

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

11(171)  
2010

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с ноября 1995 г.

УЧРЕДИТЕЛЬ

Издательство "Новые технологии"

## СОДЕРЖАНИЕ

### ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Чанышев О. Г. Метод автоматической кластеризации текстов на основе анализа пересечений кластеров доминант . . . . . 2

**Горбатов В. А.**, Добрик И. И. Теоретико-графовое экспертное оценивание альтернатив . . . . . 8

### ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ

Огнев В. А., Иванов С. Р. Повышение помехоустойчивости информационных коммуникаций между навигационными спутниками и приемовычислителями при использовании сигналов E10S и L1C . . . . . 16

Ховансков С. А., Норкин О. Р. Алгоритм оптимизации мультиагентной системы распределенных вычислений и его исследование с помощью программной модели . . . . . 23

Беневоленский С. Б., Нагорных Д. Н., Смирнова А. А. Особенности создания резервируемого хранилища центра обработки данных распределенных вычислительных систем . . . . . 27

Захаров В. М., Столов Е. Л., Шалагин С. В. Алгоритм вычисления остатка по модулю и оценки его сложности в базе ПЛИС . . . . . 32

### ОРГАНИЗАЦИОННО-ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Богданов Ю. М., Карнаух Д. И. Информационное обеспечение комплексных процессов государственного управления . . . . . 37

### СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Волкоморов С. В., Карпенко А. П., Мартынюк В. А. Анализ кинематики параллельных механизмов средствами системы автоматизированного проектирования САПР . . . . . 45

Кузьмин А. А., Норенков И. П. Автоматизация проектирования мнемосхем электрических сетей на диспетчерских щитах управления . . . . . 52

### ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Филиппова А. С., Кузнецов В. Ю., Басимов Э. Р. Моделирование препроцессора в задачах оптимального размещения сенсоров в области мониторинга . . . . . 55

Андреев А. К. Компьютерная поддержка принятия решений при угрозе цунами . . . . . 60

### ПРИКЛАДНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Ясницкий Л. Н., Петров А. М., Сичинава З. И. Технологии построения детектора лжи на основе аппарата искусственных нейронных сетей . . . . . 66

Яковлев А. А., Яковлева Е. В. Автоматизация синтеза и выбора технических решений преобразователей энергии . . . . . 71

Contents . . . . . 79

Приложение. Кухаренко Б. Г. Анализ независимых компонент и скрытая марковская модель для определения доминантных компонент многомерных временных рядов

Главный редактор  
НОРЕНКОВ И. П.

Зам. гл. редактора  
ФИЛИМОНОВ Н. Б.

Редакционная  
коллегия:

АВДОШИН С. М.

АНТОНОВ Б. И.

БАТИЩЕВ Д. И.

БАРСКИЙ А. Б.

БОЖКО А. Н.

ВАСЕНИН В. А.

ГАЛУШКИН А. И.

ГЛОРИОЗОВ Е. Л.

ДОМРАЧЕВ В. Г.

ЗАГИДУЛЛИН Р. Ш.

ЗАРУБИН В. С.

ИВАННИКОВ А. Д.

ИСАЕНКО Р. О.

КОЛИН К. К.

КУЛАГИН В. П.

КУРЕЙЧИК В. М.

ЛЬВОВИЧ Я. Е.

МАЛЬЦЕВ П. П.

МЕДВЕДЕВ Н. В.

МИХАЙЛОВ Б. М.

НЕЧАЕВ В. В.

ПАВЛОВ В. В.

ПУЗАНКОВ Д. В.

РЯБОВ Г. Г.

СОКОЛОВ Б. В.

СТЕМПКОВСКИЙ А. Л.

УСКОВ В. Л.

ФОМИЧЕВ В. А.

ЧЕРМОШЕНЦЕВ С. Ф.

ШИЛОВ В. В.

Редакция:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.

ЛЫСЕНКО А. В.

ЧУГУНОВА А. В.

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу <http://www.informika.ru/text/magaz/it/> или <http://novtex.ru/IT>.

Журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования.

Журнал входит в Перечень научных журналов, в которых по рекомендации ВАК РФ должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

УДК 519.6:410

**О. Г. Чанышев**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,  
Омский филиал Института математики  
им. С. Л. Соболева СО РАН  
e-mail: fedorov22@yandex.ru

## Метод автоматической кластеризации текстов на основе анализа пересечений кластеров доминант

*Основная цель работы — определение пар текстов с максимальной тематической близостью из заданного множества. Каждый текст представлен доминантами с непустыми вербальными кластерами (частичными лексико-семантическими полями). В качестве меры близости пары текстов принята сумма "степеней смысловых подобий доминант". "Степень смыслового подобия доминанты" есть сумма отношений размера пересечения ее вербальных кластеров в различных текстах к размерам кластеров. Приведены результаты экспериментов по кластеризации с использованием различных методов "взвешивания" слов.*

**Ключевые слова:** кластеризация текстов, бинарные классифицирующие таксоны, доминанты, кластеры слов, лексико-семантическое поле, степень смыслового подобия

### Введение

В современных автоматических методах кластеризации и классификации текстов выделяют два вида: методы категоризации и методы кластеризации [1]. Оба метода в качестве входных данных используют информационно-поисковые образы документов, представляемые в виде множества признаков, характеризующих содержание текста документа. Методы категоризации распределяют документы по предопределенному набору рубрик, а методы кластеризации таксономируют документы на основе анализа тематической близости между ними и не требуют предварительного экспертного задания множеств документов определенной тематики.

Основной проблемой алгоритмов кластеризации-классификации является автоматическое определение слов или словосочетаний, адекватных теме текста. Преимущественно используют частотные

критерии важности слова, например, вычисление веса слова по классической формуле TF-IDF [1, 2]. Введение числовых мер "важности" слов в текстах позволяет использовать геометрические алгоритмы для определения тематических расстояний между текстами. В работе [3] на основе обзора современной техники кластеризации и классификации документов отмечается, что самой большой проблемой геометрических алгоритмов, основанных на введении мер близости между документами, является большая размерность пространства признаков. Для уменьшения размерности применяют различные методы, в частности, используются стоп-листы, а также лингвостатистические и чисто лингвистические методы. Последние включают: использование словарей и тезаурусов для группировки словоформ по нормальным формам и объединения нормальных форм в синонимические группы; использование не отдельных словоформ, а глагольных и именных групп, в том числе и устойчивых словосочетаний. В целом, описанные методы носят вероятностный характер.

В настоящей статье излагается более детерминированный подход к проблеме определения тематической близости документов, основанный на ассоциативной модели реального текста [4, 5]. Эта модель обосновывает и уточняет частотный критерий важности слова, позволяет автоматически отобрать наиболее важные слова — доминанты и ввести новую семантическую меру близости текстов, основанную на сравнении состава кластеров доминант.

### 1. Доминанты и кластеры доминант

#### 1.1. Определение наиболее тематически важных слов

В комплексе проблем автоматического анализа текстов [6, 7, 8] принципиальной является проблема автоматического определения и выделения "ключевых слов" (в англоязычной литературе наиболее релевантный термин "*content-bearing words*" [9]). Для объективного определения понятия "важность слова" необходимо выйти за рамки программы изучения языка *per se* [10, 11] и обратиться к процессам перцепции. Сложность правил формирования речевых структур не означает, что акт их

восприятия коренным образом отличается от восприятия событий другого рода [11]. В. С. Файн писал [7], что ключевые слова — "природное явление" и можно разработать компьютерный алгоритм их определения.

Полагая, что образование вербальных ассоциаций подобно механизму образования ассоциаций "другого рода" (например [12]), можем рассматривать слово (словосочетание) как логический адрес ансамбля нейронов, возбуждение которого затягивает связанные с ним ансамбли в новый единый ритм. Поскольку всякое восприятие протекает во времени, а неподкрепленные ассоциации саморазрушаются, то для образования устойчивой связи ассоциируемые слова необходимо группировать около повторяющихся ассоциативных центров — "ключевых слов". Ограниченность объема кратковременной (оперативной) памяти человека приводят к необходимости деления текста на предложения — "элементарные мысли" (сводящиеся в пределе к тройке "объект 1—связка—объект 2" [13]). Предложения также необходимо связывать между собой через повторение ассоциативных центров. Так образуется лексико-семантическая сеть текста — вербальная репрезентация автором связанных фрагментов нейробиологической структуры собственной памяти, имеющих отношение к объектам описания и цели, преследуемой автором при написании текста. "Рассматривая художественный текст с позиций стилистики декодирования, мы должны учесть как его собственный системный характер, так и его детерминированность свойствами используемой языковой и, в частности лексико-семантической, системы. <...> Текст представляет собой единство двух множеств — множества его элементов и множества связей и отношений между ними" [14]. В свою очередь, Файн [7] говорит о тексте как о коде, выстраивающем в мозгу "понимателя" сложнейшую структуру — смысл, "которого добивался автор, чтобы получить требуемую реакцию".

В нашей модели "пониматель" — это компьютерная система, которая не только не имеет базы знаний о мире автора, но и данных для классификации слов по объектам и отношениям между ними. Она лишь в состоянии выделить лексические единицы и распознать границы предложений. Но даже такой примитивный "пониматель" может построить первое приближение, прототип этой "сложнейшей структуры". Если рассматривать текст как задание тотального графа [15] исходной семантической сети списками смежности слов-вершин — предложениями, то в таком графе единственной характеристикой "важности" вершины является ее

степень. Тогда не число повторений слова в различных предложениях текста, а число смежных вершин-слов является критерием важности (*ассоциативная мощность*  $\Psi$  [4]). При этом важны только те слова, которые через повторение организуют значимые ассоциативные связи между предложениями: не учитываются слова из стоп-списка, слова с единичной частотой, а также так называемые атрибутивные слова, область существования которых (задаваемая номерами предложений входящих) является подобластью области существования некоторого другого слова. Остаются "независимые лексемы связи" (НЛС). Из множества НЛС отбираются доминантные лексемы (доминанты) [5] по критерию  $\Psi > 0,5R$ , где  $R$  — ранг текста (максимальный номер группы лексем с равными  $\Psi$  в частично упорядоченной по убыванию  $\Psi$  последовательности НЛС). Среднее значение отношения числа доминант ко всем словам текста (без стоп-лексем) не превышает 0,04 (например, для девяти лекций С. Д. Кузнецова "Введение в системы управления базами данных" это значение равно 0,039; для менее формализованных текстов это значение уменьшается).

При совместном анализе множества текстов в качестве веса доминанты принимается значение ее обратного ранга в указанной последовательности.

## 1.2. Кластеры доминант

"Смысл" слова в рамках нашей модели "понимателя" можно определить только через другие слова, наиболее часто встречающиеся с ним в различных предложениях и составляющие его кластер. Обозначим через  $Q_i$  и  $Q_j$  области существования  $i$ -го и  $j$ -го слов текста. Введем меру близости слов:

$$K_{i,j} = \rho(Q_i \cap Q_j) / \rho(Q_j),$$

где  $\rho$  — функция, возвращающая размер множества, и *критерий принадлежности кластеру*: если  $K_{i,j} > 0,5$ , то  $j$ -е слово принадлежит кластеру  $i$ -го слова.

С лингвистической точки зрения о кластере доминанты в фиксированном тексте можно говорить как о контекстном (или частичном) *гипонимическом лексико-семантическом поле*, в котором доминанта "возвышается" над другими элементами поля. (В дальнейшем слова "частичное" или "контекстное" опускаются, поскольку речь не идет об объединении семантических полей слов различных текстов.)

Имея списки всех НЛС и атрибутивных слов, встречающихся с  $i$ -й доминантой в области ее существования (списки смежностей), можем опре-

делить по критерию близости кластеры доминант, исключая из рассмотрения слова (в том числе и доминанты), для которых кластер уже определен. Таким образом, появляется возможность ввести числовую меру сходства лексико-семантических полей одинаковых доминант в различных текстах.

## 2. Кластеризация текстов

Результаты ранних экспериментов по автоматической кластеризации и классификации текстов путем сравнения весов пересечений множеств их доминант [16, 17] показали, что такие (малой размерности) подмножества слов позволяют получать бинарные таксоны (см. ниже) с близкими по тематике текстами. Однако тот факт, что контекстные смыслы многих одинаковых слов различны (например, *файловая система* и *система взглядов*), заставил нас обратиться к поиску более жестких критериев.

Каждый текст представим множеством гипонимических лексико-семантических полей. В качестве меры близости  $i$ -го и  $j$ -го текстов будем использовать "степень смыслового подобия лексико-семантических полей", которую обозначим через  $\Theta_{i,j}$  и определим следующим образом.

Положим:

$D_i = (d_{i,1}, d_{i,2}, \dots, d_{i,k}, \dots, d_{i,n})$  — множество доминант — вершин кластеров  $i$ -го текста, частично упорядоченное по убыванию их весов;  $C_{i,k} = (l_{i,k,1}, l_{i,k,2}, \dots, l_{i,k,j}, \dots, l_{i,k,n})$  — кластер  $k$ -й вершины  $i$ -го текста;  $\Lambda_{i,j} = D_i \cap D_j$ , причем  $\rho(\Lambda_{i,j}) > 1$ . Степень смыслового подобия лексико-семантических полей  $k$ -й доминанты ( $d_k \in \Lambda_{i,j}$ ) в различных текстах:

$$\xi_{i,j,k} = \rho(C_{i,k} \cap C_{j,k})(1/\rho(C_{i,k}) + 1/\rho(C_{j,k})).$$

Тематическая близость текстов:

$$\Theta_{i,j} = \sum_k \xi_{i,j,k}. \quad (1)$$

Заметим, что  $\xi_{i,j,k}$  тесно связана с ассоциативными мощностями доминанты в  $i$ -м и  $j$ -м текстах. Действительно, если при определении ассоциативной мощности не исключать слова, смежные с данным в первом предложении области существования<sup>1</sup> [5], то размеры кластеров доминант мож-

но было бы заменить на их ассоциативные мощности, и тогда

$$\xi_{i,j,k} = \rho(C_{i,k} \cap C_{j,k})(\psi_{i,k} + \psi_{j,k})/\psi_{i,k}\psi_{j,k}.$$

Очевидно, что максимально точное определение парных тематических связей текстов повышает вероятность более высокой точности дальнейшего их объединения. В настоящем разделе предлагается вариант получения наиболее близких пар (при фиксированном методе определения близости) и дальнейшей классификации текстов по ним, как по предопределенным рубрикам.

Пусть  $\tau = (t_i, t_j, B_{i,j})$  и  $L = (\tau_1, \dots, \tau_j, \dots, \tau_n)$  — список триад, упорядоченный по убыванию значения  $B_{i,j}$ . Список  $L$ , начиная с первой триады, фильтруем так, чтобы в итоговом списке  $L'$  не оказалось повторяющихся документов. То есть для каждого фиксированного  $i$  из всех  $j \neq i$  в списке  $L'$  останется  $\tau = (t_i, t_j, B_{i,j})$  с максимальным значением  $B_{i,j}$ . Триады, не вошедшие в  $L'$  помещаются в список  $L''$  так, чтобы он также оказался упорядоченным по убыванию значения  $B_{i,j}$ .

Полное множество триад будем называть *бинарными таксонами* (БТ). Триады списка  $L'$  назовем *множеством бинарных классифицирующих таксонов* (БКТ). Каждому БКТ поставим в соответствие множество пересечений элементов их доминант — вершин с объединенными кластерами.

Из пар текстов множества БКТ и документов, им не принадлежащих, можно образовать новые кластеры. Каждый новый текст относим к БКТ по признаку максимальной близости. Она рассчитывается так же, как и выше — БКТ рассматривается как один текст, представленный множеством доминант пересечения и их объединенными кластерами. Кластеры текстов упорядочены по убыванию значения близости БКТ.

Рассматривая исходный список  $L$ , можно увидеть варианты объединения БКТ, а с ними и полученных кластеров. Действительно, пусть  $C_{i,j}(t_i, t_j, \dots)$  — кластер, которому соответствует  $\tau = (t_i, t_j, B_{i,j})$ . Если существует  $\tau' = (t_m, t_k, B_{m,k}) \in L$ ,  $m = (i|j)$ ,  $k \neq (i, j)$ ,  $l \neq (i, j, k)$  и существует  $C_{k,l} = (t_k, t_l, \dots)$ , то кластеры  $C_{k,l}$  и  $C_{i,j}$  можно объединить. Однако вероятность того, что тексты объединенных БКТ (а с ними и соответствующих кластеров) будут принадлежать одной предметной области, будет падать, поскольку  $B_{m,k} \leq B_{i,j}$  по определению.

<sup>1</sup> Продиктовано желанием учесть только "личный" вклад слова в образовании ассоциативных связей, без учета "родителей" и "братьев".

### 3. Эксперимент

Цель эксперимента состояла в сравнении результатов кластеризации текстов по бинарным таксонам с использованием различных методов определения весов слов и на разных множествах текстов.

#### 3.1. Методы определения весов слов и близости пар документов

1. Рассматриваются только доминанты. Вес доминанты — обратный ранг. Близость пары текстов определяется по формуле:

$$B_{i,j} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (w_{k,i} + w_{k,j}), \quad (2)$$

где  $(w_{k,i}, w_{k,j})$  — веса  $k$ -й доминанты в  $i$ -м и  $j$ -м текстах, принадлежащей пересечению доминант  $i$ -го и  $j$ -го текстов. Если размер пересечения доминант меньше 2, то  $B_{i,j} = 0$ .

2. Рассматриваются все слова текстов (без слов, принадлежащих стоп-списку). Вес  $k$ -го слова в  $i$ -м тексте определяется по модифицированной формуле TF-IDF:

$$w_{k,i} = \frac{F}{F_i} \log_2 \left( 1000 \frac{D}{D_i} \right), \quad (3)$$

где  $F$  — число повторений слова в тексте;  $F_i$  — число слов в тексте;  $D$  — число документов, содержащих данное слово;  $D_i$  — всего документов в подборке. Близость пары документов определяется по формуле (2).

3. Рассматриваются только доминанты, имеющие непустые пересечения своих кластеров. Близость пары документов определяется по формуле (1).

4. Для всех рассмотренных вариантов определения весов расчет геометрических расстояний между парами текстов в подпространствах, координатные оси которых определялись доминантами пересечения, а конкретные значения координат — весами доминант (либо слов по формуле (3)), дали худшие результаты, по сравнению с приведенными ниже.

#### 3.2. Тематические группы текстов, используемые в эксперименте

Тексты (в разное время взяты из Интернета) подбирались так, чтобы, по крайней мере, в них можно было указать группы, пересечение элементов которых в одном кластере недопустимо, иначе метод признается неработоспособным. Такими группами являются: "Политология", тексты которой не могут пересекаться с текстами объединенной тематической группы "Computer Science":

"СУБД", "Искусственный интеллект", "Сетевые операционные системы", "Компьютерная лингвистика". Элементы тематической группы "СУБД" и "Сетевые операционные системы" не могут иметь пересечений с текстами группы "Философия". Очевидно, допустимы комбинации внутри группы "Computer Science". Другие комбинации также возможны, но крайне нежелательны.

Большая часть учебников и монографий разделена на отдельные главы, которые считаются отдельными текстами. Исключение составляют: монография И. Смирнов, Е. Безносюк, А. Журавлев. "Психотехнологии" и учебник Т. П. Пушкина. "Медицинская психология". "Психотехнологии" — политематический текст, оперирующий не только психологическими понятиями, но и понятиями из предметной области "Computer Science". Текст "Медицинская психология" скорее монотематичен. Предполагалось, что в подборках, включающих эти тексты и тексты из "Computer Science", эти два должны составлять пару с большим значением близости по сравнению с их возможными связями с другими текстами.

Число текстов в предметных областях (субъективная классификация): Сетевые операционные системы — 10; СУБД — 13; Психология — 18; Философия — 54; Искусственный интеллект — 18; Компьютерная лингвистика — 15; Политология — 32. Итого — 160.

Эксперименты проведены на следующих множествах текстов:

**множество 1** — тексты ПО СУБД и один политематический текст ("Психотехнологии"),

**множество 2** — тексты ПО СУБД и два текста из ПО "Психология" (добавлен текст "Медицинская психология"),

**множество 3** — полное множество из 160 текстов.

Для описания результатов экспериментов используются следующие характеристики:

*Адекватность* (А) =  $[1|0,5]$  субъективная характеристика, 1 — оба документа относятся к одной предметной области; 0,5 — к разным областям. Применяется только к бинарным таксонам.

*Тематическая адекватность* (ТА) — отношение числа документов фиксированной тематики к общему числу документов в кластере.

*Средняя адекватность* (СА) определяется отношением сумм А к числу БТ.

*Средняя тематическая адекватность* (СТА) — отношение суммы ТА по всем кластерам вхождения документов фиксированной ПО к общему числу кластеров вхождения.

*Полнота* (П) — отношение числа текстов во всех кластерах к входному числу текстов.

### 3.3. Результаты

#### 3.3.1. Множество 1. Определяются только БКТ.

**Формула 2.** Число БКТ = 7;  $P = 1,0$ ;  $CA = 0,93$ .

Вводная лекция Кузнецова и текст "Психотехнологии" вошли в 7-й БКТ. Лекции Кузнецова и Ладыженского полностью разделены.

**TF-IDF (формула 3).**

Число БКТ = 7;  $P = 1,0$ ;  $CA = 0,93$ .

Текст "Психотехнологии" вошел в 4-й БКТ вместе с 3-й лекцией Кузнецова. Лекции Кузнецова и Ладыженского разделены не полностью.

**Формула 1. Определяются только БКТ:**

Число БКТ = 6;  $P = 0,86$ ;  $CA = 1,0$ .

Не кластеризованы два текста: "Психотехнологии" и 6-я лекция Кузнецова. Лекции Кузнецова и Ладыженского полностью разделены.

