндрах // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела, 2002. № 1. С. 104 – 111.
2. Белл Дж.Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. Часть II. Конечные деформации. М.: Наука, 1984. 432 с.
3. Бердин В.К., Кашаев Р.М. Об определении напряженного состояния при растяжении с кручением сплошного цилиндра // Проблемы прочности. 2001. № 1. С. 28 – 37.
4. Васин Р.А., Ильюшин А.А., Моссаковский П.А. Исследование определяющих соотношений и критериев разрушения на сплошных и толстостенных трубчатых цилиндрических образцах // Известия АН СССР. Механика твердого тела. 1994. № 2. С. 177 – 184.
5. Грин А.Е., Адкинс Дж. Большие упругие деформации и нелинейная механика сплошной среды. М.: Мир, 1965. 456 с.
6. Коновалов А.В. Кручение цилиндрического стержня и трубы из упруго-пластического материала с большими пластическими деформациями // Известия РАН. Механика твердого тела. 2001. № 3. С. 102 – 111.

7. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела. М.: Наука, 1977. 416 с.
8. Лурье А.И. Нелинейная теория упругости. М.: Наука, 1980. 512 с.
9. Маркин А.А., Соколова М.Ю. Термомеханические модели обратимого конечного деформирования. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. 268 с.
10. Панов А.Д. Изменение длины идеально упругих стержней при кручении // Известия РАН. Механика твердого тела. 2008. № 2. С. 71 – 78.
11. Панов А.Д. Нелинейные эффекты при осесимметричном деформировании цилиндрического тела. Эффект Пойнтинга // Известия РАН. Механика твердого тела. 2004. № 5. С. 27 – 43.
12. Трусделл К. Первоначальный курс рациональной механики сплошных сред. М.: Мир, 1975. 592 с.
13. Черных К.Ф. Введение в анизотропную упругость. М.: Наука, 1988. 192 с.

*Соколова Марина Юрьевна, д-р физ.-мат. наук, проф.,  
[m.u.sokolova@gmail.com](mailto:m.u.sokolova@gmail.com), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

*Рудаков Вадим Вячеславович, асп, [rudakov93@mail.ru](mailto:rudakov93@mail.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет*

*FINITE DEFORMATIONS OF SOLID ELASTIC INCOMPRESSIBLE ANISOTROPIC  
CYLINDER.*

*M.Yu. Sokolova, V.V. Rudakov*

*An analytical solution of the problem of determining the stress-strain state of an anisotropic solid cylindrical body made of the incompressible material in the framework of the tensor-linear relationship between stress and finite deformation was obtained. Considered cylinders were made of homogeneous and heterogeneous materials with reference to elastic properties. The effect of heterogeneity on the stress distribution in the cylinder was re-searched.*

*Key words: finite deformations, incompressibility, cylindric orthotropy, solid cylinder, torsion.*

*Sokolova Marina Jur'evna, doctor of physical and mathematical sciences, professor,  
[m.u.sokolova@gmail.com](mailto:m.u.sokolova@gmail.com), Russia, Tula, Tula State University,*

*Rudakov Vadim Vjacheslavovich, postgraduate, [rudakov93@mail.ru](mailto:rudakov93@mail.ru), Russia, Tula,  
Tula State University*

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ ПУТЕЙ АВТОМАТИЗАЦИИ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

А.М. Хряпкина, А.Г. Трошина

*Рассмотрены программные способы автоматизации процессов параллельного проектирования. Проведен анализ основных преимуществ программных решений.*

*Ключевые слова: параллельное проектирование, документооборот, автоматизация, производство.*

В наше время многие предприятия находятся в поиске решений по оптимизации производства и используют в своей работе параллельное проектирование. Благодаря параллельному инжинирингу можно ускорить процесс изготовления продукции и снизить затраты.

Так как конструкторско-технологическая подготовка производства (КТПП) состоит из нескольких этапов и для оптимизации этого процесса целесообразно нескольким специалистам работать параллельно, то необходимо обеспечить сохранность и актуальность информации о продукте на каждом шаге [1].

Для разных этапов КТПП подходят различные системы. Так, на этапе конструирования используются системы для проектирования, для решения задач инженерного анализа применяются системы CAE, предоставляющие возможности для расчета, анализа и симуляции физических процессов, для автоматизации разработки управляющих программ для станков с ЧПУ используются САМ-системы, кроме того используются системы для автоматизации подготовки технологических процессов. Для объединения данных, получаемых на каждом этапе КТПП, и передачи их на следующий этап необходима соответствующая система автоматизации [2].

Базовые функциональные возможности PDM-систем охватывают следующие основные направления: управление хранением данных и документами; управление потоками работ и процессами; управление структурой продукта; автоматизация генерации выборок и отчетов; механизм авторизации [3].

Правильный выбор PDM-системы является одним из наиболее важных вопросов для предприятий. В настоящее время существует сотни как интегрированных, так и автономных PDM-систем. Выбор PDM-системы зависит от множества факторов, как от имеющихся на предприятии систем для автоматизации КТПП, от требуемого функционала из-за специфики решаемых задач, а также от финансовых возможностей предприятия [4].

Рассмотрим несколько наиболее популярных программных продуктов, предназначенных для автоматизации параллельного проектирования.

1. «Lotsia PDM PLUS» [6] – это автоматизированная система управления информацией об изделии. Данная система ориентирована на групповое параллельное проектирование, а так же производство и сопровождение технических сложных систем. Она соответствует требованиям стандартов единой системы конструкторской документации, системы проектной документации строительства, а так же поддерживает международные стандарты ISO 9000, STEP и 10007.

Lotsia PDM находит широкое применение на предприятиях. С 1997 года и по настоящее время она была внедрена на более чем 400 предприятиях в самых различных областях. Это доказывает то, что продукт является универсальным и гибким решением по сравнению со своими конкурентами.

Данная система реализована с помощью технологии «клиент-сервер». Благодаря этому, обеспечивается защита от несанкционированного доступа, появляется возможность одновременной работы нескольких пользователей. Скорость работы при этом не замедляется.

К основным характеристикам системы относятся:

- быстрое получение отчетов по отдельным этапам или по всему производству;
- автоматизация предприятий различного профиля (машиностроение, конструкторские бюро и т.д.);
- поддержка справочников и нормативов в масштабах целой организации;
- разграничение прав доступа к документам;
- защита данных;
- возможность управления документами на всех этапах разработки;
- контроль сроков;
- интеграция с аппаратными средствами;
- история изменения проекта и т.п.

Данным программным продуктом могут пользоваться различные специалисты производства: конструктор, инженер, руководящий состав предприятия и т.д.

2.«EuclidDesignManager» [8] – это PDM-система, ориентированная на обеспечение информационной поддержки определенных групп разработчиков, таких как конструкторы, технологи и др.

Она обеспечивает функциональность на уровне отдельного подразделения. Система требует интеграции с корпоративной информационной системой организации.

В состав программы входит модуль Vault. Он обеспечивает доступ ко всем документам и метаданным, которые есть в системе. Все версии деталей идентифицируются. Номера версий могут задаваться автоматически или могут задаваться пользователем. Управление документами по сети происходит с прозрачным доступом пользователей.