#### 3.3.2. Множество 1. Определяются все БТ.

**Формула 2.** Число БТ = 91;  $P = 1,0$ ;  $CA = 0,93$ .

Текст "Психотехнологии" впервые входит в 55-й БТ вместе с 5-й лекцией Кузнецова.

**TF-IDF.** Число БТ = 91;  $P = 1,0$ ;  $CA = 0,93$ .

Текст "Психотехнологии" входит в 18 БТ вместе с 3-й лекцией Кузнецова.

**Формула 1.** Число БТ = 52;  $P = 1,0$ ;  $CA = 0,99$ .

Текст "Психотехнологии" и 1-я (вводная) лекция Кузнецова вошли в 51-й БТ.

#### 3.3.3. Множество 2. Определяются только БКТ.

**А. Формула 2.** Число БКТ = 7;  $P = 0,93$ ;  $CA = 1,0$ .

Оба текста по психологии входят в 5-й кластер. Лекции Кузнецова и Ладыженского полностью разделены. Не кластеризована вводная лекция Кузнецова.

**Б. TF-IDF.** Число БКТ = 7;  $P = 0,93$ ;  $CA = 1,0$ .

Оба текста по психологии входят в 5-й БКТ. Лекции Кузнецова и Ладыженского полностью разделены. Не кластеризована вторая лекция Кузнецова.

**В. Формула 1.** Число БКТ = 7;  $P = 0,93$ ;  $CA = 1,0$ .

Оба текста по психологии входят в 6-й БКТ. Лекции Кузнецова и Ладыженского полностью разделены. Не кластеризована 6-я лекция Кузнецова.

#### 3.3.4. Множество 2. Определяются все БТ.

**А. Формула 2.** Число БТ = 103;  $P = 1,0$ ;  $CA = 0,88$ .

Оба текста по психологии впервые входят в 5-й БТ. Текст "Медицинская психология" еще входит в 11 БТ.

**Б. TF-IDF.** Число БТ = 105;  $P = 1,0$ ;  $CA = 0,88$ .

Уже в 10-м БТ встречаются 5-я лекция Кузнецова и "Медицинская психология", а совместно

"Медицинская психология" и "Психотехнологии" входят в 23-й БТ.

**В. Формула 1.** Число БТ = 53;  $P = 1,0$ ;  $CA = 0,99$ .

Тексты "Психотехнологии" и "Медицинская психология" впервые вошли в 9-й БТ, при этом "Медицинская психология" вошла только в данный БТ. Текст "Психотехнологии" вошел еще в 52-й БТ вместе с вводной лекцией Кузнецова.

#### 3.3.5. Множество 3. Определяются только БКТ.

**А. Формула 2.** Число БКТ = 75;  $P = 0,94$ ;  $CA = 0,9$ .

Есть недопустимые корреляции текстов из разных предметных областей (например, из "Психологии" и "Политологии").

**Б. TF-IDF.** Число БКТ = 79;  $P = 0,99$ ;  $CA = 0,96$ .

Недопустимых корреляций нет. Все тексты из предметной области "Политология" четко разделены (нет вхождений текстов разных авторов в один БКТ). Однако текст "Психотехнологии" входит в 5-й БКТ совместно с текстом "Методы искусственного интеллекта. Введение", а текст "Медицинская психология" входит в 27-й БКТ совместно с текстом "Петухов В. В. Типология индивидуальности". Есть корреляция текстов из предметных областей "ИИ" и "Философия", "Психология" и "Философия".

**В. Формула 1.** Число БКТ = 36;  $P = 0,45$ ;  $CA = 0,97$ .

Недопустимых корреляций нет. Все корреляции текстов из разных предметных областей только внутри "Computer Science". Все тексты из предметной области "Политология" четко разделены (нет вхождений текстов разных авторов в один БКТ). Тексты "Психотехнологии" и "Медицинская психология" входят в 32 БКТ и более ни с какими текстами не коррелируют.

#### 3.3.6. Множество 3. Определяются все БТ.

**А. Формула 2.** Число БТ = 5241;  $P = 1,0$ ;  $CA = 0,67$ .

Есть недопустимые корреляции (даже "Computer Science" и "Политология").

**Б. TF-IDF.** Число БТ = 12 393;  $P = 1,0$ ;  $CA = 0,6$ .

Есть недопустимые корреляции текстов (даже "Computer Science" и "Политология").

**В. Формула 1.** Число БТ = 234;  $P = 0,5375$ ;  $CA = 0,86$ .

Недопустимых корреляций нет. Есть корреляции внутри "Computer Science". Тексты из предметной области "Философия" коррелируют только с текстами из той же предметной области. Все тексты из предметной области "Политология" четко разделены (нет вхождений текстов разных авторов в один БТ). Тексты "Психотехнологии" и "Меди-

цинская психология" впервые входят в 160-й БТ, затем текст "Психотехнологии" входит совместно с вводной лекцией Кузнецова в 231-й БТ. Текст "Медицинская психология" более ни с какими текстами не коррелирует.

### 3.3.7. Классификация текстов по БКТ.

Добавим тексты множества 3, не вошедшие в БКТ, к БКТ так, как это описано в конце раздела 2. Этот процесс можно рассматривать как классификацию текстов по предопределенным рубрикам. Сами рубрики могут быть представлены наиболее весомыми сочетаниями доминант-вершин с элементами их кластеров или иными устойчивыми сочетаниями [18].

В итоге добавлено 15 текстов,  $СТА = 0,87$ . Полнота выросла до значения  $0,53$ . Данные по тематической полноте и тематической адекватности сведены в таблицу.

Результат классификации 160 текстов по БКТ

Предметная область	ТА	ТП
СУБД	0,92	1,0
Сетевые операционные системы	0,78	1,0
Искусственный интеллект	0,90	0,55
Компьютерная лингвистика	0,52	0,46
Философия	1,0	0,57
Политология	1,0	0,40
Психология	1,0	0,16

### Выводы

Приведенные результаты убедительно показывают, что лучшей разделительной способностью обладает предложенный нами метод определения попарной близости текстов на основе определения "степени смысловой близости доминант". Даже выдающийся по значениям адекватности и полноты результат 3.3.5(Б), при более детальном рассмотрении корреляций, не опровергает этого вывода. Сравнение результатов 3.3.6(Б) и 3.3.6(В) наглядно показывает, что метод, основанный на формуле TF-IDF, позволяет построить все возможные парные корреляции.

### Список литературы

1. Пескова О. В. Автоматическое формирование рубрикатора полнотекстовых документов // Труды 10-й Всероссийской научной конференции "Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции" — RCDL'2008, Дубна, Россия, 2008.
2. Агеев М. С. Методы автоматической рубрикации текстов, основанные на машинном обучении и знаниях экспертов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Москва. 2004. URL:[http://www.cir.ru/docs/ips/publications/2005\\_diss\\_ageev.pdf](http://www.cir.ru/docs/ips/publications/2005_diss_ageev.pdf)
3. Киселев М. В., Пивоваров В. С., Шмулевич М. М. Метод кластеризации текстов, учитывающий совместную встречаемость ключевых терминов, и его применение к анализу тематической структуры новостного потока, а также ее динамики // URL:[http://company.yandex.ru/grant/2005/10\\_Kiselev\\_102930.pdf](http://company.yandex.ru/grant/2005/10_Kiselev_102930.pdf)
4. Чанышев О. Г. Ассоциативная модель естественного языка // Вестник Омского государственного университета. 1997. Вып. 4. С. 17—20.
5. Чанышев О. Г. Ассоциативная модель реального текста и ее применение в процессах автоиндексирования // Труды Седьмой национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием КИИ'2000. М.: Физико-математическая литература, 2000. С. 430—438.
6. Финн В. К., Черный А. И. Интеллектуальные системы и новые информационные технологии в ВИНТИ // Итоги науки и техники. Информатика. Т. 15. 1991. С. 3.
7. Файн В. С. Машинное понимание естественного языка в рамках концепции реагирования // Интеллектуальные процессы и их моделирование. М.: Наука. 1987. С. 375—392.
8. Tibbo H. R. Indexing For The Humanities // JASIS. 1994. V. 45, N 8. P. 607—619.
9. Bookstein A., Klein S. T. Clumping Properties of Content-Bearing Words // JASIS. 1998. N 2.
10. Арапов М. В. Квантитативная лингвистика. М.: Наука, 1988.
11. Найссер У. Познание и реальность. М.: Прогресс, 1981.
12. Лебедев А. Н. Память человека, ее механизмы и границы // Исследование памяти / Отв. ред. Н. Н. Корж. М.: Наука, 1990. С. 104—118.
13. Веккер Л. М. Психика и реальность. Единая теория психических процессов. М.: Смысл, 1998.
14. Арнольд И. В. Лексико-семантическое поле в языке и тематическая сетка текста // Текст как объект комплексного анализа в ВУЗе. Л.: Изд. ЛГПИ им. А. И. Герцена, 1984. С. 3—11.
15. Математическая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1977. Т. 1. С. 1106.
16. Чанышев О. Г. Критерий близости документов и кластеризация // Математические структуры и моделирование: сб. научн. тр. / Под ред. А. К. Гуца. Омск: ОмГУ, 2001. Вып. 8. С. 111—120.
17. Чанышев О. Г. Автоматическая классификация текстов по доминантным лексемам // VII Международная конф. по электронным публикациям EL-Pub2002. Новосибирск, 2002. URL:[http://www.sbras.ru/ws/list\\_doc.dhtml?ru+45+0+40](http://www.sbras.ru/ws/list_doc.dhtml?ru+45+0+40).
18. Чанышев О. Г. Автоматическое извлечение кандидатов в термины предметной области из представляющих ее текстов // Информационные технологии. 2008. № 2. С. 2—7.

**В. А. Горбатов**, д-р техн. наук,  
д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф. САПР,  
Московский государственный  
горный университет,

**И. И. Добрик**, генеральный директор,  
генеральный конструктор,  
Морской научно-исследовательский  
институт радиоэлектроники "Альтаир"  
E-mail: mail@altair-navy.ru

## Теоретико-графовое экспертное оценивание альтернатив

*Оценка эффективности системы по ее признакам, например, прогнозирование развития сложных процессов при автоматизированном проектировании систем — эти и многие другие задачи сводятся к экспертному оцениванию альтернатив. Предлагается эффективное экспертное оценивание альтернатив, основанное на оптимальной теоретико-графовой стратегии, включающей следующее преобразование: рейтинговый граф → теоретико-графовая параллельная форма → диаграмма Хассе.*

**Ключевые слова:** экспертное оценивание, альтернатива, теоретико-графовая стратегия, диаграмма Хассе, рейтинговый граф

Генерация альтернатив является наиболее ответственным этапом экспертного прогнозирования. При этом часто используются эвристики, приводящие в большинстве случаев к успеху. Порождая максимальное число альтернатив, каждый эксперт должен осознавать свою психологическую несовместимость с другими, и поэтому создавать благоприятные условия для успешной работы других экспертов.

Среди множества организационных форм порождения альтернатив используются: метод мозгового штурма, морфологический анализ, деловые игры, метод сценариев, синектика.

*Метод мозгового штурма* состоит в последовательном порождении альтернатив каждым экспертом при наличии всей экспертной группы, внимательно с пониманием слушающей выступающего эксперта.

При *морфологическом анализе* перечисляются все независимые параметры производственного процесса, их значения и возможные комбинации векторов, составленных из значений этих параметров.

*Деловые игры* используют для имитации различных вариантов прогноза, где участниками игры являются эксперты.

*Метод сценариев* применяют, когда для прогноза необходимо определить варианты будущего течения событий. Здесь альтернативами являются различные последовательности действий и соответствующие за ними ситуации.

*Синектика* — порождение альтернатив на основе ассоциативного мышления, поиска аналогий решаемой задачи, на основе принципа Л. фон Бергаланфи об изоморфизме законов.

Для определения предпочтений экспертов будем использовать ранжирование, непосредственное оценивание, последовательное сравнение, попарное сравнение. Ранжирование заключается в упорядочении альтернатив в порядке их предпочтения. Непосредственное оценивание заключается во взвешивании каждой альтернативы численными значениями в принятой шкале измерения. Метод последовательного сравнения является комбинацией методов ранжирования и непосредственного оценивания.

Метод попарного сравнения представляет собой процедуру построения каждым экспертом двоичной матрицы рейтингов (рейтинговой матрицы)  $R[r_{ij}]_{n \times n}$ ,

$$r_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } r(a_i) < r(a_j), \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (1)$$

где  $r(a_i)$ ,  $r(a_j)$  — рейтинги альтернатив (признаков)  $a_i$ ,  $a_j$  соответственно;  $n$  — число альтернатив.

Стратегия предлагаемого экспертного оценивания состоит из выполнения следующих этапов:

**1-й этап.** Преобразование рейтингового графа  $G(R_E)$  в диаграмму Хассе  $H(R_E)$ ,  $H(R_E) = \langle \{a_k/a_k\text{-альтернатива}\}, \leq \rangle$ , где " $\leq$ " — бинарное отношение частичной упорядоченности [1];  $E$  — идентификатор  $E$ -го эксперта.

Следуя теории характеристического анализа [2–5], очевидно следующее утверждение.

**Утверждение.** Контур является запрещенной фигурой экспертизы, проводимой на основе попарного сравнения.

**Доказательство.** Утверждение справедливо, так как истинные попарные сравнения рейтингов обладают свойством вложимости. Следовательно, до построения диаграммы Хассе необходимо устранить все контуры в рейтинговом графе  $G(R_E)$ . Стандартная процедура выделения контуров в графе заключается в вычислении диаграммы элементов в матрице достижимости  $D(G(R_E))$ .

$$D(G(R_E)) = \prod_{i=1}^{|V|-1} US^i G(R_E), \quad (2)$$

где  $V$  — носитель графа  $G(R_E)$ ;  $S(G(R_E))$  — матрица смежности рейтингового графа  $E$ -го эксперта.

Временная сложность алгоритма реализации процедуры (2) достаточно велика при большой мощности носителя  $|V|$  графа  $G(R_E)$ .

Предложим более эффективную процедуру порождения контуров, основанную на вычислении окрестностей (сечений) произвольно зафиксированной вершины  $v_\alpha \in G(R_E)$  с последовательностью радиусов  $P_k(v_\alpha), |V|$  — мощность носителя рейтингового графа:  $G(R_E): (P_k(v_\alpha)/k = 1, 2, \dots, |V|; \Gamma(v_\alpha), \Gamma^2(v_\alpha) = \Gamma(\Gamma(v_\alpha)), \Gamma^3(v_\alpha) = \Gamma(\Gamma(\Gamma(v_\alpha))), \dots, \Gamma^{|V|}(v_\alpha))$ . Очевидно, что в графе, соответствующем множеству сечений вершины  $v_\alpha \{ \Gamma^i(v_\alpha)/i = 1, 2, \dots, |V| \}$ , путь, имеющий начало и конец, взвешенные одной и той же вершиной рейтингового графа, образует контур в графе  $G(R_E)$ .

Устранение контуров в графе  $G(R_E)$  сводится к покрытию строк столбцами семантической таблицы [4, 5]  $T(R_E)$ .

Порождение всех покрытий осуществляем с помощью преобразования мультипликативно-аддитивной формы (МАФ) в аддитивно-мультипликативную форму (АМФ). В полученном выражении каждый мультипликативный член однозначно соответствует покрытию семантической таблицы [1].

Каждое покрытие порождает теоретико-графовую ярусно-параллельную форму (ЯПФ), определяемую графом  $G(R_E)$  без контуров. После сужения сигнатуры графа, определяемого ЯПФ в результате удаления транзитивно замыкающих дуг с точностью до гомеоморфизма, получаем диаграмму Хассе.

Рассмотрим оценивание альтернатив при участии трех экспертов  $|\{E\}| = 3$  и пяти альтернатив,  $|V(G(R_E))| = 5$ .

*1-й эксперт.* Рейтинговый граф  $G(R_1)$  представлен экспертом в виде, приведенном на рис. 1.

При построении множества сечений, для определенности, выбираем альтернативу  $a_1$ :

$$\Gamma(a_1) = \{a_2, a_3, a_4\},$$

$$\Gamma^2(a_1) = \{a_4, a_2, a_3, a_5\},$$

$$\Gamma^3(a_1) = \{\{a_3, a_5\}, a_4, a_2, a_1\},$$

$$\Gamma^4(a_1) = \{a_2, a_1, \{a_3, a_5\}, a_4, \{a_2, a_3, a_4\}\},$$

$$\Gamma^5(a_1) = \{a_4, \{a_2, a_3, a_4\}, a_2, \{a_3, a_5\}\}.$$

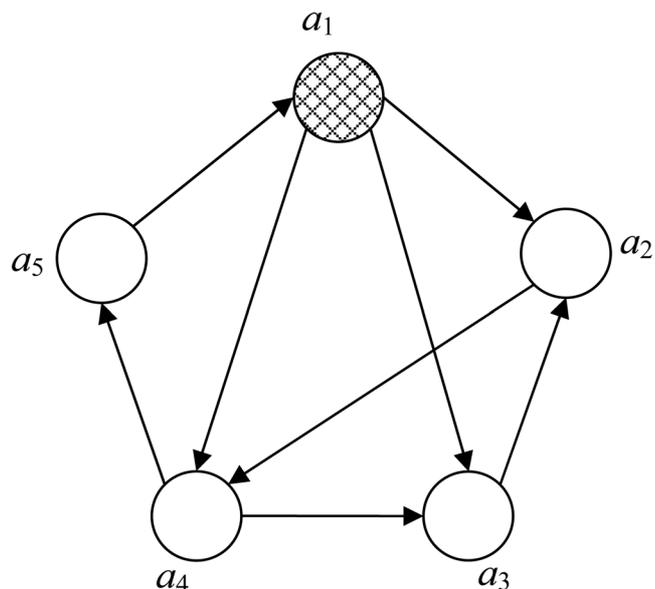


Рис. 1

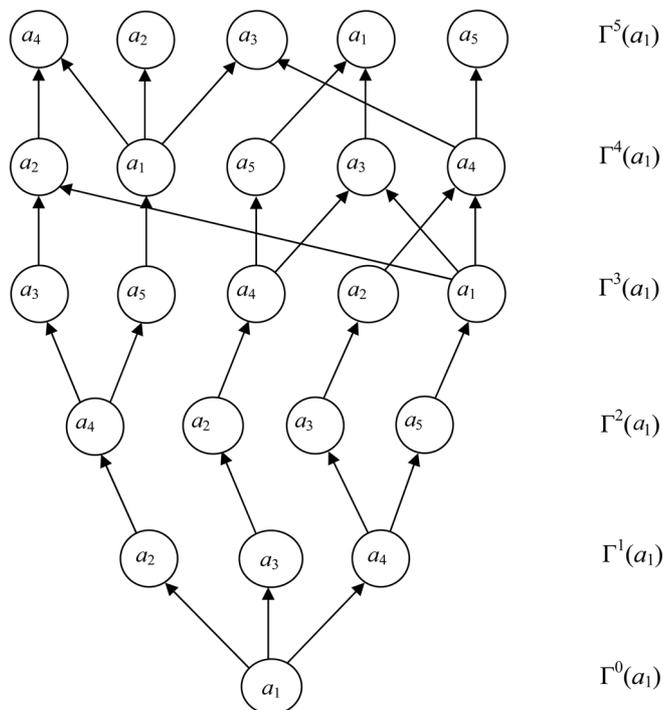


Рис. 2

Таблица 1

i-й контур	j-я дуга							
	$b = (a_2, a_4)$	$c = (a_4, a_3)$	$d = (a_3, a_2)$	$e = (a_4, a_5)$	$k = (a_5, a_1)$	$m = (a_1, a_2)$	$p = (a_1, a_3)$	$j = (a_1, a_4)$
$(a_2, a_4, a_3, a_2)$	1	1	1	0	0	0	0	0
$(a_2, a_4, a_5, a_1, a_2)$	1	0	0	1	1	1	0	0
$(a_1, a_3, a_2, a_4, a_5, a_1)$	1	0	1	0	1	0	1	0
$(a_4, a_5, a_1, a_4)$	0	0	0	1	1	0	0	1

Множество сечений определяет граф  $G_{\mathcal{A}}(E_1)$ , задающий теоретико-структурную ярусно-параллельную форму (рис. 2).

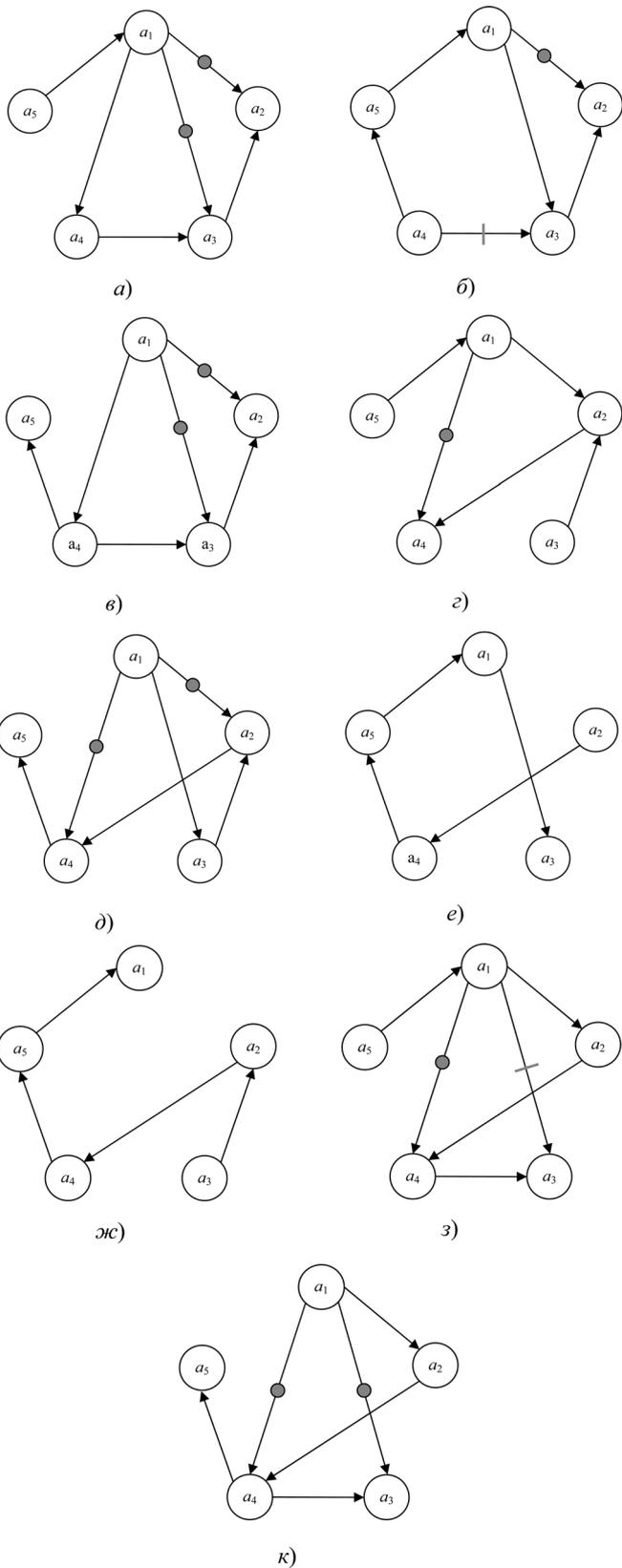


Рис. 3

Номер яруса в ЯПФ равен радиусу соответствующего сечения.

Анализируя граф, определяемый ЯПФ, получаем контуры  $(a_2, a_4, a_3, a_2)$ ,  $(a_2, a_4, a_5, a_1, a_2)$ ,  $(a_1, a_3, a_2, a_4, a_5, a_1)$ ,  $(a_4, a_5, a_1, a_4)$ .

Семантическая таблица имеет следующий вид (табл. 1).

Единица в клетке  $(i, j)$  табл. 1 показывает входение  $j$ -й дуги в  $i$ -й контур, ноль — отсутствие такого входения.

Преобразуем МАФ в АМФ, используя законы алгебры Кантора [1]:  $\cap(b \cup c \cup d) \cap (b \cup e \cup k \cup m) \cap \cap(b \cup d \cup k \cup p) \cap (e \cup k \cup s) = b \cap e \cup b \cap s \cup b \cap k \cup s \cap e \cap \cap p \cup s \cap k \cup s \cap m \cap d \cap s \cup c \cap m \cap p \cup d \cap e \cup d \cap k$ .

Получим покрытия по числу мультипликативных членов:

- $\Pi_1 = \{b, e\}, \quad \Pi_6 = \{c, m, d, s\},$
- $\Pi_2 = \{b, s\}, \quad \Pi_7 = \{c, m, p, s\},$
- $\Pi_3 = \{b, k\}, \quad \Pi_8 = \{d, e\},$
- $\Pi_4 = \{c, e, p\}, \quad \Pi_9 = \{d, k\}.$
- $\Pi_5 = \{c, k\},$

Каждое покрытие, соответствующее теоретико-структурной ЯПФ, порождает граф  $\tilde{G}(R_1)$ , являющийся разностью рейтингового графа  $G(R(w_1))$  и дуг, входящих в покрытие табл. 1 (рис. 3).

Удаляя транзитивно замыкающие и гомеоморфно транзитивно замыкающие дуги, получаем соответствующие диаграммы Хассе (рис. 4).

**Примечание.** На рис. 3 и ниже транзитивно замыкающие дуги отмечены точкой, гомеоморфно транзитивно замыкающие дуги перечеркнуты; при согласовании высот вершин используются понятия гомеоморфизма, выводимые вершины не взвешены идентификатором альтернативы и заштрихованы.

**2-й этап.** Оцифровка альтернатив — вычисление среднего дефекта экспертизы  $d(\varepsilon)$ , среднего рейтинга каждой альтернативы  $r_{cp}(a_i)$  и его доверительного значения  $\tilde{r}_{cp}(a_i)$ .

Дефектом  $d(\varepsilon)$  экспертизы называется квадратный радикал среднего значения разностей значений мощности сигнатуры  $|r(G(R_\varepsilon))|$  рейтингового графа  $G(R_\varepsilon)$  и мощности сигнатуры разностей рейтингового графа и образующих покрытий семантической таблицы.

Другими словами, дефектом  $d(\varepsilon)$  называется квадратный радикал суммы средней мощности покрытий семантической таблицы:

$$d(\varepsilon) = (k(\pi_i)^{-1} \sum_{i=1}^{k(\pi_i)} |\pi_i|)^{0,5}.$$

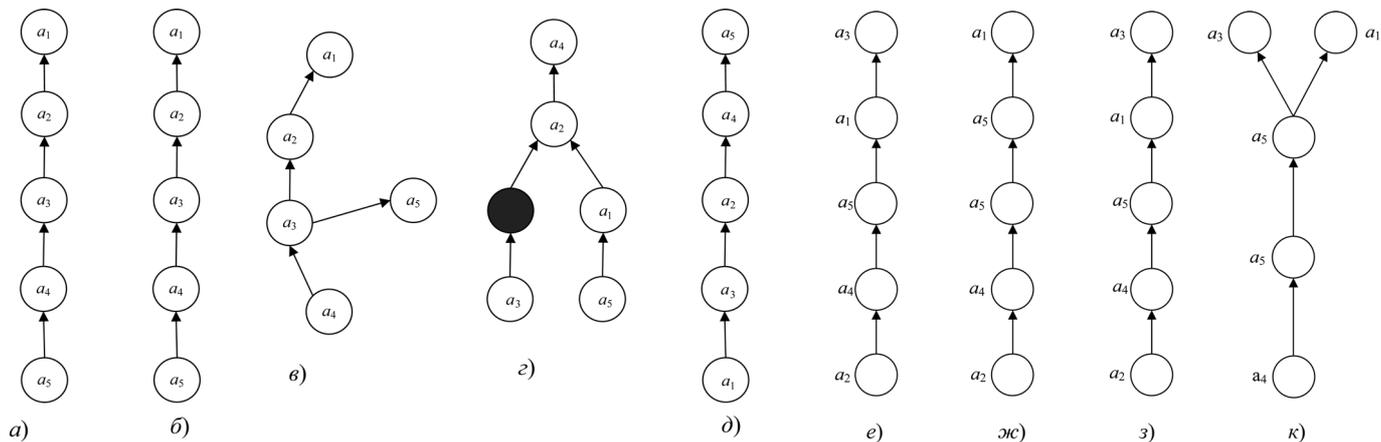


Рис. 4

Рейтинг  $r(a_i)$  альтернативы будем оценивать как среднее значение высот, соответствующих вершине в диаграмме Хассе:

$$r(a_i) = (k(\pi_i))^{-1} \sum_{j=1}^{k(\pi_i)} h_j(a_i),$$

$k(\pi_i)$  — число покрытий семантической таблицы;  $h_j(a_i)$  — высота вершины  $v(a_i)$ , соответствующей альтернативе  $a_i$ .

Вычисляем среднее значение рейтинга каждой альтернативы  $a_i$  как среднее значение высоты  $h_j(v(a_i))$ , соответствующей вершине  $v(a_i)$  в диаграммах Хассе (табл. 2).

Определяем средний рейтинг альтернативы  $a_i$  (табл. 3):

$$r_{cp}(a_i) = 9^{-1} \sum_{i=1}^9 h(a_i), \quad (3)$$

где  $h(a_i)$  — высота вершины  $v(a_i)$  в диаграмме Хассе.

Таблица 2

$a_i$	$(H_j(R_1))$								
	$H_1$	$H_2$	$H_3$	$H_4$	$H_5$	$H_6$	$H_7$	$H_8$	$H_9$
$a_1$	1	2	0	1	0	3	4	1	0
$a_2$	4	4	3	2	2	0	1	2	1
$a_3$	3	3	2	0	1	4	0	4	2
$a_4$	2	0	1	3	3	1	2	3	1
$a_5$	0	1	2	0	4	2	3	0	2

Таблица 3

Альтернатива $a_i$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
$r_{cp}(a_i)$	1,33	2,11	2,11	1,78	1,55
$\tilde{r}_{cp}(a_i)$	1,00	1,59	1,59	1,41	1,16

Доверительный рейтинг альтернативы  $a_i$

$$\tilde{r}(a_i) = (\sqrt{d(\varepsilon)})^{-1} r_{cp}(a_i). \quad (4)$$

Итог экспертизы 1-го эксперта имеет следующий вид:

$$a_1 \leq a_5 \leq a_4 \leq a_3 \leq a_2.$$

Аналогично обрабатываем рейтинговые графы 2-го и 3-го экспертов  $G(R_2)$  (рис. 5) и  $G(R_3)$  соответственно (рис. 6).

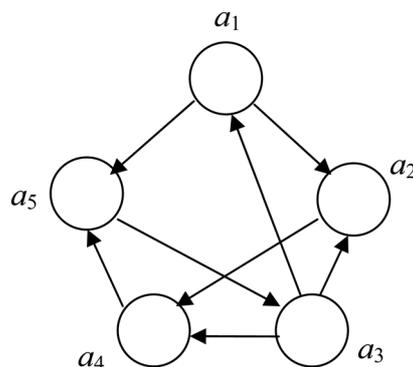


Рис. 5

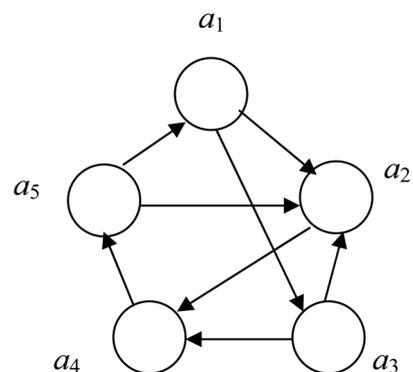


Рис. 6

**Информация о результатах работы 2-го эксперта.**

Граф ЯПФ представлен на рис. 7.

Семантическая таблица имеет следующий вид (табл. 4).

Покрытиями табл. 4 являются

- $\Pi_1 = \{(5, 3)\},$   $\Pi_2 = \{(4, 5), (3, 1)\},$   
 $\Pi_3 = \{(4, 5), (1, 5)\},$   $\Pi_4 = \{(2, 4), (3, 1), (3, 4)\},$   
 $\Pi_5 = \{(2, 4), (3, 4), (1, 5)\},$   $\Pi_6 = \{(3, 1), (3, 2), (3, 4)\},$   
 $\Pi_7 = \{(1, 2), (3, 2), (3, 4), (1, 5)\}.$

Им взаимно однозначно соответствуют рейтинговые графы без контуров (рис. 8, а–ж) и диаграммы Хассе (рис. 9).

**Примечание.** На рис. 8 точкой на дуге отмечены транзитивно замыкающие дуги, перечеркнутые дуги соответствуют гомеоморфно транзитивно замыкающим дугам.

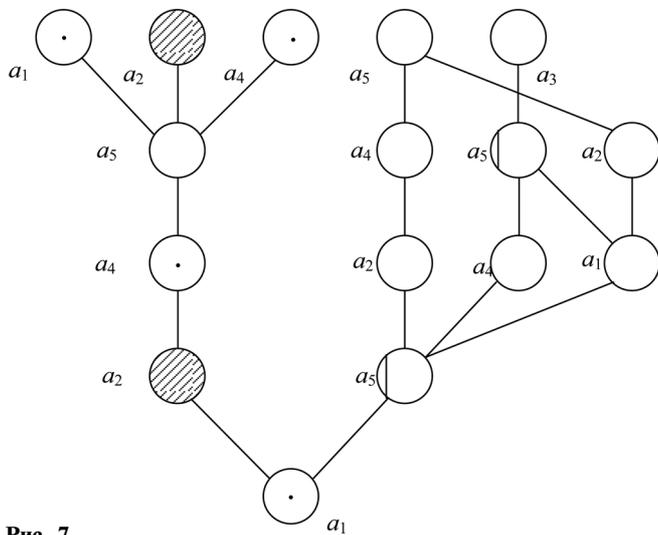


Рис. 7

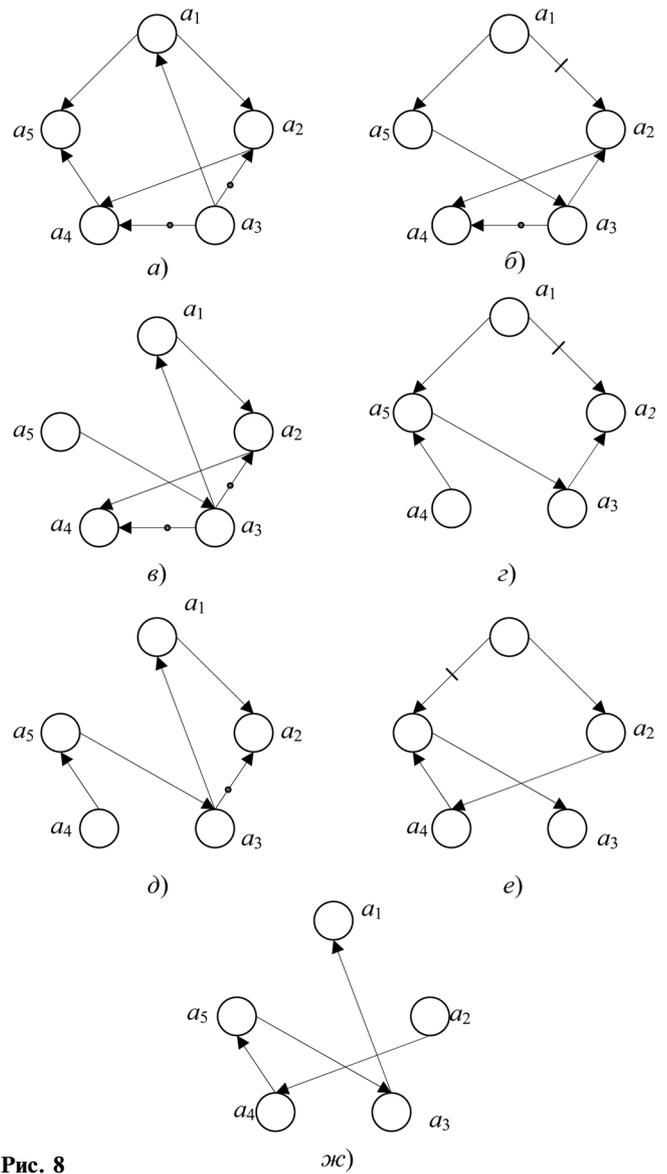


Рис. 8

Таблица 4

<i>i</i> -й контур	<i>j</i> -я дуга							
	$b = (a_1, a_2)$	$c = (a_2, a_4)$	$d = (a_4, a_5)$	$e = (a_5, a_3)$	$k = (a_3, a_1)$	$m = (a_3, a_2)$	$p = (a_3, a_4)$	$s = (a_1, a_5)$
$(a_1, a_2, a_4, a_5, a_3, a_1)$	1	1	1	1	1	0	0	0
$(a_2, a_4, a_5, a_3, a_2)$	0	1	1	1	0	1	0	0
$(a_4, a_5, a_3, a_4)$	0	0	1	1	0	0	1	0
$(a_1, a_5, a_3, a_1)$	0	0	0	1	1	0	0	1
$(a_5, a_3, a_4, a_5)$	0	0	1	1	0	0	1	0

Таблица 5

Альтернатива $a_i$	$H_j(R_2)$							$r_{cp}(a_i)$	$\tilde{r}_{cp}(a_i)$
	$H_1$	$H_2$	$H_3$	$H_4$	$H_5$	$H_6$	$H_7$		
$a_1$	1	0	2	0	3	0	4	1,43	0,71
$a_2$	2	3	3	3	4	1	0	2,29	1,43
$a_3$	0	2	1	2	2	4	3	2,00	1,25
$a_4$	3	4	4	0	0	2	1	2,00	1,25
$a_5$	2	1	0	1	1	3	2	1,43	0,71

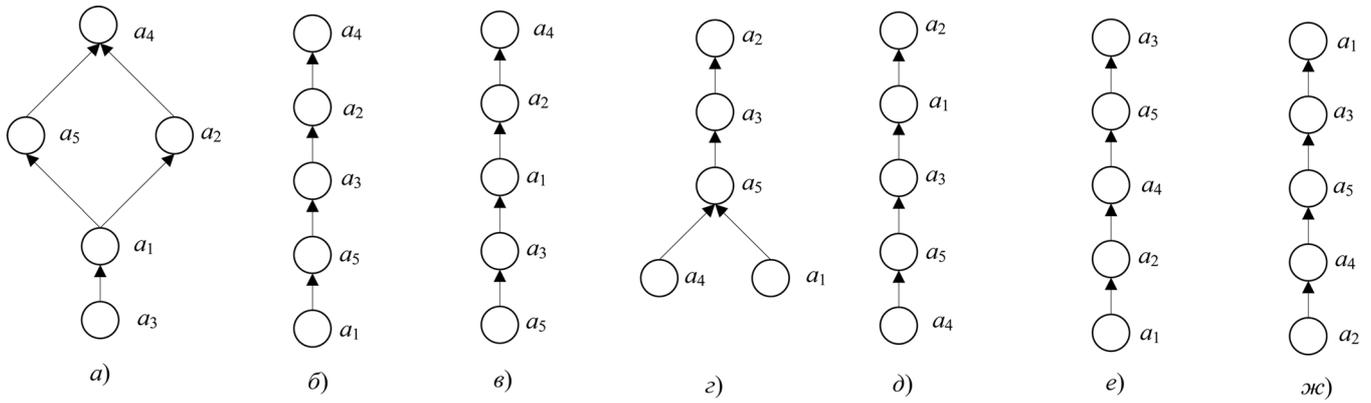


Рис. 9

Дефект  $d(E_2)$  экспертизы равен

$$d(E_2) = 7^{-1} \sum_{i=1}^7 |\Pi_i|^{0,5} =$$

$$= (7^{-1}(1 + 2 \cdot 2 + 3 \cdot 3 + 4))^{0,5} = \sqrt{2,57} \approx 1,6.$$

Таблица высот вершин, соответствующих альтернативам (табл. 5), определяет средние значения рейтингов каждой альтернативы  $r_{cp}(a_i)$  и  $\tilde{r}(a_i)$ .

Итог экспертизы 2-го эксперта имеет следующий вид:

$$a_1 \leq a_5 \leq a_3 \leq a_4 \leq a_2.$$

**Информация о результатах работы 3-го эксперта.**

Граф ЯПФ представлен на рис. 10, семантическая таблица распределения дуг по контурам имеет вид табл. 6.

Семантическая таблица имеет семь покрытий:

$$\Pi_1 = \{(a_4, a_5)\}, \Pi_2 = \{(a_2, a_4), (a_5, a_1)\},$$

$$\Pi_3 = \{(a_5, a_1), (a_5, a_2)\}, \Pi_4 = \{(a_2, a_4), (a_1, a_3)\},$$

$$\Pi_5 = \{(a_2, a_4), (a_3, a_4)\},$$

$$\Pi_6 = \{(a_1, a_2), (a_5, a_2), (a_1, a_3)\},$$

$$\Pi_7 = \{(a_1, a_2), (a_5, a_2), (a_3, a_4), (a_3, a_4), (a_3, a_2)\},$$

которым взаимно однозначно соответствуют семь графов  $G(R_3)$  без контуров (рис. 11, а—ж) и семь соответствующих диаграмм Хассе (рис. 12, а—ж).

Дефект экспертизы равен

$$d(E_3) = (7^{-1} \sum_{i=1}^7 |\Pi_i|)^{0,5} =$$

$$= (7^{-1}(1 + 4 \cdot 2 + 3 + 4))^{0,5} = \sqrt{2,29} = 1,5.$$

Таблица высот вершин, соответствующих альтернативам (табл. 7), определяет средние значения рейтингов каждой альтернативы  $r_{cp}(a_i)$  и  $\tilde{r}(a_i)$ .