Взаимодействие с операционной средой изолированно от пользователя. Утилиты программы обеспечивают: перенос и трансляцию данных, администрирование, средства визуализации. Автоматический поиск и доставка файлов осуществляется с помощью транспортных механизмов. При передаче данных от одного приложения к другому - они конвертируются.

К основным функциям системы Design Manager относятся:

- управление версиями проектов;
- управление потоками данных;
- защита информации;
- управление взаимодействием разработчиков проекта;
- конфигурирование и адаптация системы.

Продукт выполняет функции слежения за состоянием проекта, координации и синхронизации, параллельно выполняемых процедур разными исполнителями.

3. «ЛОЦМАН: ПГС» [7] – система автоматизации управления основными производственными процессами. На основе нее строятся планы работ, управления задачами, электронный документооборот и архив.

Компания АСКОН разработала простой в использовании и внедрении программный продукт, который при этом эффективно и быстро приносит результаты сразу после внедрения. Создатели отказались от универсального подхода. Каждая область проектирования должна получить тот инструмент, который соответствует ее потребностям и сложившимся принципам работы.

ЛОЦМАН: ПГС обеспечивает полноценный процесс коллективной работы над проектом. Он поддерживает технологии сквозного проектирования: результаты и информация текущего этапа проектирования доступны всем участникам проекта и они сразу передаются на все последующие этапы. Также система поддерживает ссылочную целостность. Происходит отслеживание изменения файлов в режиме реального времени. Участники процесса проектирования могут контролировать собственные изменения файлов и других участников своей команды.

Одним из важных организационных процессов является согласование и подписание документации проекта. В ЛОЦМАН: ПГС согласование может проходить у всех участников процесса одновременно, сокращая при этом затраты. На все документы ставится электронно-цифровая подпись (ЭЦП) с указанием роли подписанта.

Основными преимуществами системы являются:

- поддержка сквозного проектирования;
- подлинность электронных документов;
- наличие редактора для создания пояснительных записок;
- версионность документов и их сравнение;
- планирование работ;
- формирование электронного архива;

- адаптация под расширение списка задач пользователей.

Кроме вышеперечисленных преимуществ, следует отметить, что ЛОЦМАН: ПГС обладает удобным, интуитивно понятным интерфейсом, простотой внедрения, а также возможностью интеграции с любыми системами автоматизированного проектирования.

4. «Вертикаль» [5] – это система автоматизированного проектирования технологических процессов. Она, так же как и ЛОЦМАН, создана компанией «АСКОН».

Вертикаль поддерживает бизнес-процессы электронного документооборота. Система предоставляет интеллектуальный подход к организации данных технологических процессов, основанных на объектной модели предоставления и организации технологических баз данных. В системе присутствует открытая архитектура, которая основана на компонентах ActiveX.

По сравнению с вышеперечисленными системами «Вертикаль» является более узкоспециализированным программным продуктом.

К основным функциям системы относятся:

- расчет режимов резания, сварки и других технологических параметров;
- автоматическое формирование необходимых комплектов технологической документации (соответствует ГОСТ);
- параллельное проектирование сложных и сквозных технологических процессов группой технологов (происходит в режиме реального времени);
- формирование заказов на проектирование специальных средств техоснащения;
- поддержание актуальной информации при помощи процессов управления измерениями и т.д.

Использование «Вертикали» позволяет ускорить работу технологического отдела. В системе охвачено большое количество технологических работ, а также организован электронный архив техпроцессов.

Можно считать, что «Вертикаль» является одной из ступеней к созданию единого информационного пространства предприятия.

Благодаря интеграции САПР «Вертикаль» и ЛОЦМАН: PLM , Компас-3D и других систем компании АСКОН, решаются задачи создания единого электронного пространства для совместной разработки продукции, а также подготовки производства.

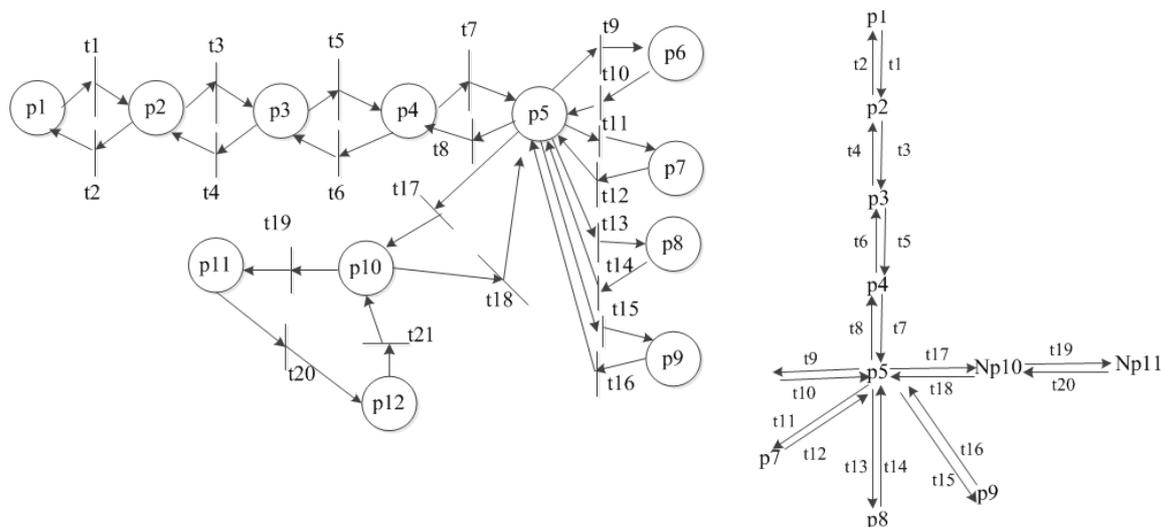
В результате этого электронное описание продукта содержит в себе полную информацию, которая необходима для поддержания всех этапов жизненного цикла изделия. На этапе подготовки производства происходит накопление данных о результатах конструкторско-технологического проектирования и обмен информацией между инженерными службами предприятия.

У всех из рассмотренных выше автоматизированных систем есть свои преимущества. Без учета специфики запросов конкретного предприятия наиболее предпочтительной системой представляется Lotsia PDM PLUS. Ее можно использовать на предприятиях различного профиля. В ней организован защищенный документооборот, пользователи системы имеют различные уровни доступа. К одному из главных качеств системы Lotsia PDM PLUS относится контроль сроков выполнения задач. Это поможет исключить варианты просрочек на каждом этапе проектирования и ускорит создание продукции.

Однако при учете специфики разрабатываемых проектов, а также организации работ и имеющегося на предприятии программного и аппаратного обеспечения этот выбор может быть не так очевиден. Для правильного подбора решения необходимо выполнить анализ деятельности различных структур предприятия в рамках параллельного проектирования. Одним из методов анализа может являться моделирование. Для моделирования систем, с постоянно поступающими на вход заявками – различными документами КТПП, может быть использован аппарат моделирования систем массового обслуживания, например, сети Петри.

Принципиальная схема процесса КТПП при условии применения параллельного проектирования представлена на рисунке.