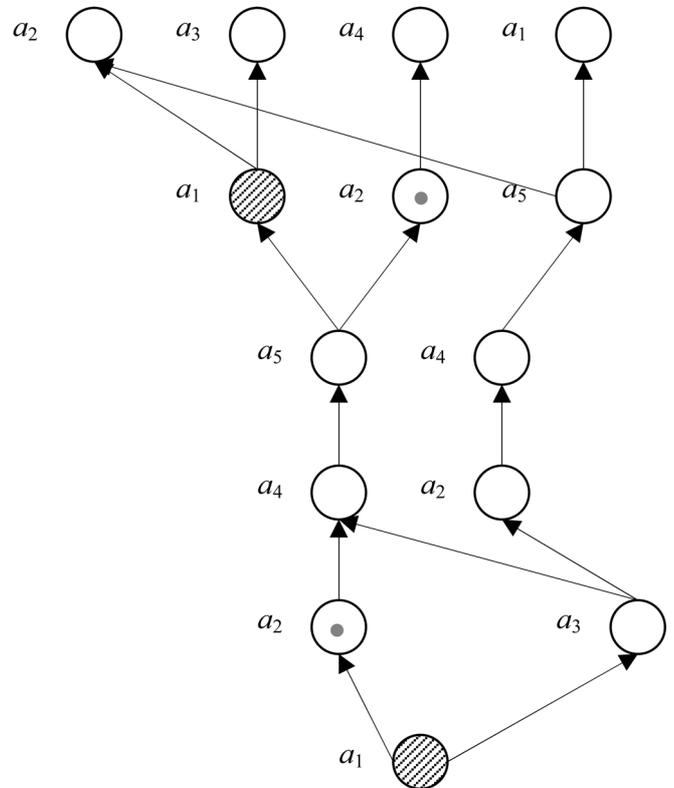


Рис. 10

Таблица 6

i-й контур	j-я дуга							
	$b = (a_1, a_2)$	$c = (a_2, a_4)$	$d = (a_4, a_5)$	$e = (a_5, a_1)$	$k = (a_5, a_2)$	$m = (a_1, a_3)$	$p = (a_3, a_4)$	$s = (a_3, a_2)$
$(a_1, a_2, a_4, a_5, a_1)$	1	1	1	1	0	0	0	0
$(a_2, a_4, a_5, a_2)$	0	1	1	0	1	0	0	0
$(a_2, a_4, a_5, a_1, a_2)$	1	1	1	1	0	0	0	0
$(a_1, a_3, a_4, a_5, a_1)$	0	0	1	1	0	1	1	0
$(a_1, a_3, a_2, a_4, a_5, a_1)$	0	1	1	1	0	1	0	1

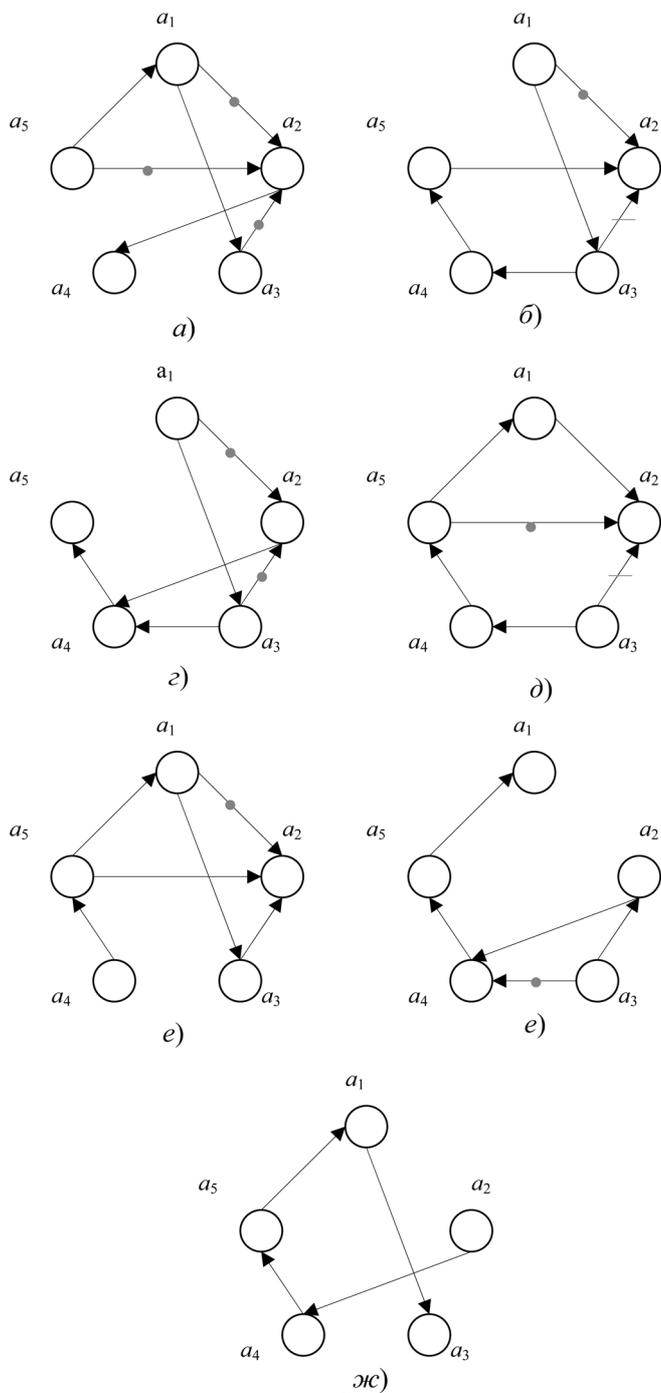


Рис. 11

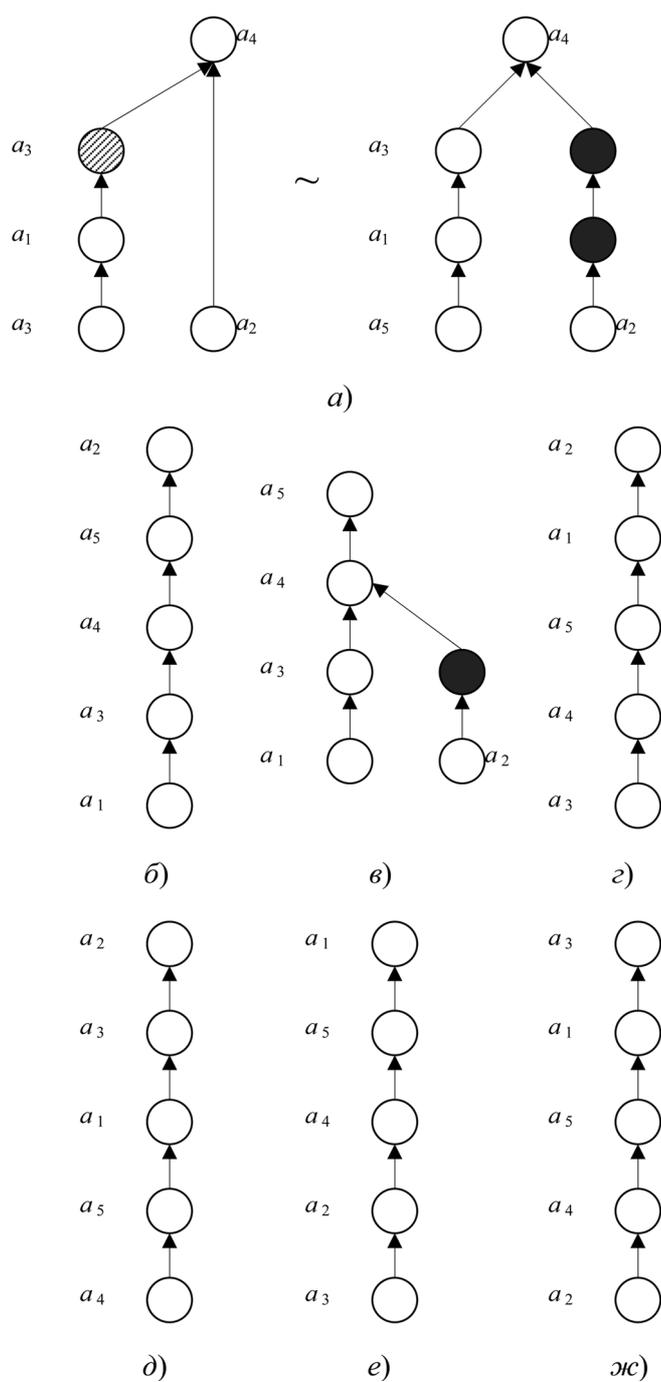


Рис. 12

Таблица 7

Альтернатива $a_i$	$H_j (R_3)$							$r$	$\tilde{r}$
	$H_1$	$H_2$	$H_3$	$H_4$	$H_5$	$H_6$	$H_7$		
$a_1$	1	0	0	3	2	4	3	1,86	1,24
$a_2$	0	4	0	4	4	1	0	1,86	1,24
$a_3$	2	1	1	0	3	0	4	1,57	1,05
$a_4$	3	2	2	1	0	2	1	1,57	1,05
$a_5$	0	3	4	2	1	3	2	2,14	1,43

Эксперт $E_i$	$\tilde{r}_{cp}(a_j)$					$\bar{x}(E_j)$	$x(E_j)$
	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$		
$E_1$	1,05	1,59	1,59	1,41	1,16	0,18	1,0
$E_2$	0,71	1,43	1,25	1,25	0,71	0,21	0,9
$E_3$	1,24	1,24	1,05	1,05	1,45	0,36	0,5
$R_{cp}(a_i)$	1,00	1,42	1,29	1,24	1,07		
$R_{cp}(a_i) - \tilde{r}_{cp}(a_i)$	-0,05	-0,17	-0,30	-0,17	-0,09	$E_1$	
	-0,29	-0,01	0,04	-0,01	0,33	$E_2$	
	-0,24	0,18	0,24	0,19	-0,38	$E_3$	
$\tilde{R}_{cp}(a_{ij})$	1,05	1,59	1,59	1,41	1,16	$E_1$	
	0,64	1,29	1,12	1,12	0,64	$E_2$	
	0,62	0,62	0,52	0,52	0,73	$E_3$	
$R_{ит}(a_i)$	0,77	1,17	1,08	1,02	0,84		

**Итог экспертизы 3-го эксперта —**

$$a_3 \leq a_4 \leq a_1 \leq a_2 \leq a_5.$$

**3-й этап** предлагаемой стратегии — оценивание альтернатив с учетом компетентности экспертов. Некомпетентность  $x(E_i)$   $i$ -го эксперта оценим средним квадратичным отклонением доверительных рейтингов  $i$ -го эксперта от их среднего значения:

$$\bar{x}(E_j) = \frac{|\{E_i\}|}{\sum_{j=1}^{|\{E_i\}|} (R_{cp}(a_i) - \tilde{r}_{cp}(a_i))_j^2}, \quad (5)$$

где

$$R_{cp}(a_i) = |\{E_j\}|^{-1} \cdot \sum_{j=1}^{|\{E_j\}|} \tilde{r}(a_{ij}); \quad (6)$$

$\tilde{r}_{cp}(a_{ij})$  — доверительное значение  $i$ -го рейтинга, данное  $j$ -м экспертом;

$$\begin{aligned} \bar{x}(E_1) &= ((-0,05)^2 + (-0,17)^2 + \\ &+ (-0,33)^2 + (-0,17)^2 + (-0,09)^2) \approx \\ &\approx (0 + 0,03 + 0,11 + 0,03 + 0,01) = 0,18; \\ \bar{x}(E_2) &= (-0,29)^2 + (-0,01)^2 + (0,04)^2 + \\ &+ (-0,01)^2 + (-0,01)^2 + (0,36)^2 \approx \\ &\approx 0,08 + 0 + 0 + 0 + 0,13 = 0,21; \\ \bar{x}(E_3) &= (-0,24)^2 + 0,18^2 + 0,24^2 + \\ &+ 0,19^2 + (-0,38)^2 \approx 0,06 + 0,03 + 0,06 + \\ &+ 0,04 + 0,14 = 0,33. \end{aligned}$$

Относительным рейтингом  $x(E_j)$   $j$ -го эксперта называют произведение

$$x(E_j) = \bar{x}_{\min}(E_a) (\bar{x}(E_j))^{-1}. \quad (7)$$

Результаты вычисления относительной компетентности экспертов  $x(E_j)$  окончательного доверительного рейтинга  $\tilde{R}_{cp}(a_i)$  с учетом компетентности экспертов

$$\tilde{R}_{cp}(a_{ij}) = R_{cp}(a_i) x(E_j) \quad (8)$$

и итогового рейтинга  $R_{ит}(a_i)$   $i$ -й альтернативы

$$|\{E_j\}|^{-1} \sum_{j=1}^{|\{E_j\}|} \tilde{R}_{cp}(a_{ij}) \quad (9)$$

представлены в табл. 8.

В результате проведенных экспертиз получим

$$r(a_1) \leq r(a_5) \leq r(a_4) \leq r(a_3) \leq r(a_2).$$

#### Список литературы

1. Горбатов В. А. Фундаментальные основы дискретной математики. М.: Наука, Физматлит. 1999. 544 с.
2. Горбатов В. А. Квазиполные графы и их некоторые свойства // Доклады НТК по итогам НИР за 1964—65 годы. Подсекция вычислительной техники. М.: МЭИ. С. 3—10.
3. Горбатов В. А. Общий подход к синтезу логических структур. М.: МЭИ, 1966. 24 с.
4. Горбатов В. А. Семантическая теория проектирования автоматов. М.: Энергия, 1979. 264 с.
5. Горбатов В. А. Теория частично упорядоченных систем. М.: Сов. радио, 1976. 336 с.

УДК 621.396.669.8

**В. А. Огнев**, аспирант,  
**С. Р. Иванов**, канд. техн. наук, доц.,  
МГТУ им. Н. Э. Баумана,  
e-mail: smarserg@mtu.\_nt.ru

## Повышение помехоустойчивости информационных коммуникаций между навигационными спутниками и приемовычислителями при использовании сигналов E1OS и L1C

*Рассмотрен метод повышения надежности выделения информации в приемовычислителях систем GPS/GALILEO за счет обработки перспективных сигналов. Приведены математические описания новых сигналов и результаты синтеза приемовычислителя. Показаны подходы к построению упрощенной модели, позволяющей исследовать работу приемовычислителей в различной помеховой обстановке. Представлены результаты имитационного моделирования, доказывающие эффективность предлагаемого метода.*

**Ключевые слова:** спутниковая навигационная система, приемовычислитель, помехоустойчивость, схема слежения за фазой, помеха, имитационная модель

### Основные задачи исследования

В процессе работы приемовычислителя спутниковых навигационных систем (СНС) осуществляют прием информации (навигационных сообщений  $D(t)$ ) от спутников. При воздействии радиопомех вероятность правильного выделения навигационных сообщений (НС) снижается, что нарушает функционирование приемовычислителя. Виды помех и методы помехозащиты приемовычислителей рассмотрены и классифицированы в работе [1].

В частности, надежность работы приемовычислителей в условиях действия помех может быть повышена (см. [2]) за счет обработки новых сигналов (GALILEO E1, GPS L1C) СНС, обладающих повышенной мощностью, расширенной полосой спектра и улучшенной структурой. Однако структура "эталонного" устройства для обработки этих сигналов не определена в каких-либо руководящих

документах, и ее синтез является задачей разработчиков перспективных приемовычислителей.

Для разработки такого приемовычислителя и оценки его характеристик были поставлены и решены следующие основные задачи:

- получение единого математического описания новых сигналов (E1 и L1C) СНС для его последующего использования при синтезе структуры приемовычислителя;
- проведение теоретического обоснования структуры приемовычислителя, обрабатывающего эти сигналы;
- построение имитационной модели приемовычислителя, пригодной для оценки его характеристик в различной помеховой обстановке.

### Математическое описание перспективных сигналов СНС

Структура сигналов GPS L1C и GALILEO E1 определена в интерфейсных контрольных документах (ИКД) [3, 4]. Однако эти описания не унифицированы. В частности, в ИКД для сигнала L1C содержится только словесное описание его структуры. Для снижения трудоемкости синтеза приемовычислителя, обрабатывающего новые сигналы, целесообразно получить их единообразное описание.

По результатам анализа ИКД можно сделать вывод, что структура новых сигналов является более сложной по сравнению с существующими. Так, для организации информационных коммуникаций между спутниками и существующими приемовычислителями используются сигналы (ГЛОНАСС СТ, GPS C/A) вида

$$S_{\text{и}}(t) = A_{\text{и}}(t)\cos(\phi(t) + \pi D(t)),$$

где  $A_{\text{и}}(t)$  — огибающая информационного сигнала;  $\phi(t)$  — некоторая функция времени, зависящая от параметров взаимного движения спутника и приемовычислителя;  $D(t)$  — принимает значения 0 или 1.

В структуре перспективных сигналов помимо информационного сигнала  $S_{\text{и}}(t)$  имеется пилот-сигнал  $S_{\text{п}}(t)$ , который не модулирован данными:

$$\begin{aligned} S(t) &= S_{\text{и}}(t) + S_{\text{п}}(t) = \\ &= A_{\text{и}}(t)\cos(\phi(t) + \pi D(t)) + A_{\text{п}}(t)\cos(\phi(t)), \end{aligned}$$

где  $A_{\text{п}}(t)$  — огибающая пилот-сигнала, что позволяет предложить следующее унифицированное описание существующих и перспективных сигна-

Параметры существующих и перспективных сигналов СНС

Параметр	Существующие сигналы		Перспективные сигналы	
	ГЛОНАСС ПТ	GPS C/A	GALILEO E1	GPS L1C
$P$ , дБВт	-161	-158,5	-157	-157
$c_{и}$	1	1	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{1}{2}$
$c_{п}$	0	0	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$
$G_{и}(t - \tau)$	ПСП, $T_{и} = 1$ мс, $L_{и} = 511$ бит	ПСП, $T_{и} = 1$ мс, $L_{и} = 1023$ бит	ПСП, $T_{и} = 4$ мс, $L_{и} = 4092$ бит	ПСП, $T_{и} = 10$ мс, $L_{и} = 10\,230$ бит
$G_{п}(t - \tau)$	—	—	ПСП, $T_{п} = 4$ мс, $L_{п} = 4092$ бит	ПСП, $T_{п} = 10$ мс, $L_{п} = 10\,230$ бит
$D(t - \tau)$ , мс	$T_{нс} = 20$	$T_{нс} = 20$	$T_{нс} = 4$	$T_{нс} = 10$
$G_{вт}(t - \tau)$	Нет	Нет	ПСП, $T_{вт} = 100$ мс, $L_{вт} = 25$ бит	ПСП, $T_{вт} = 18$ с, $L_{вт} = 1800$ бит
$f_{и}(t - \tau)$	1	1	$\alpha M_1(t - \tau) + \beta M_6(t - \tau)$	$M_1(t - \tau)$
$f_{п}(t - \tau)$	Нет	Нет	$\alpha M_1(t - \tau) - \beta M_6(t - \tau)$	$G_{стр}(t - \tau)M_1(t - \tau) +$ $+ (1 - G_{стр}(t - \tau))M_6(t - \tau)$
$f_0$ , МГц	$f_{1,k} + k\Delta f_1, f_{1,0} = 1600,0;$ $\Delta f_1 = 0,5625; k = -7...6$	1575,42	1575,42	1575,42

лов СНС (в табл. 1 представлены числовые значения параметров, рассчитанные по данным из ИКД):

$$S(t) = \sqrt{2P}[S_{и}(t - \tau) + S_{п}(t - \tau)]\cos(2\pi f_0 t + \phi(t)) = \\ = \sqrt{2P}[c_{и}G_{и}(t - \tau)f_{и}(t - \tau)]\cos(2\pi f_0 t + \pi D(t - \tau) + \\ + \phi(t)) + \sqrt{2P}[c_{п}G_{вт}(t - \tau)G_{п}(t - \tau) \times \\ \times f_{п}(t - \tau)\cos(2\pi f_0 t + \phi(t))], \quad (1)$$

где  $P$  — мощность полного сигнала;  $c_{и}$ ,  $c_{п}$  — доля мощности соответственно информационного и пилот-сигнала по сравнению с мощностью полного сигнала;  $G_{и}(t - \tau)$ ,  $G_{п}(t - \tau)$  — известные псевдо-случайные последовательности (ПСП), расширяющие соответственно спектр информационного и пилот-сигнала (имеют периоды повторения  $T_{и}$ ,  $T_{п}$  и длины  $L_{и}$ ,  $L_{п}$ , принимают значения  $\pm 1$ );  $D(t - \tau)$  — навигационное сообщение (биты навигационного сообщения имеют длительность  $T_{нс}$  и с равной вероятностью принимают значения 0 и 1);  $f_{и}(t - \tau)$ ,  $f_{п}(t - \tau)$  — множители, расщепляющие спектр соответственно информационного и пилот-сигнала;  $G_{вт}(t - \tau)$  — известная ПСП вторичного кода с периодом повторения  $T_{вт}$  и длиной  $L_{вт}$  бит;  $f_0$  — несущая частота сигнала;  $M_1(t) = \text{sign}[\sin(2\pi \cdot 1 \cdot f_{C/A} t)]$ ,  $M_6(t) = \text{sign}[\sin(2\pi \cdot 6 \cdot f_{C/A} t)]$  — меандровые колебания ( $f_{C/A} = 1,023$  МГц — тактовая частота ПСП сигнала GPS C/A);  $\alpha = \sqrt{10/11}$ ;  $\beta = \sqrt{1/11}$  — постоянные коэффициенты;

$G_{стр}(t - \tau) = \begin{cases} 0, & \text{если } Nb \notin SP, \\ 1, & \text{если } Nb \in SP \end{cases}$  — функция стробирования ( $Nb$  — номер текущего элемента ПСП в группе из 33 элементов;  $SP = \{1, 5, 7, 30\}$ );  $\tau$  — фаза огибающей сигнала.

Поскольку такая модель учитывает свойства обоих перспективных (GPS L1C и GALILEO E1) сигналов, то становится возможным одновременно провести синтез приемовычислителей, пригодных для их обработки. Кроме того, поскольку данная модель учитывает свойства и существующих (GPS C/A, ГЛОНАСС ПТ) сигналов, то из полученных далее результатов в качестве частных случаев могут быть выведены известные выражения для существующих приемовычислителей, что позволило проверить правильность проделанных расчетов.

### Синтез структуры приемовычислителя

Поскольку информация со спутника передается путем изменения фазы несущего колебания сигнала (см. (1)), то для обеспечения декодирования навигационных сообщений в приемовычислителе необходимо осуществлять оценку фазы  $\hat{\phi}(t) = \phi(t) + \pi D(t)$  принимаемого сигнала. Данная задача в существующих приемовычислителях решается следящими схемами (рис. 1), методика синтеза которых изложена в работе [5]. Кроме того (см. [6]), для обеспечения функционирования приемовычислителя необходимо осуществлять оценку  $\tau$  с помощью схемы слежения за задержкой сигнала (ССЗ), структура которой аналогична структуре схемы слежения за фазой (ССФ).

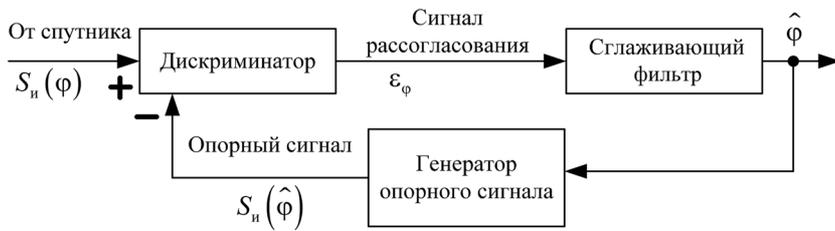


Рис. 1. Структура ССФ

Отметим, что надежность выделения навигационных сообщений определяется помехоустойчивостью ССФ, которая характеризуется критическим соотношением "сигнал/помеха"  $q_{кр}$  — минимальном соотношении "сигнал/помеха", при котором еще не происходит срыва слежения.

Как видно из рис. 1, задача синтеза перспективного приемовычислителя сводится к синтезу дискриминатора и сглаживающего фильтра для ССФ.

### Синтез дискриминатора ССФ

Общая методика синтеза дискриминаторов изложена в работе [5] и заключается в нахождении функции правдоподобия  $p(S_1^M|\lambda)$  выборки  $S_1^M$  ( $M$  — число отсчетов в выборке) используемого сигнала, зависящей только от вектора параметров  $\lambda$ , оцениваемого следящей схемой. Из теории оптимального оценивания известно, что при обработке сигнала на фоне аддитивных гауссовых шумов сигнал на выходе векторного дискриминатора на  $k$ -м шаге расчета

$$u_{dk}(\tilde{\lambda}_k) = \left( \frac{\delta \ln p(S_1^M|\lambda)}{\delta \lambda} \right) \Big|_{\lambda = \tilde{\lambda}_k}, \quad (2)$$

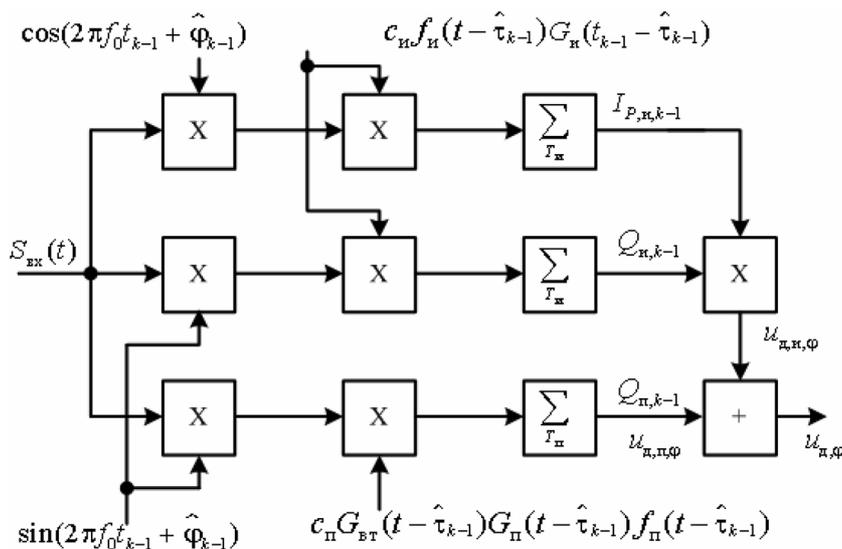


Рис. 2. Структура субоптимального дискриминатора ССФ

где  $\lambda_k$  — значение вектора  $\lambda$  на  $k$ -м шаге расчета.

В процессе исследования установлено (см. [7]), что для сигнала вида (1) и вектора информационных параметров  $\lambda = (\tau \ \varphi)^T$  функция правдоподобия имеет вид

$$p(S^M|\lambda) = \exp(-I_{п,k-1}) \text{ch}(I_{и,k-1}), \quad (3)$$

$$\text{где } I_{п,k-1} = \int_{T_n} S_{вх}(t) S_{п}(t - \hat{\tau}_{k-1}) \cos(2\pi f_0 t + \hat{\phi}_{k-1}) dt$$

$$\text{и } I_{и,k-1} = \int_{T_n} S_{вх}(t) S_{и}(t - \hat{\tau}_{k-1}) \cos(2\pi f_0 t + \hat{\phi}_{k-1}) dt -$$

корреляционные интегралы, вычисленные на  $(k-1)$ -м шаге расчета в результате свертки входного сигнала  $S_{вх}(t)$  и сгенерированных в приемовычислителе копий пилот-сигнала и информационного сигнала; при вычислениях корреляционных интегралов используются оценки задержки  $\hat{\tau}_{k-1}$  и фазы  $\hat{\phi}_{k-1}$  полного сигнала, также сформированные на  $(k-1)$ -м шаге расчета.

Тогда функция для вычисления значения на выходе оптимального дискриминатора ССФ (оценивающего параметр  $\varphi$ ) на  $k$ -м шаге расчета имеет вид

$$u_{\varphi,k} = Q_{п,k-1} - Q_{и,k-1} \text{th}(I_{и,k-1}), \quad (4)$$

$$\text{где } Q_{п,k-1} = \int_{T_n} S_{вх}(t) S_{п}(t - \hat{\tau}_{k-1}) \sin(2\pi f_0 t + \hat{\phi}_{k-1}) dt;$$

$$Q_{и,k-1} = \int_{T_n} S_{вх}(t) S_{и}(t - \hat{\tau}_{k-1}) \sin(2\pi f_0 t + \hat{\phi}_{k-1}) dt.$$

Реализация выражения (4) требует больших вычислительных затрат для определения значения функции гиперболического тангенса  $\text{th}(x)$ . Использование аппроксимаций  $\text{th}(x)$  позволило получить субоптимальные дискриминаторы для случаев работы приемовычислителя при малых и больших соотношениях "сигнал/шум"  $q$ . Так, при малом  $q$ :

$$u_{\varphi,k} = Q_{п,k-1} - Q_{и,k-1} I_{и,k-1},$$

а при большом  $q$ :

$$u_{\varphi,k} = Q_{п,k-1} - Q_{и,k-1} \text{sign}(I_{и,k-1}).$$

Полученные функции для расчета значений на выходе субоптимальных дискриминаторов пригодны для реализации в аппаратуре приемовычислителей с использованием только сумматоров и умножителей (рис. 2).

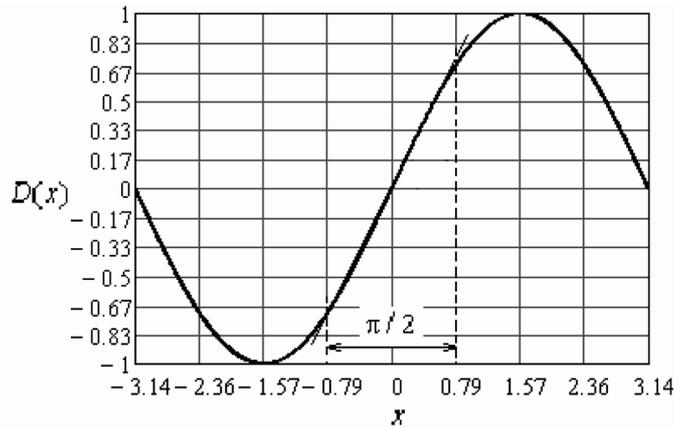
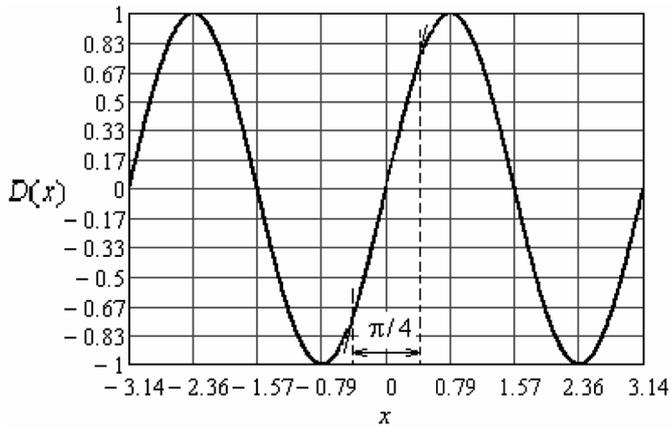


Рис. 3. Передаточные характеристики дискриминаторов ССФ, работающих по информационной (слева) и пилот-компоненте (справа) сигнала

### Синтез сглаживающего фильтра

Анализ передаточных характеристик дискриминаторов (рис. 3) показал, что апертюра ветви дискриминатора ССФ, работающей по пилот-компоненте ( $u_{п,φ}$  — сигнал на выходе этой ветви), в 2 раза шире, чем апертюра ветви дискриминатора, работающей по информационному сигналу (сигнал на выходе —  $u_{и,φ}$ ). Это позволяет первой из них обрабатывать ошибку по фазе, большую по величине в 2 раза, что и обуславливает выигрыш в помехоустойчивости схемы слежения за фазой пилот-сигнала.

Однако этот факт напрямую не ведет к росту надежности выделения информации, поскольку фаза пилот-сигнала не содержит навигационного сообщения. Для достижения цели необходимо проводить комплексирование обеих следящих схем приемовычислителя путем синтеза сглаживающего фильтра, общего для обеих следящих схем (рис. 4).

В качестве критерия оптимальности синтезируемого фильтра выбрана минимизация дисперсии результирующей оценки, поскольку очевидно, что вероятность срыва слежения растет с ростом дисперсии оценки фазы. Из теории оптимального оценивания известно, что таким фильтром является фильтр Калмана.

Для синтеза фильтра Калмана (см. [8]) задана априорная модель изменения фазы. Для этого фаза  $φ_k$  сигнала описана как компонента марковского процесса третьего порядка:

$$x_{φ,k} = Fx_{φ,k-1} + Gξ_{φ,k},$$

$$\text{где } F = \begin{pmatrix} 1 & T & 0 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, G = (0 \ 0 \ 1)^T, ξ_{φ,k} —$$

формирующий белый гауссовский шум

с дисперсией  $D_ξ$ ;  $x_{φ,k-1} = (φ_{k-1} \ ω_{k-1} \ v_{k-1})^T$  — вектор состояния системы на  $(k-1)$ -м шаге расчета (компонентами вектора являются значение фазы  $φ_{k-1}$ , круговой частоты  $ω_{k-1}$  и производной от круговой частоты  $v_{k-1}$ ), причем  $φ_k = Cx_{φ,k}$ , где  $C = (1 \ 0 \ 0)$ .

Первый этап (этап "прогноза") калмановской фильтрации

$$\begin{aligned} \tilde{x}_k &= F_{k-1}\hat{x}_{k-1}, \tilde{D}_{x,k} = \\ &= F_{k-1}D_{x,k-1}F_{k-1}^T + G_{k-1}D_ξG_{k-1}^T; \end{aligned}$$

второй этап (этап "сглаживания"):

$$\begin{aligned} D_{x,k}^{-1} &= \tilde{D}_{x,k}^{-1} + H_k^T D_n^{-1} H_k, K_k = D_{x,k} H_k^T D_n^{-1}; \\ \hat{x}_k &= \tilde{x}_k + K_k(y_k - H_k \tilde{x}_k). \end{aligned}$$

Здесь  $\hat{x}_k$  — оценка фильтруемого процесса;  $\tilde{x}_k$  — экстраполированная оценка процесса;  $K_k$  — матричный коэффициент усиления (который и описывает коэффициенты искомого сглаживающего

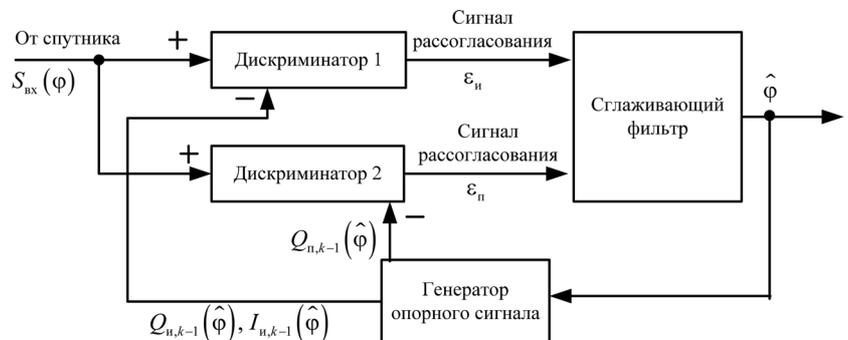


Рис. 4. Схема комплексирования следящих схем за фазами информационного сигнала и пилот-сигнала

Функции для вычисления значений сигнала на выходе эквивалентных дискриминаторов ССФ

Соотношение сигнал/шум, $q$	Вид дискриминатора	Характеристики дискриминатора	
		Дискриминационная характеристика $M[u_{д,\varphi}] = \overline{u_{д,\varphi}}$	Флуктуационная характеристика $D$
Высокое	$u_{п,\varphi} = Q_{п,k-1}$ $u_{и,\varphi} = -Q_{и,k-1} \text{sign}(I_{и,k-1})$	$\overline{u_{п,\varphi}} = -2qT_{п\rho_{п}}(\epsilon_{\tau})\sin(\epsilon_{\varphi})$ $\overline{u_{и,\varphi}} = -2qT_{и\rho_{и}}(\epsilon_{\tau})\sin(\epsilon_{\varphi})$	$D_{п} = 2qT_{п}$ $D_{и} = 2qT_{и}$
Низкое	$u_{п,\varphi} = Q_{п,k-1}$ $u_{и,\varphi} = -Q_{и,k-1}I_{и,k-1}$	$\overline{u_{п,\varphi}} = -2qT_{п\rho_{п}}(\epsilon_{\tau})\sin(\epsilon_{\varphi})$ $\overline{u_{и,\varphi}} = 2q^2T_{и\rho_{и}}^2(\epsilon_{\tau})\sin(2\epsilon_{\varphi})$	$D_{п} = 2qT_{п}$ $D_{и} = 8q^3T_{и\rho_{и}}^2(\epsilon_{\tau}) \left[ 1 + \frac{1}{2qT_{и\rho_{и}}^2(\epsilon_{\tau})} \right]$

фильтра);  $D_{x,k}$  — матрица дисперсий ошибок фильтрации;  $\tilde{D}_{x,k}$  — матрица дисперсий ошибок экстраполяции;  $y_k = (u_{и,\varphi} \ u_{п,\varphi})^T$  — входной сигнал. Предполагается, что  $y_k = H_k x_k$ , т. е. матрица  $H_k$  описывает структуру следящей системы.

Установлено, что для дискриминаторов, описанных в [3] для случая малого соотношения "сигнал/шум":  $H = \begin{pmatrix} 1/2 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ ,  $D_n = \begin{pmatrix} \tilde{D}_n & 0 \\ 0 & \tilde{D}_n \end{pmatrix}$ , где

$\tilde{D}_н$ ,  $\tilde{D}_п$  — дисперсии эквивалентных шумов на выходах дискриминаторов (см. [3]).

### Построение упрощенной модели приемовычислителя

Для исследования характеристик синтезированного приемовычислителя построена его упрощенная имитационная модель. Снижение вычислительной сложности модели достигнуто путем замены дискриминаторов следящих схем на статистически эквивалентные. Для этого процесс  $u_{д}(t)$  на выходе дискриминатора, выделяющего информацию о рассогласовании  $\delta\lambda = \lambda - \hat{\lambda}$  между параметром  $\lambda$  и его оценкой  $\hat{\lambda}$  входного сигнала  $y(t) = S(\lambda, t) + n(t)$  следящей системы, можно представить в виде суммы регулярной  $\overline{u_{д,\lambda}}$  и флуктуационной  $\xi(t)$  составляющих:

$$u_{д}(t) = U(\delta\lambda) + \eta_{D\lambda},$$

где  $\eta_{D\lambda}$  — белый гауссов шум с дисперсией  $D[u_{д,\lambda}] = M[(u_{д,\lambda} - \overline{u_{д,\lambda}})^2]$ , операция  $M[x]$  означает вычисление среднего значения величины  $x$ , а  $\overline{u_{д,\lambda}} = M[u_{д,\lambda}]$  — дискриминационная характеристика дискриминатора.

При нормальном функционировании ошибка слежения  $\delta\lambda$  мала и не выходит за пределы линейного участка дискриминационной характеристики, при этом:  $U(\delta\lambda) = S_{д}\delta\lambda$ , где  $S_{д} = \left. \frac{dU[\delta\lambda]}{d\delta\lambda} \right|_{\delta\lambda} = 0$  — крутизна дискриминационной характеристики.

Как видно, для получения модели дискриминатора необходимо рассчитать его дискриминационную  $\overline{u_{д,\lambda}}$  и флуктуационную  $D$  характеристики (табл. 2).

Замена дискриминаторов статистически эквивалентными позволяет не проводить вычисление сверток входного и опорного сигнала (при моделировании входной и опорный сигналы представляются массивами длиной 160 тыс. точек), что позволяет сократить время моделирования в 3...5 раз.

### Учет влияния негауссовых помех на работу приемовычислителя

Приведенные выше результаты получены в предположении, что на вход приемовычислителя помимо полезного сигнала воздействует белый гауссов шум (т. е. широкополосная гауссова помеха). Однако область применимости данной модели может быть расширена и на случай воздействия на приемовычислитель негауссовых помех — например, монохроматической или узкополосной.

Поскольку в корреляторе приемовычислителя выполняется вычисление свертки входного воздействия (т. е. суммы полезного сигнала и помехи) с псевдослучайной последовательностью, входящей в обрабатываемый сигнал, то коррелятор работает как обесцвечивающий фильтр. Поэтому, если негауссова помеха не попадает в полосу пропускания коррелятора, можно считать, что наличие на входе приемовычислителя негауссовой помехи приводит лишь к росту уровня гауссова шума на

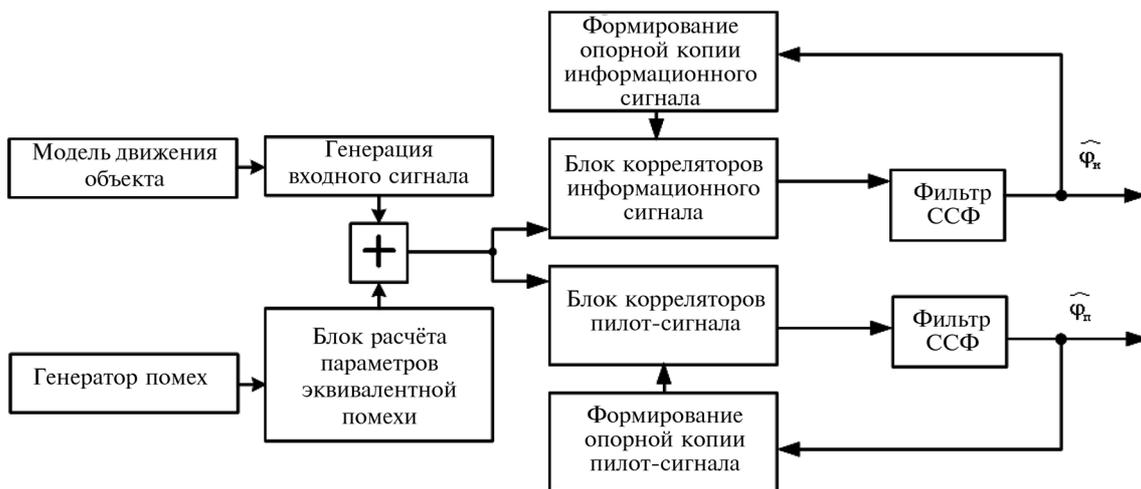


Рис. 5. Структура имитационной модели приемовычислителя

выходе коррелятора и входе следящих схем, т. е. к снижению соотношения "сигнал/шум".

Суть предложенного метода учета влияния негауссовых помех состоит в замене исходной негауссовой помехи эквивалентной (с точки зрения влияния на работу приемовычислителя) гауссовой помехой. Как показано в [9], дисперсия такой дополнительной гауссовой помехи  $D \approx \frac{I_0 T}{2}$ , где

$$I_0 = \int_{-B/2}^{B/2} F_s(f) F_u(f) df, \text{ а } B \text{ — ширина полосы пропускания приемного тракта; } F_s(f) \text{ и } F_u(f) \text{ — соответственно спектры полезного сигнала и помехи; } T \text{ — время когерентного накопления сигнала в корреляторе. Таким образом, действие внешней негауссовой помехи, не попадающей в полосу пропускания коррелятора, можно трактовать как увеличение теплового (гауссова) шума, действующего на вход приемовычислителя. Прирост теплового шума, как видно, определяется величиной } I_0, \text{ равной спектральной плотности взаимной энергии полезного сигнала и помехи. Для расчета параметров эквивалентной помехи в имитационную модель приемовычислителя введем соответствующий блок (рис. 5).}$$

Полученная модель позволяет исследовать работу следящих схем приемовычислителя и экспериментально получить характеристики его помехозащищенности.

### Результаты имитационного моделирования

Результаты имитационного моделирования подтверждают эффективность предложенного подхода. На рис. 6, а показана зависимость вероятности срыва слежения за фазой сигнала ГЛОНАСС СТ

от соотношения "сигнал/помеха". Как видно, устойчивое функционирование ССФ возможно при соотношении "сигнал/помеха"  $q \geq 34$  дБ (в полосе шума 1 Гц).