Основными состояниями системы являются: P1 – этап разработки технического предложения; P2 – этап разработки эскизного проекта; P3 – этап разработки технического проекта; P4 – рабочая КД; P5 – этап разработки технологии; P6 – этап разработки СТО; P7 – этап разработки ТП; P8 – этап разработки материальных норм; P9 – этап разработки маршрутов расцеховки; P10 – передача информации АСУП; P11 – передача информации производству; P12 – предложения об изменении от производства.



**Сеть Петри КТПП с параллельным проектированием и граф достижимости сети**

Выполнение событийной модели в сетях Петри описывает поведение системы. Анализ результатов выполнения может сказать о том, в каких состояниях пребывала или не пребывала система, какие состояния в принципе не достижимы. Кроме того, применение математического аппарата из теории массового обслуживания позволит оценить основные параметры функционирования системы (среднее время ожидания требованием начала обслуживания в системе, средняя дина очереди, коэффициент простоя канала и т.д.) и сделать выводы о наиболее проблемных этапах КТПП. На основании проведенных исследований можно будет сформулировать требования к PDM-системе и сделать обоснованный выбор.

### **Список литературы**

1. Автоматизированные системы технологической подготовки производства в машиностроении / Г.К. Горанский [и др.]. М.: Машиностроение, 1976.
2. Головицына М. Интеллектуальные САПР для разработки современных конструкций и технологических процессов. 2016. 250 с.
3. Соломенцев Ю.М. Конструкторско-технологическая информатика и автоматизация производства. М.: Станкин, 1992. 127 с.
4. Чернов В.Н. Системы электронного документооборота. М.: РАГС, 2009. 161 с.
5. Вертикаль [Электронный ресурс] // АСКОН [сайт]. URL: <http://machinery.ascon.ru/software/tasks/items/?prcid=8&prpid=420> (дата обращения 26.04.2016).
6. Лоция софт [Электронный ресурс] // Лоция софт [сайт]. URL: <http://www.lotsia.com> (дата обращения 26.04.2016).
7. Лоцман: ПГС [Электронный ресурс] // Лоцман: ПГС [сайт]. URL: <http://pdmonline.ru> (дата обращения 26.04.2016).
8. Euclid Design Manager [Электронный ресурс] // URL: <http://www.m2.com/m2/web/story.php/1999852568440080DDE88025683C003163A3> (дата обращения 26.04.2016).

*Хряпкина Александра Михайловна, магистрант, [aleksandra005@mail.ru](mailto:aleksandra005@mail.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

*Трошина Анна Геннадьевна, канд. техн. наук, доц., [atroshina@mail.ru](mailto:atroshina@mail.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет*

#### *ANALYSIS OF POSSIBLE WAYS OF AUTOMATION OF CONCURRENT ENGINEERING*

*A.M. Hryapkina, A.G. Troshina*

*Program methods of automation of processes of concurrent engineering are considered. The analysis of primary benefits of software solutions is made.*

*Key words: concurrent engineering, document flow, automation, production.*

*Hryapkina Alexandra Mikhailovna, magistant, [aleksandra005@mail.ru](mailto:aleksandra005@mail.ru), Russia, Tula, Tula State University,*

*Troshina Anna Gennad'evna, candidate of technical sciences, docent, [atroshina@mail.ru](mailto:atroshina@mail.ru), Russia, Tula, Tula State University*

УДК 004.891.1

## **ОЦЕНКА ДИСЦИПЛИНАРНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ СТУДЕНТОВ**

**А.А. Фомичев, З.Ю. Филиппова**

*Предложены модель и алгоритм оценки дисциплинарных компетенций и формирования профессиональной пригодности студента в рамках компетентностного подхода. В основу предложенного алгоритма положены экспертные методы системного анализа. Модель и алгоритм протестированы для студенческой группы по итогам освоения программы бакалавриата.*

*Ключевые слова: компетенция, компетентностная модель, экспертный метод, ранжировка, профессиональная пригодность.*

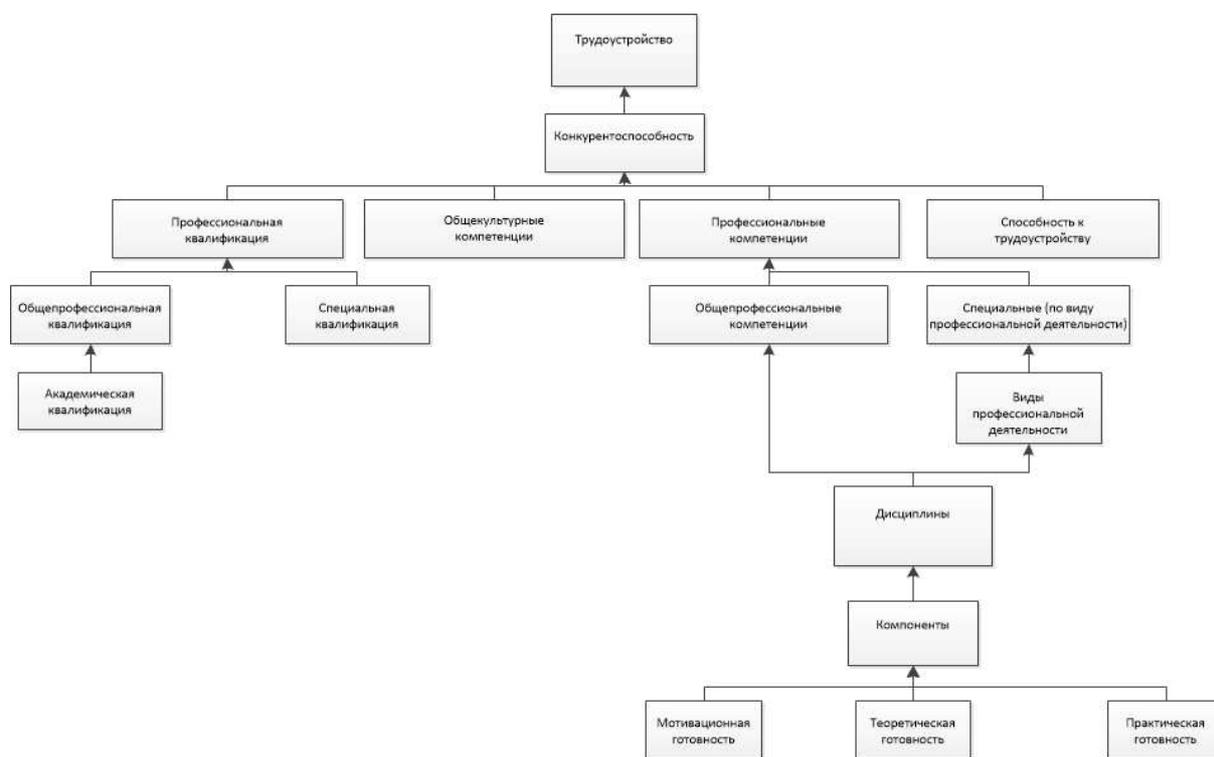
На современном этапе развития общества необходимость подготовки высшими учебными заведениями грамотных и высококвалифицированных специалистов не вызывает никаких сомнений. При этом актуальными остаются такие проблемы высшего профессионального образования (ВПО), как проблема повышения конкурентоспособности и привлекательности высшего образования, проблема мобильности студентов на рынке труда, проблема оценки качества обучения, проблема трудоустройства.