На рис. 6, б показаны аналогичные зависимости для автономных схем слежения за фазой информационной компоненты, за фазой пилот-сигнала, для комплексной схемы слежения за фазой сигнала GALILEO E1. Как видно, при слежении

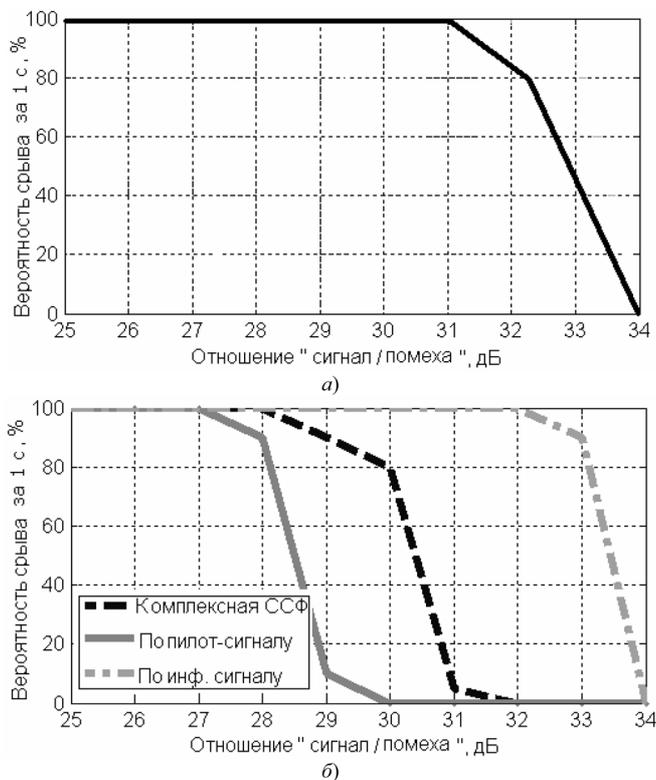


Рис. 6. Вероятность срыва слежения за фазой при работе по сигналам ГЛОНАСС СТ (а) и GALILEO E1 (б)

только за фазой информационной компоненты сигнала E1 выигрыш по сравнению с ГЛОНАСС СТ отсутствует. В то же время схема слежения за фазой пилот-сигнала, как и ожидалось, имеет повышенную на 6 дБ помехоустойчивость. Комплексная схема оценки фазы сигнала E1 обеспечивает снижение критического отношения "сигнал/помеха" на 4 дБ по сравнению со случаем слежения за фазой сигнала ГЛОНАСС СТ.

Итак, предложенный способ построения приемовычислителей позволяет повысить помехоустойчивость схемы слежения за фазой входного сигнала, что обеспечивает возможность выделения навигационной информации при низких соотношениях "сигнал/помеха" и способствует повышению надежности коммуникаций между спутниками и приемовычислителями.

### Результаты и выводы

Итак, в работе:

- рассмотрена структура новых сигналов систем GPS/GALILEO и предложено их математическое описание;
- теоретически обоснована структура перспективного приемовычислителя;
- с использованием статистически эквивалентных преобразований построена имитационная модель приемовычислителя, отличающаяся пониженной вычислительной сложностью;
- предложен метод упрощенного учета влияния негауссовых помех на приемовычислители. В целом, можно сделать следующие выводы:
- ◆ помехоустойчивость коммуникаций приемовычислителей со спутниками повышается при работе по сигналам E1 и L1C;
- ◆ достоинствами метода являются отсутствие необходимости введения в состав приемовычислителя специализированных блоков для борьбы с помехами, прирост помехозащищенности обусловлен принципом функционирования приемовычислителя;
- ◆ конкретный выигрыш зависит от параметров (длин ПСП, периода повторения) сигнала: для широкополосной помехи: E1 — 3 дБ, L1C — 6 дБ; для монохроматической помехи — E1 — 6 дБ, L1C — 10 дБ;
- ◆ недостаток метода — относительно небольшой прирост помехозащищенности.

Отметим, что несмотря на небольшой прирост помехозащищенности приемовычислителя вследствие комплексирования его следящих схем дополнительно надежность декодирования данных может быть повышена (согласно [11] — до 7 дБ) за счет использования преимуществ блочных кодов, используемых для шифрования навигационных сообщений новых сигналов.

В результате выполненных исследований получены рекомендации по построению перспективного приемовычислителя, позволяющие повысить помехоустойчивость приема информации от спутника на 3...5 дБ, и создан программный комплекс, который дает возможность проводить моделирование работы приемовычислителей в целях оптимизации их параметров.

Практическая ценность работы заключается в том, что с использованием разработанной имитационной модели можно прогнозировать характеристики приемовычислителей до их непосредственной реализации в виде макетов.

### Список литературы

1. **Огнев В. А., Иванов С. Р.** Методы повышения помехоустойчивости аппаратуры потребителей спутниковых навигационных систем // Информационные технологии. 2009. № 4. С. 55—61.
2. **Кинкулькин И. Е., Трошин П. В.** Оценка уязвимости аппаратуры потребителя спутниковых радионавигационных систем при воздействии внутриволновых помех // Новости навигации. 2009. № 1.
3. **Galileo Open Service. OS SIS ICD. Draft 1. April 2008.** 179 p. URL: <http://www.gsa.europa.eu/go/galileo/os-sis-icd>
4. **ICD GPS L1C. March 2008.** 136 p. URL: <http://gps.losangeles.af.mil/engineering/icwg/>
5. **Перов А. И., Харисов В. Н.** ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. Изд. 3-е, перераб. М.: Радиотехника, 2005. 688 с.
6. **Огнев В. А., Иванов С. Р.** Математическая модель приемовычислителя систем ГЛОНАСС/GPS // Информационные технологии. 2009. № 10. С. 24—28.
7. **Огнев В. А., Иванов С. Р.** Синтез дискриминаторов для оценки информационных параметров сигналов системы GALILEO // Сб. докл. конф. "Студенческая научная весна". М.: Эликс+. 2009.
8. **Огнев В. А., Иванов С. Р.** Комплексирование следящих схем приемовычислителей для повышения надежности выделения навигационных сообщений // Сб. докл. конф. "Студенческая наука". М.: Эликс+. 2010.
9. **Огнев В. А., Иванов С. Р.** Методика упрощенной оценки влияния негауссовых помех на приемовычислители спутниковых навигационных систем // Сб. докл. конф. "Студенческая наука". М.: Эликс+. 2008.
10. **Огнев В. А., Иванов С. Р.** Программно-аппаратная платформа для исследования алгоритмов обработки сигналов спутниковых навигационных систем GPS/ГЛОНАСС // Сб. тез. докл. 1-й Московской межвузовской НПК "Студенческая наука", 2006.
11. **Stansell T.** Update on GPS L1C Signal Modernization. URL: <http://www.navcen.uscg.gov/cgsic/meetings/47thMeeting/%5B1%5D%20Stansell%20-%20L1C%20Update%20v03.pdf>

**С. А. Ховансков**, канд. техн. наук, доц.,  
e-mail: sah59@mail.ru,

**О. Р. Норкин**, канд. техн. наук, доц.,  
e-mail: oran@tsure.ru,

Технологический институт  
Южного федерального университета, г. Таганрог

## **Алгоритм оптимизации мультиагентной системы распределенных вычислений и его исследование с помощью программной модели**

*Описывается алгоритм, который оптимизирует временные параметры решаемой задачи под управлением мультиагентной системы на имеющихся в наличии узлах и каналах путем перераспределения вычислительной нагрузки между узлами и каналами в зависимости от их параметров. Алгоритм построен таким образом, что он не предъявляет требований к реальным условиям работы узлов системы и каналов связи. Реальные параметры узлов и каналов связи определяются алгоритмом в ходе выполнения требуемых вычислений в узлах.*

*Особенностью такого подхода является то, что в ходе решения задачи агенты выполняют оптимизацию назначений вычислительных блоков между компьютерами в соответствии с их вычислительными ресурсами. Целью оптимизации является сокращение времени выполнения задачи.*

*На основе алгоритма составлена программная модель мультиагентной системы компьютерной сети. Результаты исследований предлагаемого алгоритма показали его работоспособность и достижение поставленной цели.*

**Ключевые слова:** распределенные вычисления, мультиагентные системы, оптимизация мультиагентной системы, ориентированный граф решаемой задачи, агент, критический путь, алгоритм агента, программная модель

Современные темпы развития средств вычислительной техники не удовлетворяют требованиям решаемых в настоящее время задач. Для решения задач исследовательского характера, моделирования, выбора оптимального решения большой объем вычислений не позволяет получить нужный результат за приемлемое время. Задачи, для которых временной критерий является наиболее важным, усложняются, их объем вычислений продолжает увеличиваться. Все это происходит более быстрыми темпами, чем рост производительности вычислительных средств и создает проблему соблюдения временных критериев задачи.

Пути преодоления данной проблемы давно известны. Первый — снижение времени выполнения операций за счет развития аппаратных средств вычислительной техники. Второй — создание распределенных вычислительных систем (или систем распределенных вычислений) [1].

Первое направление чаще всего не позволяет достичь требуемой производительности при решении задач большого объема.

Второе направление представляется более перспективным. Здесь существует несколько направлений:

- использование многоядерных процессоров;
- многопроцессорные вычислительные машины;
- многомашинные системы (кластеры).

На этом направлении существуют свои проблемы, которые затрудняют использование распределенных вычислительных систем. Основной проблемой является не создание специальных аппаратных средств (хотя она присутствует), а программная организация на аппаратных средствах распределенных вычислений [2].

Организация заключается в разделении всего объема вычислений на программные модули, распределении этих модулей между центрами обработки данных, синхронизации их работы и определении порядка реализации процессов обмена данными между центрами.

Особенности организации связаны со степенью связности данных, со способом реализации вычислений, а также с управлением процессом выполнения задачи на всех центрах обработки данных и их синхронизации.

Например, на многопроцессорной системе выполнение вычислительных модулей организуется специальной программой, распределяющей между процессорами нагрузку и обеспечивающей их взаимодействие, а также слежение за работоспособностью и ходом выполнения вычислений.

В многомашинных системах также должен быть центр, координирующий работу всех машин.

С помощью современных специальных языков программирования можно отказаться от центра управления, а выполнение задачи организовать на нескольких машинах путем одновременного выполнения всех модулей задачи.

Поиск решения этих проблем привел к появлению еще одного пути реализации распределенных вычислений — использование мультиагентной системы. Агентом является программный код, выполняемый в фоновом режиме на локальном компьютере. Каждый компьютер, имеющий одного из агентов, работает независимо от других аналогичных компьютеров. При выполнении распределенных вычислений агенты мультиагентной

системы способны обмениваться между собой данными.

Мультиагентная система может быть реализована на наиболее доступной вычислительной системе — компьютерной сети, в которой при организации распределенных вычислений каждому вычислительному блоку ориентированного графа задачи ставится в соответствие компьютер. При этом учитывается наличие физических связей в сети, способных реализовать потоки передаваемой информации между вычислительными блоками.

Основной алгоритм программы-агента реализует следующие задачи:

- получение информации от компьютеров-источников;
- выполнение на компьютере требуемых операций над полученной информацией;
- передача результата компьютеру-получателю.

Структура ориентированного графа решаемой задачи представляет собой совокупность подмножеств связанных вершин. Эти подмножества образуют иерархическую структуру с несколькими уровнями.

Самым верхним уровнем является вершина графа, получающая выходные данные. Подмножества образуют узлы нижнего уровня и узлы высокого уровня, которым передаются данные.

Другие подмножества содержат вершину верхнего уровня вместе со связанными с ней вершинами более нижнего уровня.

Самым нижним уровнем является вершина, принимающая входные данные.

Вся информация передается между агентами порциями. Обработку одной порции данных можно считать одним шагом процесса обработки всей системой. Агенту, передавшему обработанные данные, поступает новая порция данных, и выполняется следующий шаг обработки. Передача данных в сети от входного компьютера к выходному осуществляется в пульсирующем режиме.

Обмен данными между агентами включает в себя не только передачу данных задачи, но и служебную информацию [3, 4].

После пересылки обработанных данных агенту более высокого уровня выполняется обмен между агентами подготовленной заранее информацией. Обмен информацией проводится между агентами, расположенными только на компьютерах одного либо соседних подмножеств.

Служебная информация используется для минимизации времени обработки пакета данных на одном шаге. Время обработки данных в компьютере зависит от цифровых параметров компьютера и свойств программного обеспечения, а также от характера обработки данных [4].

В системе временем начала обработки данных на компьютерах агентов текущего уровня будет

считаться время приема последнего требуемого пакета данных от агентов нижнего уровня, связанных с ними. Соответственно время, за которое на этом пути появятся обработанные на предыдущем уровне данные, и будет временем выполнения предыдущего шага.

Оценка времени выполнения вычислений на одном компьютере проводится на основании работы с соответствующей порцией информации. Поэтому эта оценка является индивидуальной и может использоваться для выполнения оптимизации системы [3].

На ориентированном графе задачи существует несколько маршрутов передачи обработанных данных от входного компьютера к выходному. Из них можно выделить тот путь передачи данных от агента самого нижнего уровня к агенту самого высокого уровня, который и определяет время обработки данных всей вычислительной системой. Такой путь называется критическим путем

$$T_{кр} = \max(T_1, T_2, \dots, T_i, \dots, T_k),$$

где  $k$  — число путей между входным агентом  $a_{вх}$  и выходным агентом  $a_{вых}$ .

В предлагаемом алгоритме оптимизируется время выполнения системой задачи путем подбора назначения графа задачи на граф сети.

#### Алгоритм агента

1. Прием информации от агентов уровня  $n - 1$ .
2. Прием служебной информации от агентов уровня  $n + 1$ .
3. Определение критического пути.
4. Подбор варианта обмена для агента  $k_i^{n+1, c}$ .
5. Все варианты обмена использованы? Да — перейти к п. 7, нет — к п. 6.
6. Передача служебной информации агентам уровня  $n - 1$ .
7. Обработка данных.
8. Обработка данных закончена? Да — перейти к п. 9, нет — к п. 7.
9. Передача всей информации агентам уровня  $i + 1$ .
10. Переход к п. 1.

Все множество вершин ориентированного графа  $G$  задачи разбивается на непересекающиеся подграфы путем их раскраски. Для раскраски графа используются функциональные признаки вычислительных блоков.

Сначала оптимизация выполняется одновременно внутри подграфов между циклами обработки данных. Затем осуществляется оптимизация между соседними подграфами.

При этом время, затрачиваемое агентами подграфа на оптимизацию, не зависит от мощности подграфа, что позволяет отвести под процесс оп-

тимизации во всех подграфах фиксированный интервал времени.

В следующий цикл обмена информацией между агентами соседних подграфов выполняется аналогичная оптимизация в соседних подграфах.

Процесс оптимизации между агентами в одном подграфе многократно чередуется с оптимизацией между агентами в соседних подграфах. Поскольку процесс будет запускаться при каждой передаче данных между агентами вычислительных блоков во время выполнения задачи, то он будет вестись постоянно. Время, затрачиваемое на оптимизацию, будет сведено к минимуму.

Передача данных проводится от нижнего уровня на более верхние согласно графу  $G$  задачи. Самым верхним уровнем является выходной компьютер. Все множество  $P$  компьютеров с агентами, реализующими граф задачи, разбито на подмножества вершин по уровням  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ , которые в свою очередь могут состоять из более мелких подмножеств  $P_n = \{p^{n,1}, p^{n,2}, \dots, p^{n,b}\}$ . Любое подмножество вершин  $p^{n,b}$  состоит из агентов на компьютерах  $(k_1^{n,b}, k_2^{n,b}, \dots, k_m^{n,b})$ , соединенных по графу задачи с одним из компьютеров верхнего уровня  $k_i^{n+1,c}$ .

Подмножеству компьютеров  $(k_1^{n,b}, k_2^{n,b}, k_3^{n,b}, \dots, k_m^{n,b})$  перед выполнением первого шага задачи назначено подмножество  $(g_1^{n,b}, g_2^{n,b}, g_3^{n,b}, \dots, g_m^{n,b})$  графа задачи  $G$ .

После выполнения первого шага задачи на компьютерах подмножества  $p^{n,b}$  осуществляется передача результатов вычислений вместе с управляющей информацией агенту на компьютере  $k_i^{n+1,c}$ . Собирается информация от каждого агента о времени выполнения этого шага  $(t_1^{n,b} \in k_1^{n,b}, t_2^{n,b} \in k_2^{n,b}, t_3^{n,b} \in k_3^{n,b}, \dots, t_m^{n,b} \in k_m^{n,b})$  и выбирается компьютер  $k_y^{n,b}$ , имеющий  $t_{\min 1} = \min(t_1^{n,b}, t_2^{n,b}, \dots, t_m^{n,b})$ . После поступления управляющей информации от агента компьютера  $k_i^{n+1,c}$  агенты подмножества  $p^{n,b}$  получают информацию, принятую от всех компьютеров  $p^{n,b}$ . Выполняется второй шаг решения задачи.

После выполнения второго шага задачи на компьютерах подмножества  $p^{n,b}$  осуществляется передача информации агенту на компьютере

$k_i^{n+1,c}$ , как и на первом шаге. Также собирается информация о времени выполнения этого шага всеми компьютерами и выбирается компьютер  $k_x^{n,b}$ , имеющий  $t_{\min 2} = \min(t_1^{n,b}, t_2^{n,b}, \dots, t_m^{n,b})$ .

Компьютер  $k_i^{n+1,c}$  оценивает время завершения первого и второго шагов решения. Если  $t_{\min 1} > t_{\min 2}$ , то принимается решение о выполнении нового переназначения агентам подмножества  $p^{n,b}$ , аналогичное выполненному перед вторым шагом.

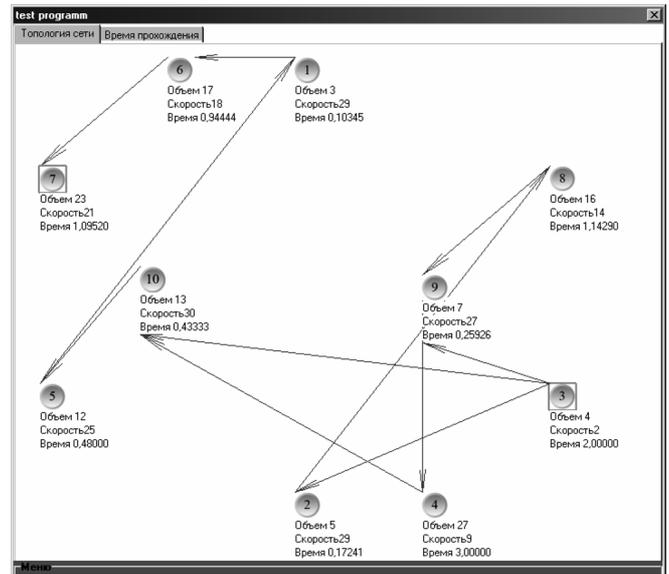


Рис. 1. Начальное размещение узлов системы

		УЗЛЫ									
		1	2	3	5	6	4	7	8	9	10
Путь №1	Время	0,62	0,57	0,55	0,70	2,00	2,42	1,26	0,57	0,70	1,40
Общее время прохождения по первому пути <b>10.81700</b>											
Путь №2	Время	0,62	0	0	0,70	2,00	2,42	1,26	0,57	0,70	1,40
Общее время прохождения по второму пути <b>9.68960</b>											
Путь №3	Время	0,62	0	0	0	0	2,42	1,26	0,57	0,70	1,40
Общее время прохождения по третьему пути <b>6.98960</b>											

Рис. 2. Начальные временные параметры узлов системы

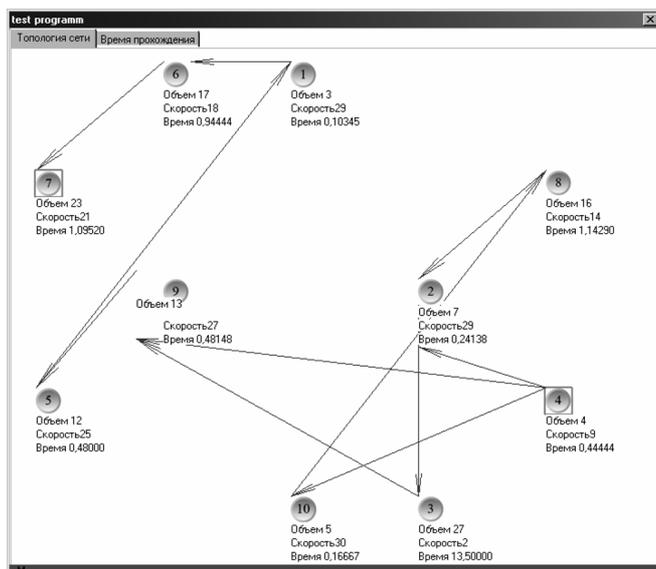


Рис. 3. Конечное размещение узлов системы

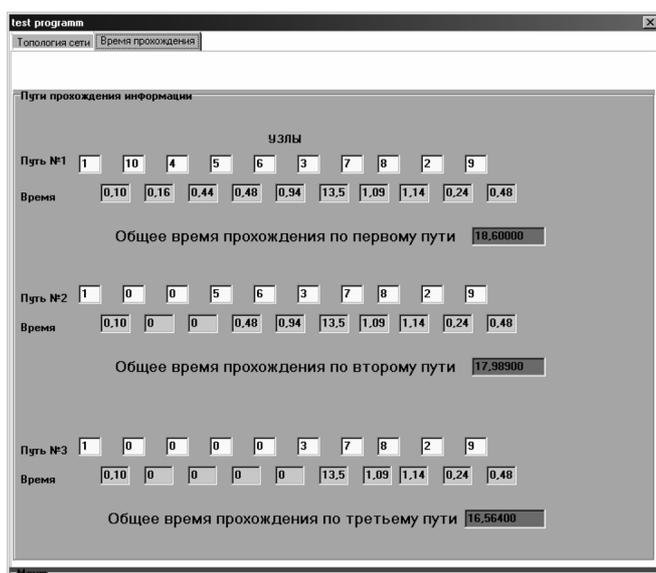


Рис. 4. Конечные временные параметры узлов системы

Одновременно точно по такому же алгоритму выполняются переназначения и во всех подмножествах всех уровней.

Вся информация собирается у агента  $a_{\text{вых}}$ . Этой информации достаточно, чтобы определить кри-

тический путь и выделить в нем подмножество компьютеров, определяющее время выполнения шага системой. Агент  $a_{\text{вых}}$  выбирает подмножество, имеющее минимальное время выполнения шага и передает указание подобрать компьютеры для обмена между подмножествами так, чтобы максимальное критическое время системы сократилось.