С момента вхождения России в Болонский процесс была поставлена задача освоения компетентностного подхода и переориентации государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования (ФГОС ВПО) на проектирование результатов образования с использованием компетенций. Под компетенцией понимается способность индивидуума применять знания, умения и личностные качества для успешной деятельности в определенной области, его социальная адаптация (умение работать в коллективе) и профессиональный опыт [1]. В настоящее время происходит переход системы ВПО на ФГОС третьего поколения, основу которого составляет компетентностная модель [2].

На сегодняшний день актуальной остается задача разработки модели и алгоритма поэтапного оценивания дисциплинарных компетенций и профессиональной пригодности студентов. При этом формирование дисциплинарных компетенций представляет собой сложный и многоуровневый процесс, что делает актуальной разработку автоматизированного алгоритмического обеспечения, позволяющего проследить процедуру формирования тех или иных дисциплинарных компетенций и их компонент этап за этапом.

В данной работе предложены модель и алгоритм оценки уровня освоения дисциплинарных компетенций студентов. Для начала рассмотрим предложенную нами компетентностную модель студента.

**Компетентностная модель студента в рамках стандарта третьего поколения.** Компетентностная модель выпускника представляет собой описание того, каким набором компетенций должен обладать выпускник вуза (рис. 1).



**Рис. 1. Модель поэтапного оценивания сформированности дисциплинарных компетенций студентов**

Вершиной предложенной модели является процесс трудоустройства выпускника, который основывается на факторе конкурентоспособности – определяющем факторе на рынке труда. Высокая конкурентоспособность позволяет выпускнику увереннее ощущать себя при поиске места работы, не боясь столкнуться в соперничестве с другими кандидатами на вакансии при наличии конкурса на рабочее место.

В свою очередь конкурентоспособность является сложным понятием, включающем в себя сразу несколько уровней. В нее входит как непосредственно сама профессиональная квалификация, так и профессиональные компетенции студента с его способностью к трудоустройству.

Формирование профессиональных компетенций является сложным процессом включающим в себя общепрофессиональные компетенции, которые формируются при изучении дисциплин общепрофессионального цикла и специальные компетенции по видам профессиональной деятельности, которые формируются в ходе прохождения дисциплин специального цикла. Для каждого направления подготовки виды профессиональной деятельности и их количество определяются индивидуально. Тот или иной вид деятельности формируется при изучении определенного набора дисциплин, содержащих в себе различные формы занятий, которые и способствуют в последствие формированию специальных компетенций.

Все изучаемые дисциплины можно условно разбить на три дисциплинарные компоненты, которые в свою очередь содержат по три показателя. Дисциплинарные компоненты носят названия сфер проявления определенных качеств и способностей студента при изучении дисциплин: мотивационная готовность; теоретическая готовность; практическая готовность.

Такие компоненты вместе с показателями позволяют спрогнозировать сформированность тех или иных дисциплинарных компетенций в будущем еще на раннем этапе обучения.

**Оценка компетентности экспертов по результатам экспертизы.** Рассмотрим известную задачу экспертного оценивания проектов, когда по результатам экспертизы также оценивается и компетентность самих экспертов. Центральной идеей метода является идея о том, что компетентность эксперта определяется степенью согласованности его мнения с мнением большинства [3].

Пусть дана некоторая таблица  $X(n, N)$  мнений экспертов о некоторых проектах, где  $n$  – число проектов,  $N$  – число экспертов. Сначала предполагается, что эксперты одинаково компетентны и оценки проектов, представленные вектором  $x^1$ , определяются как среднее арифметическое по оценкам, назначенным экспертами:  $x^1 = X a^0$ , где  $a$  – вектор оценок компетентности экспертов размерности  $N$ . На первом шаге все элементы вектора  $a^0$  равны  $1/N$ . Производится пересчет компетентности экспертов с учетом средних оценок проектов  $x^1$ :  $a^1 = X^T x^1 = X^T X a^0$ . Полученный вектор оценок нормируется:

$$a^1 = \frac{1}{\lambda^1} X^T X a^0, \quad \lambda^1 = \sum_{i=1}^n x_i^1 \sum_{j=1}^N x_{ij}.$$

Очевидно, что больший вес получит тот эксперт, который выше оценил проект, набравший наибольшее число баллов.

Процедуру нахождения весов проектов и компетентности экспертов можно представить в виде параллельных итерационных процессов:

$$\begin{cases} x^t = (1/\lambda^{t-1}) X X^T x^{t-1}, \\ a^t = (1/\lambda^t) X^T X a^{t-1}, \end{cases}$$

где  $t > 0$ ,  $a^0 = (1/N, \dots, 1/N)^T$ ,  $\lambda^t = \sum_{i=1}^n x_i^t \sum_{j=1}^N x_{ij}$ .

Вычисления проводят до тех пор, пока векторы не перестанут меняться.

Из линейной алгебры известно, что данный процесс сходится к собственному вектору, соответствующему максимальному собственному числу линейного преобразования  $XX^T$  и  $X^T X$  соответственно. Условием сходимости данного процесса является неразложимость матриц  $XX^T$  и  $X^T X$ , что соответствует неразложимости исходной матрицы  $X$ . Прямоугольная неотрицательная матрица  $X$  разложима, если путем одновременных перестановок строк и столбцов ее можно привести к виду:

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & 0 \\ 0 & X_{22} \end{bmatrix}.$$

Это означает, что эксперты и проекты распадаются на две несвязанные группы, где каждая группа экспертов оценивает только «свою» группу проектов. В такой ситуации матрицу  $X$  необходимо разделить на две подматрицы и рассматривать их отдельно.

**Алгоритм оценивания дисциплинарных компетенций студентов.** Предлагаемый алгоритм основан на применении экспертного подхода к данным об успеваемости. Предложенный метод представляет собой экспертизу проектов, причем под проектами понимаются дисциплинарные компоненты, а под экспертами – дисциплины специального цикла, которые оценивали вклад в дисциплину каждой из компонент.

Известно, что оценки по дисциплинам, как и результирующие оценки, не являются оценками уровня освоения компетенций. Для получения количественной оценки компетенций необходимо выявить связь дисциплин и компетенций. Необходимо учесть важный момент того, что каждая дисциплина вносит свой вклад в уровень освоения компетенции. В данной работе использованы данные, полученные от преподавателей в ходе изучения дисциплин специального цикла, представляющие собой таблицы соответствия дисциплин и компетенций. Строки таблиц представляют собой дисциплины специального цикла, а столбцы компетенции; связь

между дисциплиной и компетенцией, указанная экспертом, обозначена единицей, а отсутствие связи – нулем. Так как мы учитываем, что дисциплины связаны с компетенциями в разной степени, мы попросили преподавателей для каждой компетенции и входящих в нее дисциплин оценить, какой вклад в изучение дисциплины вносит каждая из трех дисциплинарных компонент: мотивационная, практическая, теоретическая.