Описанный выше алгоритм реализован программой, которая разработана Зиминным Л. Ю. в программной среде Borland Delphi 7 с использованием стандартных компонентов. Программа предназначена для оценки эффективности распределенных вычислений на основе объема обрабатываемой информации в каждом узле сети, скорости вычислений узлов и, соответственно, времени вычислений.

На рисунках приведен пример работы алгоритма на небольшом интервале времени выполнения обработки данных системой, состоящей из 10 компьютеров. Также отображены параметры узлов графов задачи и сети. Рис. 1, 2 и 3, 4 показывают состояние узлов системы до начала выполнения алгоритма и после.

Алгоритм назначения вершин графа  $G$  задачи компьютерам сети под управлением мультиагентной системы позволяет выполнять оптимизацию при любом первоначальном назначении графа  $G$  на граф сети. Этот алгоритм не требует предварительной оптимизации времени решения компьютерами сети. Оптимизация выполняется уже во время решения самой задачи с использованием для этого реальных данных. Отсутствие центра управления системой и способность к адаптации при изменении состава сети позволяет обеспечить системе высокую степень живучести.

#### Список литературы

1. Таненбаум Э. Распределенные системы: принципы и парадигмы. СПб.: Питер, 2003. 877 с.
2. Ховансков С. А., Литвиненко В. А., Калашников В. А. Использование многопроцессорной вычислительной системы для решения задачи трассировки // Ведомственный тематический сборник "Интеллектуальные САПР". Таганрог: Изд-во ТРТУ. 1994. Вып. 4.
3. Ховансков С. А., Литвиненко В. А. Организация распределенных вычислений на основе мультиагентного подхода // Изв. ТРТУ. Тематический выпуск "Интеллектуальные САПР". Таганрог: Изд-во ТРТУ. 2007. № 1(73). С. 246—250.
4. Ховансков С. А., Литвиненко В. А. Решение задач путем организации распределенных вычислений в сети // Изв. ЮФУ. Техн. науки. Таганрог: Изд-во ТТИ. 2008. № 3(80). С. 16—21.

**С. Б. Беневоленский\***,

д-р техн. наук, проф., зав. каф.,

**Д. Н. Нагорных\*\***,

канд. физ.-мат. наук, руководитель группы,

**А. А. Смирнова\***, ассистент,

\*"МАТИ"—Российский государственный технологический университет

им. К. Э. Циолковского,

\*\*ОАО "Российские космические системы"

sbb13@mail.ru

## Особенности создания резервируемого хранилища центра обработки данных распределенных вычислительных систем

*Рассмотрены результаты создания и особенности функционирования программного обеспечения для резервируемого хранилища центра обработки данных распределенных вычислительных систем на основе предложенного отказоустойчивого алгоритма синхронизации разделов серверов.*

**Ключевые слова:** отказоустойчивые алгоритмы, программное обеспечение, компьютерные сети, центры обработки данных, распределенные вычислительные системы

В настоящее время одним из ведущих направлений развития вычислительной техники является создание распределенных систем [1—3]. При этом возникает задача формирования резервируемого хранилища данных (рис. 1) с наиболее простым технологическим решением, основанным на использовании для этих целей центра обработки данных (ЦОД). К таким ЦОД предъявляются жесткие требования по надежности, производительности и масштабируемости информационных потоков и обрабатываемых данных. Большинство создаваемых хранилищ данных ЦОД строят с использованием дисковых подсистем (ДП) [4—7], что требует значительных финансовых затрат на саму ДП, а также на организацию схем резервирования (резервируемая схема с ДП превосходит стоимость сервера в 2—20 раз), кроме того такое решение проблемы связано с высокой сложностью обслуживания аппаратуры и интегрированного программного обеспечения мониторинга состояния аппаратных средств.

В нашей работе рассмотрены возможности формирования резервируемого хранилища данных путем программной организации множественных копий на различных серверах, включенных в вычислительную сеть.

Реализация ДП может быть выполнена на базе сервера с SATA/SAS контроллером и корзиной дисков. При этом сбой в работе элемента сервера могут привести к отказу работы хранилища данных,

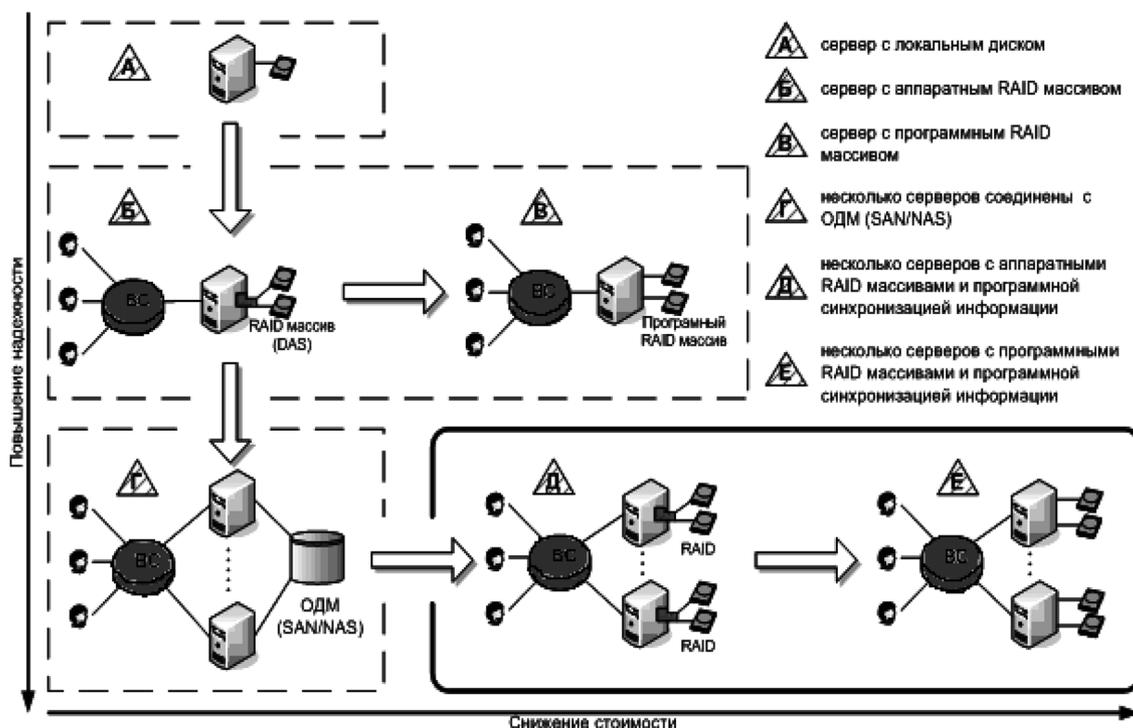


Рис. 1. Эволюция создания хранилища данных с программной синхронизацией разделов серверов в вычислительной сети (ВС)

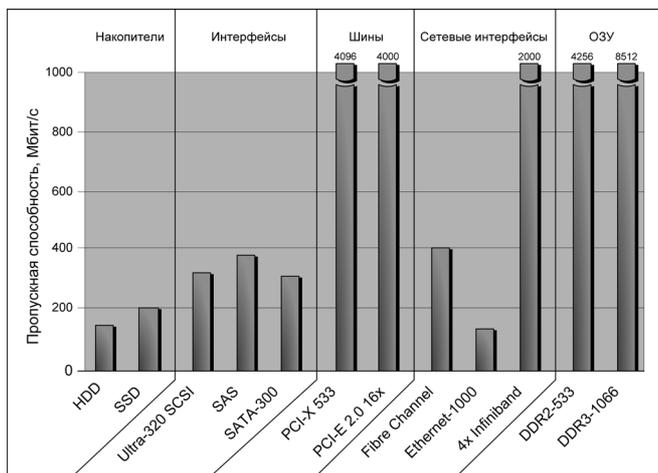


Рис. 2. Пропускная способность периферийных устройств

организованного на базе сервера. Поэтому в ДП применяют схему резервирования модулей с организацией параллельной их работы, за счет использования межмодульного взаимодействия и синхронизации оперативной памяти. Воплотить применяемое в ДП техническое решение по обеспечению надежности с использованием двух серверов достаточно проблематично и экономически не эффективно.

Применяемые сегодня программные способы синхронизации информации нескольких серверов нацелены, в основном, на определенный уровень работы [6]. Например, для синхронизации БД применяют методы восстановления с журналов или с резервной копии, а также использование репликации, а для файлов — периодическое сканирование и применение изменений. Поэтому в зависимости от объема передаваемых данных и частоты обновления синхронизация информации длится от нескольких минут до нескольких часов.

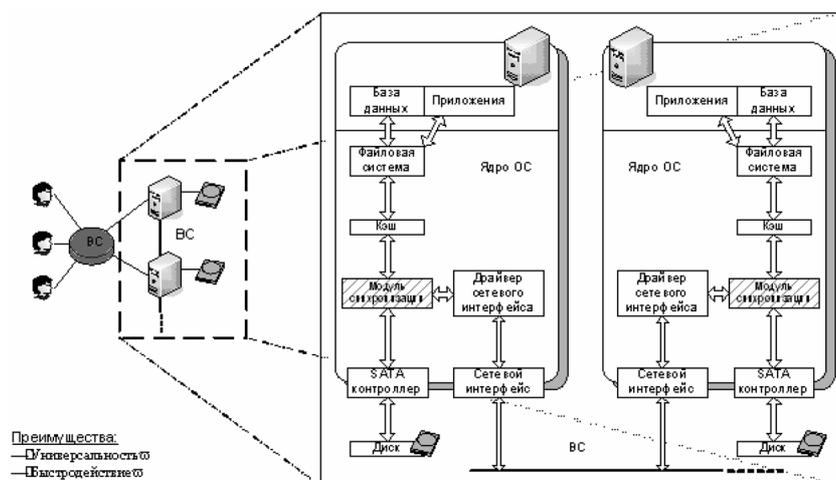


Рис. 3. Место модуля синхронизации в структуре ядра ОС

Кроме того, информация, синхронизированная на разных уровнях, может оказаться противоречивой.

Увеличение пропускной способности шины PCI-E до 200 Гбит/с, а также разработка интерфейсов SATA и SAS, обеспечивающих пропускную способность 1...6 Гбит/с, с одновременным развитием сетевых технологий InfiniBand (до 100 Гбит/с), Ethernet 10 Гбит/с и разработкой твердотельных дисков (скорость чтения — 1...4 Гбит/с, скорость записи — 0,5...2 Гбит/с) (рис. 2) позволяет осуществить оперативную программную синхронизацию данных нескольких серверов в локальной вычислительной сети (ЛВС) на уровне тома. Кроме того, этот метод синхронизации информации наиболее универсален.

Резервируемое хранилище DRBD является вариантом реализации на уровне блочного устройства, но у него есть несколько недостатков:

- ограничение синхронизируемого раздела 4ТБ;
- работа только с одним резервным сервером;
- для возможности распределения нагрузки между серверами требуется дополнительно сетевая файловая система;
- полный отказ системы в случае сбоя ведущего сервера, при восстановлении после отказа.

В системах хранения данных с программной синхронизацией один из серверов назначается ведущим, остальные — ведомыми. Ведущий работает с пользователями и обрабатывает запросы на чтение и запись. Ведомые серверы находятся в горячем резерве и занимаются синхронизацией своих данных с данными ведущего. В случае отказа ведущего сервера его нагрузку принимает один из ведомых серверов, который становится новым ведущим.

В структуре программного обеспечения сервера модуль синхронизации расположен между драйвером файловой системы и драйвером диска (рис. 3). Такое расположение повышает производительность, так как модуль находится в ядре ОС. Кроме того, такой подход универсален, так как позволяет уйти от интерпретации данных.

Существуют несколько методов синхронизации. Наилучшим из них является журналирование. В журнал записываются номера блоков, которые были изменены. Таким образом при восстановлении можно достаточно быстро найти измененные блоки и синхронизировать только их.

Ведущий сервер работает с пользователями. Операции записи ведущего дублируют ведомые серверы. Так осуществляется синхронизация данных во время работы.

При временном отказе канала связи или сервера возникает рассинхрони-

зация данных. Для восстановления синхронного состояния может применяться полное копирование данных с ведущего сервера на ведомый. Однако при кратковременном отказе данные отличаются незначительно и полное копирование неэффективно. Для этого применяется журнал блоков. В журнал блоков записываются номера блоков, в которые осуществляется запись данных. Таким образом, в случае кратковременного отказа, сравнив журналы ведущего и ведомого серверов, можно определить блоки, в которые осуществлялась запись, и синхронизировать только их.

Журнал номеров блоков делится на сегменты фиксированного размера. Каждому новому сегменту во время работы, присваивается уникальный идентификатор (GUID). При полном заполнении сегмента на ведомом и ведущем серверах открываются новые сегменты с одинаковыми идентификаторами. При восстановлении, после отказа на рабочем сервере, в журнале будут существовать сегменты, которых нет на другом сервере. На обоих серверах все сегменты с одинаковыми идентификаторами, кроме последних, будут совпадать. Поэтому для синхронизации потребуется проанализировать только последние сегменты с одинаковыми идентификаторами и последующие сегменты.

В случае, если в журналах ведущего и ведомого серверов сегментов с одинаковыми идентификаторами нет, то требуется полное копирование данных.

Во время синхронизации по журналу ведущий сервер может отказать и тогда данные на ведомом сервере окажутся в несогласованном состоянии.

В этом случае нужно провести восстановление состояния до начала синхронизации. Для этого применяется дополнительный журнал данных, в который во время синхронизации записываются заменяемые (старые) данные блоков. В случае, если журнала данных не хватает для записи всех изменений во время восстановления по журналу номеров блоков, выставляется флаг частичной синхронизации. Флаг также выставляется при полном копировании. Сброс флага происходит при успешном восстановлении и переходе ведомого в состояние работы. Сервер с выставленным флагом имеет несогласованные данные и не может стать ведущим.

В начале своей работы сервер имеет статус ведомого. Он проверяет флаг частичной синхронизации. Если флаг выставлен, восстановление по журналу данных невозможно и ведомый переходит в состояние ожидания ведущего для восстановления по журналу номеров блоков. Если флаг сброшен, ведомый проводит восстановление по журналу данных, если операция синхронизации согласно журналу номеров блоков была прервана. После восстановления он ожидает соединения с ведущим. Когда соединение установлено, ведомый начинает синхронизацию по журналу номеров блоков с журналированием изменений данных. Если журнала данных не хватает, восстановление проводится без журналирования. Если восстановление по журналу номеров блоков невозможно, выполняется полное копирование. По завершении восстановления на ведущем и ведомом узлах открывается новый сегмент журнала и ведомый переходит в состояние работы.

Ведущий сервер при начале работы при необходимости проводит восстановление состояния по журналу данных и переходит в состояние работы. Такие же действия выполняются при смене статуса сервера с ведомого на ведущего.

Во время работы система может находиться в следующих состояниях (рис. 4):

- инициализация (выполняется первоначальное копирование информации с ведущего на ведомый);
- работа (данные, записываемые на ведущий сервер, дублируются на ведомый);
- переключение при сбое (при сбое ведущего осу-

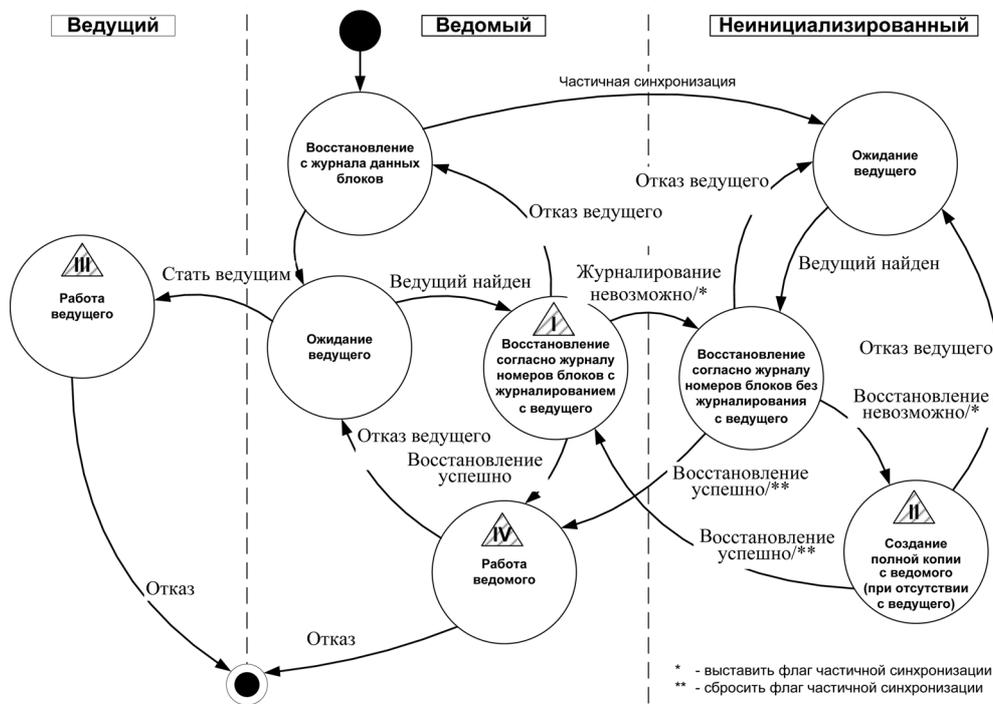


Рис. 4. Граф состояний системы хранения данных с программной синхронизацией

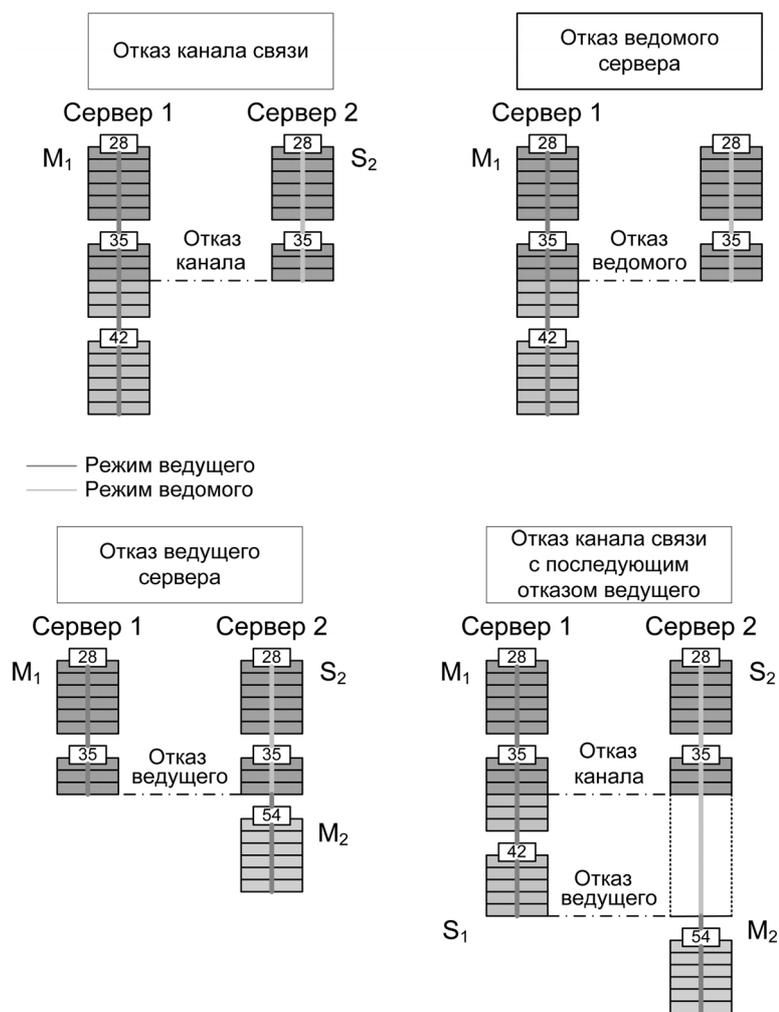


Рис. 5. Возможные варианты отказов и состояние журналов после них

ществляется переключение пользователей на ведомый сервер, который, в свою очередь, становится ведущим);

- восстановление (после восстановления работоспособности отказавшего узла начинается синхронизация информации с ведущим сервером).

В состоянии "работа" (рис. 4, III), при записи новых данных, ведущий проверяет текущий сегмент журнала номеров блоков. Если сегмент заполнен, открывается новый сегмент журнала на ведущем и ведомом серверах. Далее ведущий передает номер записываемого блока и данные ведомому и осуществляет запись номера блока в журнал и данных в блок. Ведомый, получив номер блока и данные, также осуществляет запись номера блока в журнал и данных в блок.

Если ведомый проводит восстановление по журналу номеров блоков, то ведущий не передает записываемые данные ведомому. Если ведомый создает полную копию, то ведущий проверяет указатель копирования ведомого. Если номер записываемого блока больше указателя, то данные ведомому не отправляются, так как блок будет скопирован позже.

Если номер блока меньше указателя, то он уже был скопирован, ведущий передает данные ведомому, но при этом на ведомом проводится только запись данных в блок без записи в журнал номеров блоков.

Во время работы ведущий сервер может распределить нагрузку на чтение между ведомыми серверами. Ведомый сервер, получив запрос, читает запрошенный блок и отправляет данные обратно ведущему. Таким образом повышается общая пропускная способность на чтение системы.

В состоянии "восстановление" согласно журналу номеров блоков (рис. 4, I), при временном отказе канала связи или ведомого сервера (рис. 5), данные записываются только на ведущий сервер. Ведущий продолжает сохранять номера записываемых блоков в сегмент, а также в случае его заполнения может открыть новый сегмент. В результате, в журналах серверов создается ситуация, когда имеются сегмент с одинаковыми GUID на ведущем и ведомом серверах, но с различающимся содержанием, а также несколько сегментов, которые есть только на ведущем сервере. Аналогичная ситуация складывается, когда отказывает ведущий сервер и происходит передача его обязанностей ведомому серверу (переключение ведомого в режим ведущего) (рис. 5).