При такой постановке задачи экспертами, как уже сказано, выступают дисциплины, т.е. для дисциплин может быть получена количественная оценка их «компетентности». В данном случае под «компетентностью» понимается не характеристика результата обучения, а некая мера адекватности мнения эксперта мнению большинства. Таким образом, выявление компетентности экспертов представляет собой процедуру определения веса или вклада дисциплины в уровень освоения компетенции.

Таким образом, используя вычисленные веса дисциплин по каждой компетенции мы можем скорректировать матрицу связи дисциплин с компетенциями полученную от преподавателей. В сумме веса дисциплин по каждой компетенции дают единицу.

Предлагаемая процедура оценки компетенций является инвариантной относительно матрицы связи дисциплин и компетенций. Матрица связи может иметь любой вид, но при этом для оценок компетенций всегда будет получен верный результат.

Оценка уровня освоения сформированности компетенции с использованием матрицы связи дисциплин и компетенций производится по следующей схеме. Для каждой компетенции определяются связанные с ней дисциплины и веса данных дисциплин полученные в ходе экспертных оценок. Оценка компетенции в таком случае определяется по формуле

$$K = \sum_{i=1}^n y_i s_i,$$

где  $n$  – число дисциплин, связанных с компетенцией (по матрице связи);  $y_i$  – оценка студента по  $i$ -й дисциплине;  $s_i$  – вес дисциплины.

Рассмотрим случай, когда компетенция связана со всеми дисциплинами. Если при этом по всем дисциплинам студент получил «отлично» (сто баллов), то так как сумма весов дисциплин составляет единицу, оценка компетенции составит

$$K = \sum_{i=1}^n 100s_i = 100 \sum_{i=1}^n s_i = 100.$$

Если компетенция не связана ни с одной дисциплиной, то независимо от полученных в процессе обучения оценок, значение уровня усвоения компетенции составит

$$K = \sum_{i=1}^n y_i s_i = \sum_{i=1}^n y_i \cdot 0 = 0.$$

Пусть для уровней освоения компетенции введено некоторое словесное описание, например, как представлено в табл. 1.

**Таблица 1**

**Пример словесного описания уровней освоения компетенций**

<b>Уровень освоения компетенции</b>	<b>Описание уровня</b>
от 0 до 20	Не владеет
от 21 до 40	Не вполне владеет
от 41 до 60	Владеет не в полной мере
от 61 до 80	Владеет в полной мере
от 81 до 100	Владеет в высшей степени

Тогда наряду с числовыми оценками компетенций автоматически может быть получено и словесное описание компетенций.

Далее необходимо получить информацию о профессиональной пригодности выпускника, для этого нам необходимо знать, как компетенции соотносятся относительно видов профессиональной деятельности. Это информацию мы можем получить из образовательного стандарта по любому из направления подготовки. Таким образом, зная уровень освоения специальных компетенций, соотношение их между видами деятельности мы можем вычислить уровень пригодности выпускника к каждому из видов профессиональной деятельности.

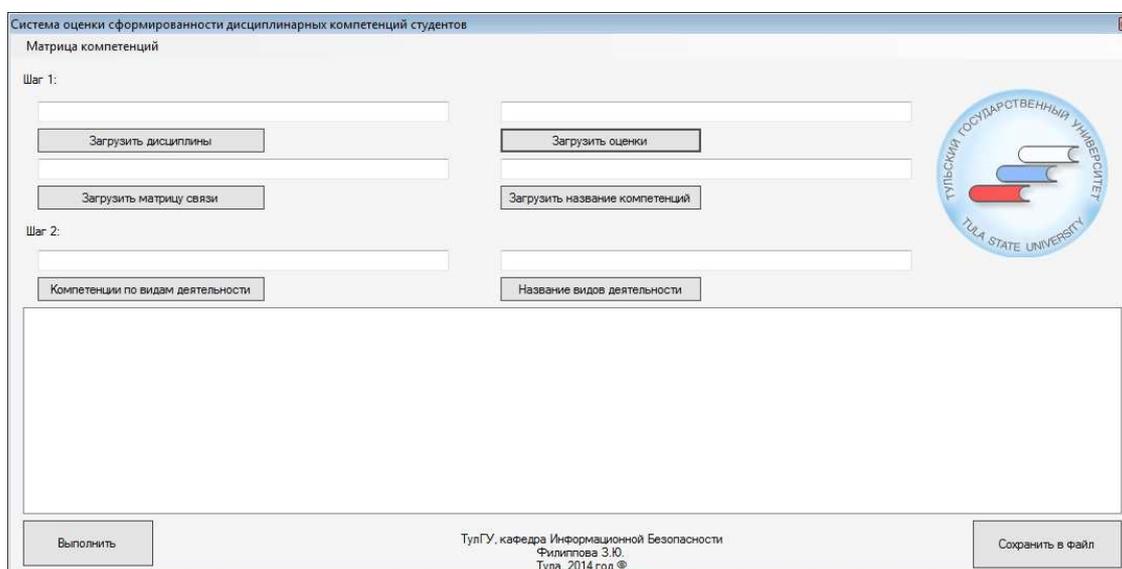
Для каждого выпускника составляется ранжировка его профессиональной пригодности, (по видам профессиональной деятельности) и в итоге составляется результирующая ранжировка профессиональной пригодности по всему направлению обучения студентов.

Для получения результирующей ранжировки профессиональной пригодности, необходимо усреднить множество полученных ранжировок профессиональных видов деятельности по каждому студенту. Для усреднения предполагается использование метода медианы Кемени.

Предполагается, что при проведении процедуры оценки на протяжении нескольких лет могут быть собраны дополнительные материалы для корректировки и усреднения весов дисциплин и связи дисциплин и компетенций. В некоторой мере это позволит исключить субъективность при оценке связи дисциплин и компетенций и соответственно обеспечит получение более точных и стабильных значений уровня освоения компетенций.

Апробация разработанного алгоритма оценивания дисциплинарных компетенций. Описанный алгоритм получения оценок компетенций и профессиональной пригодности студентов реализован на языке C# и применен для данных об успеваемости студентов направления подготовки бакалавров (по итогам 2012 года) «Управление в технических системах» (9 чело-

век) (рис. 2). Помимо данных об успеваемости студентов за все время обучения в вузе, был также получен перечень компетенций для данного направления, указанный в учебном плане.



**Рис. 2. Интерфейс программного модуля, реализующего оценивание уровня сформированности дисциплинарных компетенций студентов**

Программа генерирует протокол процедуры оценки дисциплинарных компетенций, а также выдает информацию о профессиональной пригодности студентов. В табл. 2 приведен пример оценок, вычисленных с точностью до целых баллов, уровня освоения дисциплинарных компетенций для студентов направления «Управление в технических системах».

**Таблица 2  
Уровень освоения дисциплинарных компетенций студентом №1**

Наименование компетенции согласно учебному плану	Уровень	Словесное описание уровня компетенции
СК7	61	Владеет в полной мере
СК8	74	Владеет в полной мере
СК9	70	Владеет в полной мере
СК10	78	Владеет в полной мере
СК11	76	Владеет в полной мере
СК12	69	Владеет в полной мере
СК13	74	Владеет в полной мере
СК14	71	Владеет в полной мере
СК15	81	Владеет в высшей степени
СК16	62	Владеет в полной мере
СК17	44	Владеет не в полной мере
СК18	70	Владеет в полной мере
СК19	68	Владеет в полной мере

## Окончание табл. 2

Наименование компетенции согласно учебному плану	Уровень	Словесное описание уровня компетенции
СК20	63	Владеет в полной мере
СК21	55	Владеет не в полной мере
СК22	73	Владеет в полной мере
СК23	71	Владеет в полной мере
СК24	73	Владеет в полной мере
СК25	71	Владеет в полной мере
СК26	65	Владеет в полной мере
СК27	73	Владеет в полной мере
СК29	72	Владеет в полной мере
СК30	77	Владеет в полной мере
СК31	73	Владеет в полной мере
СК32	68	Владеет в полной мере

Для каждого студента было произведено получение графической интерпретации количественных оценок его дисциплинарных компетенций.

#### Заключение

В данной работе был предложен один из возможных методов количественной оценки результатов обучения на основе применения экспертного подхода. Разработанный метод позволяет получить веса дисциплин в рамках учебного процесса, количественные оценки уровня освоения компетенций и уровень профессиональной пригодности к видам деятельности студентов.

Предполагается, что при проведении процедуры оценки на протяжении нескольких лет могут быть собраны дополнительные материалы для корректировки и усреднения весов дисциплин и связи дисциплин и компетенций, что позволит получить более точные и стабильные значения уровня освоения компетенций.

Корректность применения предложенного метода обусловлена рядом ограничений, при нарушении которых следует считать, что рассматриваемая задача переходит разряд плохо обусловленных и требует дополнительных исследований, например, в области социологии.

#### Список литературы

1. Байденко В.И. Выявление состава компетенций выпускников как необходимый этап проектирования ФГОС ВПО нового поколения: методическое пособие. М.: Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов, 2006. 72 с.

2. Соловова Н.В., Николаева С.В. Компетентностный подход: инновационные методы и технологии обучения. Самара: Изд-во «Универсгрупп», 2009. 137 с.

3. Миркин Б.Г. Проблема группового выбора. М.: Наука, 1974. 256 с.

*Фомичев Александр Александрович, д-р техн. наук, проф., [Fomichev71@gmail.com](mailto:Fomichev71@gmail.com), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

*Филиппова Зоя Юрьевна, асп., [zoyafill@rambler.ru](mailto:zoyafill@rambler.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет*

#### *EVALUATION OF THE STUDENTS DISCIPLINARY COMPETENCES*

*A.A. Fomichev, Z.U. Filippova*

*The model and estimation algorithm of disciplinary competencies and the formation of professional competence of the student in the framework of the competence approach are proposed. The basis of the proposed algorithm is based on expert methods of system analysis. The model and algorithm are tested to the student group upon completion of the bachelor program.*

*Key words: competence, competence model, expert method, ranking, professional suitability.*

*Fomichev Aleksandr Aleksandrovich, doctor of technical sciences, professor, [Fomichev71@gmail.com](mailto:Fomichev71@gmail.com), Russia, Tula, Tula State University,*

*Filippova Zoya Jur'evna, postgraduate, [zoyafill@rambler.ru](mailto:zoyafill@rambler.ru), Russia, Tula, Tula State University*

УДК 004.89

### **ОБУЧЕНИЕ ИНОСТРАННЫМ ЯЗЫКАМ ПО ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ТРАЕКТОРИИ НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**Ю.В. Французова, А.Г. Трошина**

*Рассмотрены современные подходы к изучению иностранного языка, описаны преимущества использования в обучении автоматизированных систем. Приведены этапы разработки автоматизированной системы и ключевые моменты работы с ней. Представлен уникальный алгоритм подбора индивидуальной траектории обучения иностранному языку, разработанный авторами.*

*Ключевые слова: интеллектуальная подсистема, иностранный язык, обучение, приложение.*

В связи с интенсивным развитием международных отношений возникает потребность в общении с людьми на другом языке. Для расширения сферы возможностей как в профессиональной деятельности, так и вне ее, необходимым является владение

иностранными языками. Так, в связи с глобализацией экономики и производством, когда для исполнения заказа требуется кооперация людей из разных стран, при устройстве на работу все чаще одним из требований является владение иностранным языком. Развитие Интернета дало возможность общения людей, связанных только общими интересами, а не географически. В связи с этим все чаще встает проблема быстрого изучения иностранного языка. Однако не каждый может позволить себе личного репетитора, поэтому возникает потребность в материалах и методиках для самостоятельного обучения. Одним из наиболее перспективных методов в настоящее время является использование электронных учебников.

В последнее время стали появляться разнообразные приложения для обучения английскому. Большинство из них разработаны для смартфонов или для работы в режиме on-line. К сожалению, систем, которые учитывают уровень владения пользователем языком, очень мало, а большинство из имеющихся основаны не на оценке этого уровня, а на запросе данной информации у пользователя.

В связи с этим целесообразным является рассмотрение вопросов по созданию интеллектуальной подсистемы, которая в автоматическом режиме будет помогать человеку изучать иностранные языки. Для этого необходимы оценка уровня владения языком и анализ ошибок, допускаемых в процессе обучения. На основании представленного анализа система должна подбирать такие упражнения, которые помогут добиться максимального прогресса в изучении языка. Рассмотрим такую систему, основанную на методе изучения иностранного языка с помощью переводов текстов.

За основу берется грамматико-переводной и современный лексико-грамматический метод обучения, направленный на развитие в человеке навыков чтения и перевода литературы. Методика предполагает умение работы со словарём, для чего необходимо выдавать по запросу ученика словарные статьи и примеры использования для незнакомых ему слов.

Для отслеживания прогресса и уровня знаний пользователя необходимо ввести некий числовой показатель, высчитывающийся на основании количества переведённых текстов и количества допущенных ошибок. Каждый переведенный текст повышает уровень владения человеком языком. В зависимости от сложности текста прогресс должен отличаться. В случае, если при переводе текста пользователь допустит ошибку или обратится к словарю за переводом слова, то необходимо учитывать этот факт в дальнейшем для предоставления ему возможности закрепить эти слова в своем словарном запасе. Ошибки в тех словах, в которых пользователь уже ошибался, должны учитываться отдельно.

Таким образом, математическое обеспечение такой системы должно основываться на следующих коэффициентах:

– коэффициент количества ошибок – коэффициент, который отображает отношение количества слов, для которых пользователь запросил перевод, к общему числу слов в тексте (NM);

– коэффициент количества старых ошибок – отображает повторение допущенных ранее ошибок (OM);

– коэффициент количества ошибок в тесте после текста – после каждого текста осуществлена проверка на сколько хорошо текст переведён пользователем (TM);

– коэффициент количества переводов одного и того же текста – отображает отношение количества переводов конкретного текста, к количеству ошибок, допущенных при переводе этого текста (SM);

– коэффициент ценности текста – количество опыта, которое получит пользователь после перевода этого текста (T).

Исходя их коэффициентов, описанных выше, можно составить формулу, по которой будет высчитываться количество опыта, которое будет получать пользователь за каждый перевод текста (Exp):

$$\text{Exp} = T - NM - OM - SM - TM.$$

Каждое определенное значение опыта однозначно соотносится с уровнем знаний языка.

Как уже было сказано ранее, подбор текста осуществляется на основании уровня владения иностранным языком и возникших в процессе предыдущих занятий ошибок. Рассмотрим процесс подбора текста более подробно. Тексты должны будут подбираться по нескольким критериям:

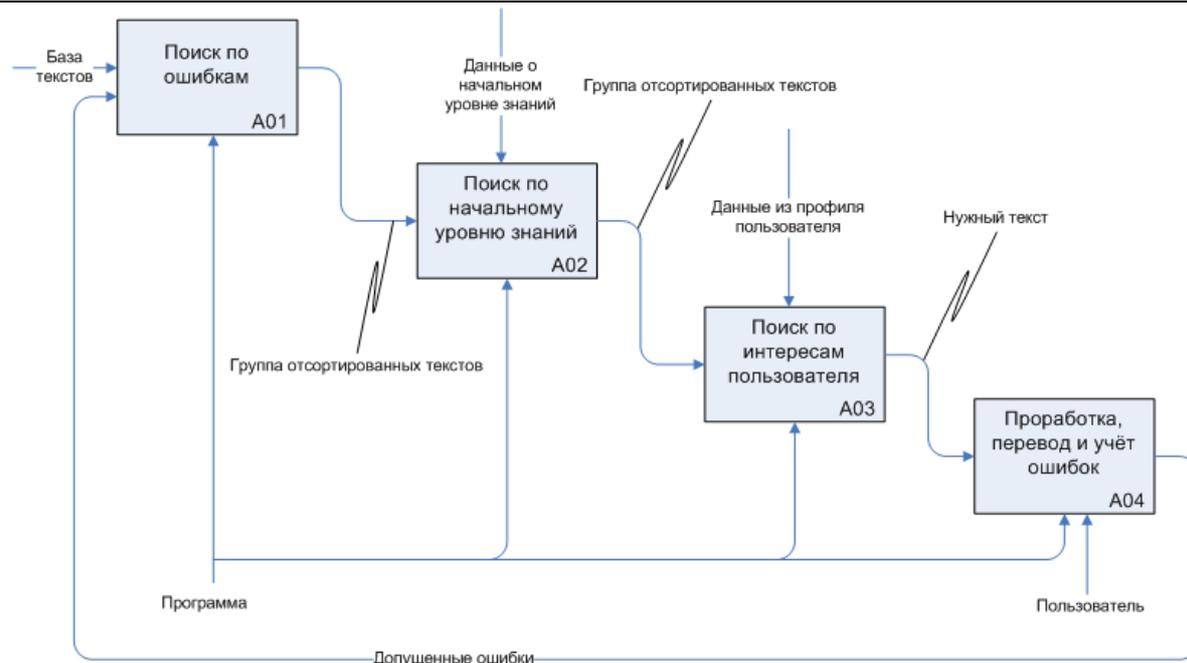
– учёт предыдущих ошибок (тексты подбираются таким способом, при котором большее внимание уделяется именно тем пробелам, которые были допущены ранее при обучении);

– сложность (уровень сложности должен соответствовать знаниям пользователю);

– интерес (текст, в первую очередь, должен подбираться исходя из интересов пользователя).

Если человек в ходе перевода текста сталкивается с трудностями в переводе какого-либо слова, то следующий текст должен содержать это слово для закрепления изученного материала и избегания ошибок в данном слове в дальнейшем. Для этого система должна предложить пользователю текст, где это слово встречается наиболее часто. Далее необходимо из всего многообразия представленных в системе текстов выбрать соответствующие уровню знаний пользователя. И только после этого из оставшихся текстов будет выбран тот, который более всего соответствует интересам, заявленным обучающимся.

На рис. 1 представлена функциональная модель подбора текста в программе.



**Рис. 1. Диаграмма подбора текста**

Рассмотрим диаграмму более подробно.

В блоке А01 осуществляется поиск текста по допущенным пользователем ошибкам. На вход программе подаются база данных и база ошибок. Если это был первый запуск, то первый блок пропускается, и программа переходит к следующему блоку.

В блоке А02 на входе получаем выборку из базы данных текстов, отсортированную по допущенным пользователем ранее ошибкам. Дальнейший поиск происходит по начальному уровню знаний пользователя. Это сделано, чтобы новичкам не попадались сложные тексты и уверенным пользователям не попадались тривиальные задания.

Блок А03 на входе получает базу данных текстов и сортирует её по личным интересам пользователя.

В блок А04 подаётся нужный текст, пользователь прорабатывает его, программа формирует файл с ошибками и, если пользователь продолжает обучение, начинает подбор текста сначала.

Как видно, интеллектуальная система не просто предоставляет человеку тексты для перевода и всевозможные справки, но и выступает в роли советующей системы, указывая на пробелы в знаниях и помогая их устранять. При использовании данной системы скорость обучения зависит только от обучающегося.

Особое внимание стоит уделить блоку А03 (поиск текста по интересам пользователя). Для учета различных интересов пользователей, в общем случае бесконечно разнообразных, желательно осуществлять поиск текстов в глобальной сети Интернет. Если в базе нет текста, удовлетворяющего интересам пользователя, то программа в фоновом режиме делает запрос

в поисковую систему, находит подходящее упражнение, переводит его средствами программ-переводчиков и выдаёт пользователю. Конечно, перевод будет сумбурным, поскольку нет переводчиков, которые бы распознавали смысловую нагрузку, но пользователю будет приятнее работать с тем, что ему действительно нравится. Реализовать этот функционал возможно средствами программной библиотеки для управления браузером SeleniumWebDriver, который связывает приложение с сетью Интернет через обычный браузер, который установлен у каждого.

Помимо рассмотренного грамматико-переводного метода, целесообразно использовать и коммуникативный метод. Разговорный язык также очень важен, и для его отработки необходимо разработать online-сервис, в котором пользователя случайным образом соединяют с другим пользователем, изучающим данный язык, и между ними организовывается чат. Сервер для хранения учётных записей пользователей должен обрабатывать запросы на разговор с тем или иным пользователем, а также выделять им отдельную виртуальную «комнату», где и будет осуществляться общение. Таким образом, обучающийся в перерывах между занятиями сможет в свободной форме тренировать навыки разговорного языка. Для наглядности на рис. 2 изображена схема работы сервиса.



**Рис. 2. Схема работы сервиса общения пользователей**

Таким образом, используя подобную систему, можно обеспечить быстрый прогресс в изучении иностранного языка, не обращаясь к репетиторам. Предложенный информационный ресурс позволяет работать индивидуально, в собственном режиме и в удобное для обучающегося время.

### Список литературы

1. Логичев С.В. Каталог лингвистических программ и ресурсов сети [Электронный ресурс] // Электронная публикация 2000-2015. URL: <http://www.rvb.ru/soft/catalogue> (дата обращения: 26.04.2016).

2. Библиофонд. Использование проектной методики в преподавании иностранного языка на старшей ступени обучения [Электронный ресурс]. URL: <http://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=96368> (дата обращения 26.04.2016).

3. Globus Центр практической лингвистики. Методы обучения иностранным языкам [Электронный ресурс]. URL: <http://bdc63.ru/methods> (дата обращения 26.04.2016).

4. Савинова Н.Б. Иностранные языки в системе развивающего обучения. Оренбург: Изд-во ОИУУ, 2011. 35 с.

*Французова Юлия Вячеславовна, канд. техн. наук, доц., [julianna\\_1204@mail.ru](mailto:julianna_1204@mail.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

*Трошина Анна Геннадьевна, канд. техн. наук, доц., [atroshina@mail.ru](mailto:atroshina@mail.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет*

**TRAINING IN FOREIGN LANGUAGES IN THE INDIVIDUAL TRAJECTORY  
ON THE BASIS OF INFORMATION TECHNOLOGIES**

*Y.V. Frantsuzova, A.G. Troshina*

*Describes the current approaches to the study of a foreign language, learning the benefits of using automated systems. The stages of development of the automated system and the key moments of work with it. It presents a unique algorithm for selection of an individual path of learning a foreign language, developed by the authors.*

*Key words: intelligent subsystem, foreign language, learning, application.*

*Frantsuzova Yulia Vyacheslavovna, candidate of technical sciences, docent, [julianna\\_1204@mail.ru](mailto:julianna_1204@mail.ru), Russia, Tula, Tula State University,*

*Troshina Anna Gennad'evna, candidate of technical sciences, docent, [atroshina@mail.ru](mailto:atroshina@mail.ru), Russia, Tula, Tula State University*

## СОДЕРЖАНИЕ

### *ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ*

*Басалова Г.В.*

Анализ алгоритмов преобразования информации  
в информационно-вычислительных системах ..... 4

*Аль-Сабул Али Хуссейн Хасан, Грачев А.Н.,  
Лукашенко А.В., А.А. Фомичев*

Гибридный алгоритм совместного оценивания параметров  
и состояния в линейных динамических системах ..... 12

*Копылов А.В., Середин О.С., Кушнир О.А.,  
Грачева И.А., Ларин А.О.*

Устойчивое детектирование ладони на изображениях на основе  
комбинирования информации о цвете и форме ..... 24

*Двоенко С.Д., Пшеничный Д.О., Хандельяну Ф.А.*

Группировка признаков без построения факторов групп ..... 40

*Ежов А.А., Новиков А.С.*

Сеть Хэмминга и ее применение для решения задачи  
распознавания подписей ..... 56

*Семенчев Е.А.*

Дуальный подход к формированию внутренних образов  
при восприятии электрических и магнитных полей  
искусственными живыми машинами ..... 64

*Токарев В.Л., Абрамов Д.А.*

Алгоритмы видеоаналитики для обнаружения и классификации  
нештатных ситуаций ..... 72

*Турков П.А., Красоткина О.В., Моттль В.В., Сычугов А.А.*

Отбор признаков в задаче классификации при смещении концепта  
для потоков данных ..... 81

*Федотова С.А., Середин О.С., Кушнир О.А.*

Алгоритмы уточнения оси зеркальной симметрии, найденной  
методом сравнения подцепочек скелетных примитивов ..... 99

## **ВОПРОСЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ**

<i>Арефьева Е.А., Сафронова М.А., Никитина А.В.</i> Разработка системы исследования информационной безопасности организации на основе метода анализа иерархии .....	112
<i>Басалова Г.В., Сычугов А.А.</i> Применение методов теории игр для оптимизации выбора средств защиты информации .....	122
<i>Евсеев Е.Е., Завалишин П.Е., Борзенкова С.Ю., Яковлев Б.С.</i> Требования к оборудованию для хранения электронных носителей в системе страхового фонда документации .....	130
<i>Евсеев Е.Е., Завалишин П.Е., Борзенкова С.Ю., Яковлев Б.С.</i> Оценка производительности труда при микрофильмировании технической документации страхового фонда документации .....	137
<i>Руднев Д.О., Сычугов А.А.</i> Анализ безопасности распределенных информационных систем на основе беспризнакового распознавания образов .....	145
<i>Руднев Д.О., Сычугов А.А.</i> Метод повышения доверия в облачных вычислениях .....	151
<i>Токарев В.Л., Сычугов А.А.</i> Математическое обеспечение оценивания безопасности автоматизированных систем .....	158

## **ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В РЕШЕНИИ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ**

<i>Баранов А.Н., Баранова Е.М., Титоров А.И.</i> Применение методов планирования эксперимента при прогнозировании величины износостойкости инструментальной оснастки .....	166
<i>Баранов А.Н., Баранова Е.М., Титоров А.И.</i> Оптимизация параметров техпроцесса с позиций увеличения износостойкости инструмента и минимизации его количества .....	179
<i>Белая Л.А., Лавит И.М.</i> О численном решении задач прикладной механики в инженерной практике .....	188

<i>Борзенкова С.Ю., Шкиря И.А.</i> Особенности функционирования программного комплекса патентного поиска .....	198
<i>Лукашенко А.В., Фомичев А.А.</i> Информационно-измерительная система электродуговых процессов на основе идентификации схемных моделей .....	203
<i>Мишин А.А., Французова Ю.В.</i> Проектирование программных интерфейсов на основе анализа шаблонных действий пользователя .....	212
<i>Николаева Т.В., Лукашенко А.В.</i> Разработка модели контура отопления в информационно- измерительной САУ теплоснабжением .....	218
<i>Новиков А.В.</i> Автоматизация выбора средств вычислительной техники для предприятия .....	229
<i>Просоедова Н.С., Трошина А.Г.</i> Проектирование структуры и общего алгоритма работы модуля прогнозирования автоматизированной системы «Материнский скрининг» .....	237
<i>Сафронова М.А., Арефьева Е.А., Панченко А.С.</i> Разработка SAAS-подсистемы поиска и анализа резюме на Интернет-ресурсах .....	243
<i>Соколова М.Ю., Рудаков В.В.</i> Конечные деформации сплошного цилиндра из несжимаемого упругого анизотропного материала .....	253
<i>Хряпкина А.М., Трошина А.Г.</i> Анализ возможных путей автоматизации параллельного проектирования .....	267
<i>Фомичев А.А., Филиппова З.Ю.</i> Оценка дисциплинарных компетенций студентов .....	273
<i>Французова Ю.В., Трошина А.Г.</i> Обучение иностранным языкам по индивидуальной траектории на основе информационных технологий .....	281

Научное издание

**ИЗВЕСТИЯ**  
**ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА**  
**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

**Выпуск 11**

**Часть 1**

*Редактор С.Г. Лихачева*

*Компьютерная правка и верстка  
М.С. Шевков, Б.С. Яковлев*

Учредитель:

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»

Изд. лиц. ЛР № 020300 от 12.02.97

Подписано в печать 03.11.16. Дата выхода в свет 10.11.16

Формат бумаги 70×100 1/16. Бумага офсетная

Усл. печ. л. 16,9. Уч.-изд. л. 14,5

Тираж 500 экз. Заказ 282

Цена свободная

Тульский государственный университет

300012, г. Тула, просп. Ленина, 92

Отпечатано в Издательстве ТулГУ

300012, г. Тула, просп. Ленина, 95