Немного более сложная ситуация складывается, когда происходит временный отказ канала, во время которого отказывает ведущий сервер (рис. 5). В этом случае опять имеется пара сегментов на обоих серверах с одинаковыми GUID и различающимся содержанием. При этом на сервере, который изначально был ведущим, имеются сегменты, созданные во время отказа канала. И наоборот, на сервере, который стал ведущим, будут созданы сегменты, которых нет на первом сервере.

Таким образом, необходимо синхронизировать блоки, номера которых записаны в последней паре сегментов журнала с одинаковыми GUID и сегментах после них (рис. 6).

Для поиска последней пары блоков ведомый посылает запрос ведущему на получение списка GUID сегментов журнала. Ведущий составляет список GUID сегментов и отправляет его ведомому. Ведомый, начиная с конца списка идентификаторов сегментов своего журнала, последовательно перебирает идентификаторы и ищет их в списке идентификаторов ведущего, начиная с конца. Первые совпавшие идентификаторы будут являться

идентификаторами сегментов, на которых произошел отказ. Далее ведомый посылает запрос ведущему на получение содержимого сегмента с найденным GUID. Ведущий ищет запрошенный сегмент и отправляет его содержимое ведомому. Ведомый, приняв сегмент, сравнивает содержимое своего сегмента с содержимым принятого сегмента. Последняя пара совпадающих номеров блоков будет той парой, при записи которой произошел сбой. На ведомом это будет последний номер блока в данном сегменте. С ведущего сервера на ведомый копируются блоки, номера которых расположены на ведущем после найденной пары, включая ее. После копируются данные блоков, номера которых записаны в последующих сегментах ведомого. Далее копируются данные блоков, номера которых записаны в последующих сегментах ведущего.

После завершения восстановления на ведущем и ведомом серверах открывается новый сегмент журнала номеров блоков и ведомый переходит в режим работы.

Если в ходе восстановления журнала данных не хватает, восстановление продолжается без журналирования и выставляется флаг частичной синхронизации. По завершении восстановления флаг сбрасывается.

При восстановлении на ведомом и ведущем серверах может не оказаться ни одной пары блоков с одинаковыми GUID. Тогда синхронизация по журналу номеров блоков невозможна и проводится полное копирование.

В состоянии полного копирования (см. рис. 4, II) ведомый последовательно запрашивает данные блоков с ведущего сервера. Если на ведущем проводится запись данных в блок, который уже был скопирован, данные этого блока на ведомом обновляются. Если проводится запись в блок, который еще не был скопирован, он копируется позже. При полном копировании журнал номеров блоков на ведомом сервере не ведется. По завершении копирования на ведущем и ведомом серверах открывается новый сегмент журнала номеров блоков и ведомый переходит в режим работы.

В состоянии восстановления с журнала данных блоков (см. рис. 4), из журнала последовательно считываются номера блоков и соответствующие данные. Прочитанные из журнала данные записываются в блок с прочитанным номером. После восстановления ведомый ожидает соединения с ведущим или назначения его ведущим.

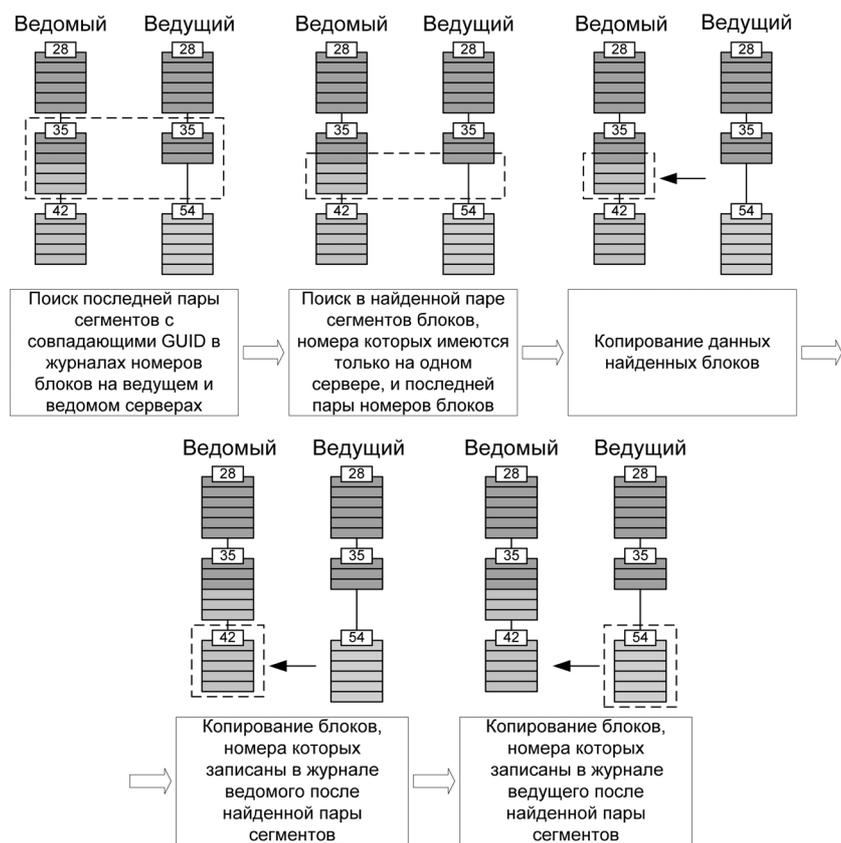


Рис. 6. Восстановление согласно журналу номеров блоков

Если был выставлен флаг частичной синхронизации, то восстановление с журнала блоков не проводится и ведомый переходит в ожидание ведущего в состоянии частичной синхронизации, для начала восстановления по журналу без журналирования данных или создания полной копии.

Использование программной синхронизации позволяет снизить стоимость отказоустойчивой системы хранения данных в 1,5–2 раза (рис. 7) по сравнению со схемой, содержащей общедисковый

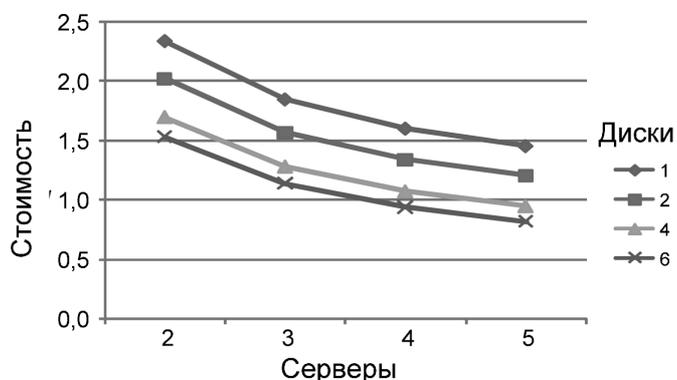


Рис. 7. Расчет стоимости создания системы хранения данных

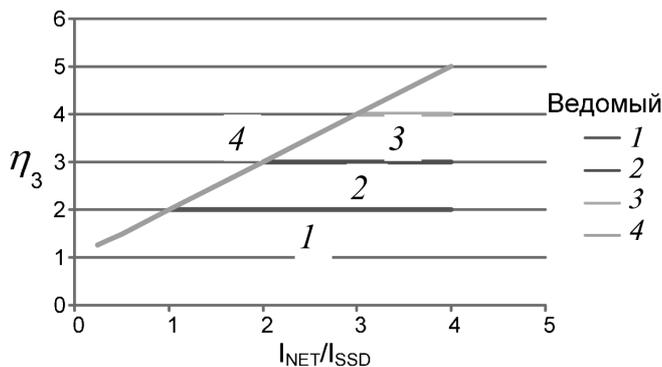


Рис. 8. Расчет увеличения потока на чтение информации при распределении запросов, где  $\eta_3$  — относительное увеличение интегрального потока с  $N$  серверов по отношению к одному серверу;  $I_{NET}/I_{SSD}$  — отношение максимального потока ЛВС к максимальному потоку SSD диска

массив. Надежность этой системы с программной синхронизацией выше за счет использования множественных копий данных. При этом данная реализация программной синхронизации позволяет распределять операции чтения между серверами, что повышает общую пропускную способность на чтение системы (рис. 8). Такой подход делает возможным отказ от применения в ЦОД дис-

ковых подсистем, требующих хранения данных объемом до 200 Гбайт (а в 2010 году и 1...4 Тбайт) и приводит к уменьшению стоимости вычислительной системы.

#### Список литературы

1. Афанасьев А. П., Волошинов В. В., Кривцов В. Е., Рогов С. В., Сухорослов О. В. Использование информационно-алгоритмических ресурсов для организации распределенных вычислений // Проблемы вычислений в распределенной среде: организация вычислений в глобальных сетях: Труды ИСА РАН. М.: РОХОС, 2004. С. 106—144.
2. Афанасьев А. П., Волошинов В. В., Рогов С. В., Сухорослов О. В. Развитие концепции распределенных вычислительных сред // Проблемы вычислений в распределенной среде: организация вычислений в глобальных сетях: Труды ИСА РАН. М.: Эдиториал УРСС, 2004.
3. Херрманн Р. Распределенные вычисления в одноранговых сетях и высокопроизводительные вычислительные системы на базе архитектуры Intel®. Дата обновления 13 ноября 2008 г. URL: <http://www.intel.com/corporate/europe/emea/rus/country/update/contents/sv08031.htm>
4. Distefano S., Scarpa M., Puliafito A. Modeling Distributed Computing System Reliability with DRBD. Reliable Distributed Systems, 2006. SRDS'06.
5. Reisner P. Distributed Replicated Block Device // Proc. of the 9th International Linux System 2002.
6. Haiping Xu, Liudong Xing, Ryan Robidoux. Dynamic Reliability Block Diagrams for System Reliability Modelling // International journal of computers and applications. 202-2552.
7. An Optimal Algorithm for Online Reorganization of Replicated Data: Technical Report UCSC-CRL-02-36. Nov. 2002.

УДК 519.688

В. М. Захаров, д-р техн. наук, проф.,  
Е. Л. Столов, д-р техн. наук, проф.,  
С. В. Шалагин, канд. техн. наук, доц.,  
e-mail: sshalagin@mail.ru,

Казанский государственный  
технический университет им. А. Н. Туполева

### Алгоритм вычисления остатка по модулю и оценки его сложности в базисе ПЛИС

Предложен алгоритм вычисления остатка от деления произвольного двоичного числа заданной разрядности на заданное постоянное значение, реализованный на базе однотипных операций сложения частичных остатков. Определена и исследована сложность модели устройства на абстрактном, структурном и функционально-логическом уровнях в базисе программируемых логических интегральных схем класса FPGA.

**Ключевые слова:** остаток по модулю, однотипные операции, оценки сложности, ПЛИС класса FPGA

#### Введение

Операция вычисления значения по заданному модулю целого отличного от степени два числа (далее — Операция) используется для решения широкого круга задач. К ним относятся задача реализации рекуррентных преобразований над потоками чисел [1], тестирование и диагностика цифрового оборудования [2], задачи аппаратной реализации кодовых последовательностей и конгруэнтных генераторов псевдослучайных чисел (ГПСЧ) [3—6]. Операция является наиболее трудоемкой по критерию временной сложности, что критично для случаев, когда есть потребность в обработке больших объемов информации в специализированных устройствах с использованием модульной операции. Вопросам снижения сложностных оценок устройств при реализации Операции в литературе уделяется большое внимание. Примеры различных способов аппаратной реализации Операции представлены в работах [3—6]. При создании встроенных систем или прототипов различных устройств, использующих Операцию, акту-

альна задача ее реализации на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) класса FPGA [7–9].

В работе предложена модель Операции на основе последовательного (поэтапного) выполнения операции сложения остатков по модулю данного числа. Результат на каждом этапе сохраняется в регистрах, при этом различные этапы вычисления остатков для чисел в потоке реализуются параллельно. Это позволяет обеспечить конвейерную обработку последовательностей чисел заданной разрядности и снизить время получения остатков по модулю для обрабатываемого потока чисел.

Цель данной работы — предложить алгоритм на основе модели Операции и получить оценки сложности его реализации в базисе ПЛИС класса FPGA Virtex 4 LX [9]. Наличие внутри них конфигурируемых логических блоков, включающих генераторы функций, в том числе ядер XtremeDSP [9, 10], и запоминающие элементы ( $D$ -триггеры), позволяет рассматривать предложенный алгоритм как адекватный заданному базису. Приведены оценки сложности реализации Операции на ПЛИС как при использовании ядер XtremeDSP, так и без их использования.

### Модель вычисления остатка от деления на целое число

Предлагается следующая модель реализации процесса формирования остатков по заданному постоянному модулю  $L$  от целого положительного числа  $A$ . Пусть исходное число  $A$  представлено в виде степеней числа два:

$$A = a_{n-1}2^{n-1} + a_{n-2}2^{n-2} + \dots + a_12 + a_0. \quad (1)$$

Далее представление  $A$  согласно (1) проводится  $n$ -разрядным двоичным вектором  $(a_{n-1} \dots a_0)$ .

В предлагаемой модели вычисление значения остатка от числа  $A$  сводится к вычислению остатка от числа  $G$ :  $A \equiv G \pmod{L}$  ( $A$  сравнимо с  $G$  по модулю  $L$ ), где  $L$  есть  $p$ -разрядное двоичное число,  $p < n$ . Число  $G$  определяется по формуле

$$G = a_{n-1}b_{n-1} + \dots + a_{p+1}b_{p+1} + a_p b_p + \dots + a_12 + a_0. \quad (2)$$

Коэффициенты  $b_i$  в формуле (2) определены согласно соотношению

$$b_i = a_i, \quad i = \overline{0, p}, \quad b_j = 2^j \pmod{L}, \quad j = \overline{p+1, n-1}, \quad (3)$$

где значение  $p$  определено из условия  $(2^p < L) \& \& (2^{p+1} > L)$  и соответствует разрядности величины  $L$ . Величина  $G$  является суммой остатков от деления слагаемых — степеней числа два, по модулю постоянной величины  $L$  (суммой частичных остатков). Затем величина, которую обозначим как  $G(1)$ ,

представляется в виде выражения (1) и подставляется в формулу (2). Результат, в свою очередь, обозначен как  $G(2)$ . В общем случае величина  $G(i-1)$ , представленная в виде выражения (1), подставляется в формулу (2). В результате получаем величину  $G(i)$ ,  $i = \overline{1, T}$ . Возникает задача определения числа итераций  $T$ , требуемого для получения результата — значения  $G(T)$ :

$$G(T) \in [B, C],$$

где  $C - B = L$ .

Алгоритм вычисления остатка от деления произвольного  $n$ -разрядного числа  $A$  по модулю  $L$  включает два этапа.

*Этап 1.* Вычисление  $G$  согласно (2)  $T$  раз до тех пор, пока полученное значение на  $T$ -м шаге —  $G(T)$  не будет принадлежать заданному интервалу  $[B, C]$ .

*Этап 2.* Приведение  $G(T)$  к интервалу  $[0, L-1]$ .

При данных допущениях имеет место следующее утверждение.

**Утверждение.** Для заданного согласно (1)  $n$ -разрядного числа  $A$  формируется последовательность величин  $G(t)$ ,  $t = \overline{1, T}$ , при использовании (2) с коэффициентами, определенными согласно (3), такая, что величина  $G(T)$  принадлежит интервалу  $[0, L-1]$ .

Справедливость утверждения следует из того, что  $b_j = 2^j \pmod{L}$  будет строго меньше, чем  $2^j$ ,  $j = \overline{p+1, n-1}$ . Затем после получения значения  $G(T) \in [0, 2^{p+1} - 1]$  оно приводится к интервалу  $[0, L-1]$  путем вычитания из него величины  $L$  при условии, что  $G(T) \geq L$ .

Достоинство данного способа в том, что для вычисления требуется выполнить только операции сложения с положительными числами, а на заключительном этапе — операции сравнения и вычитания с константой для  $(p+1)$ -разрядных положительных чисел.

### Схема алгоритма вычисления остатка от деления на целое число

Предлагаемое устройство реализует Операцию в базисе ПЛИС/FPGA на основе последовательного вычисления значения  $G$ , тождественно равному числу  $A$  по заданному постоянному модулю  $L$ , представленному  $(p+1)$ -разрядным вектором,  $A \pmod{L} = G \pmod{L}$ .

При заданных значении  $L$  и разрядности  $n$  величины  $A$  вида (1) определено максимальное значение переменной  $t$ :  $\max t = T$  путем непосредственного подсчета числа операций вида (2), требуемых для нахождения остатков от деления на  $L$  значений  $A$  на интервале от  $(L+1)$  до  $(2^n - 1)$ .

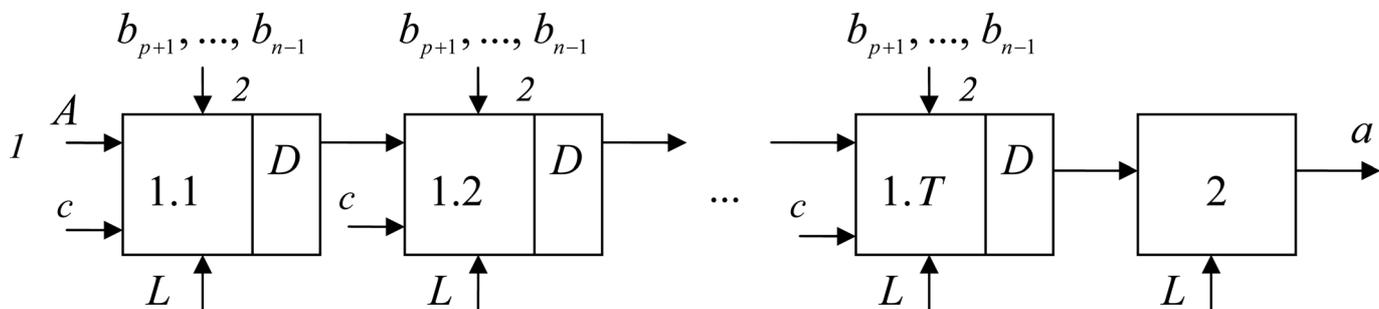


Схема формирования остатка по заданному постоянному модулю  $L$

Рассмотрим структурную модель реализации Операции, содержащую  $T$  ступеней для вычисления частичных остатков согласно (2) и их сохранения: 1.1, ..., 1. $T$ , а также блок 2 для приведения частичного остатка, вычисляемого на  $T$ -й ступени, к интервалу  $[0, L - 1]$  (см. рисунок).

Обозначим поток чисел, поступающий на вход  $I$ , как  $A_1, A_2, \dots, A_N$ , а частичный остаток, полученный на  $t$ -м шаге, — как  $G(t, i)$ ,  $t = \overline{1, T}$ ,  $i = \overline{1, N}$ . В начальный момент времени блоки 1.1 — 1. $T$  конфигурируются под определенное  $(p + 1)$ -разрядное значение  $L$ , и на вход 2 каждой ступени подаются коэффициенты  $b_j$ ,  $j = \overline{(p + 1), (n - 1)}$ , вычисленные по соотношению (3). Затем на вход  $I$  поочередно поступают значения  $A_1, A_2, \dots, A_N$ , момент поступления каждого из которых определяется синхросигналом  $c$ . По первому синхросигналу  $c$  блок 1.1 вычисляет  $G(1, 1)$  согласно (2), по второму — блок 1.1 вычисляет  $G(1, 2)$ , а блок 1.2 —  $G(2, 1)$ , согласно (2) и т. д. Результаты сохраняются в регистрах  $D$ . По  $f$ -му синхросигналу блок 1. $t$  вычисляет  $G(t, f - t + 1)$  согласно (2),  $f = \overline{T, N}$ ,  $t = \overline{1, T - 1}$ , а с выхода блока 1. $T$  снимается значение  $G(T, f - T + 1)$ , вычисленное на базе  $G(T - 1, f - T + 1)$  и принадлежащего интервалу  $[0, 2^{p+1} - 1]$ . Значение  $G(T, f - T + 1)$  поступает на вход блока 2, где оно приводится к интервалу  $[0, L - 1]$  по следующему алгоритму: если  $G(T, f - T + 1)$  больше  $(L - 1)$ , то на выход поступает разность  $G(T, f - T + 1) - L$ ; иначе — непосредственно значение  $G(T, f - T + 1)$ . С выхода блока 2 снимается остаток от деления на  $L$  для числа  $A_{(f-T)}$ , а именно  $a_{(f-T)}$ . По синхросигналам  $c$  с номерами  $N - T + 1, \dots, N$  с выхода блока 2 снимаются значения  $a_{(N-T+1)}, \dots, a_N$ . Разрядность  $G(t, f - t + 1)$ ,  $t = \overline{1, T - 1}$ ,  $f = \overline{T, N}$ , не превышает значения

$$d = \left\lceil \log_2 \left( \sum_{i=0}^p a_i + \sum_{j=p+1}^{n-1} b_j \right) \right\rceil,$$

где величины  $a_i$ ,  $i = \overline{0, p}$ , и  $b_j$ ,  $j = \overline{p + 1, n - 1}$ , определены согласно (2).

Таким образом, за счет конвейерной организации обработки потока чисел  $A_1, A_2, \dots, A_N$  за время  $(N + T)\tau_1$ , где  $\tau_1$  — период между поступлением синхросигналов, будут вычислены остатки для данного потока чисел —  $a_{(N-T+1)}, \dots, a_N$ .

### Реализация алгоритма на ПЛИС класса FPGA

Решение задачи реализации на ПЛИС (см. рисунок) рассмотрим на примере построения конгруэнтного ГПСЧ по простому модулю, где используется Операция. При формировании последовательностей псевдослучайных чисел актуальна задача синтеза конгруэнтного мультипликативного ГПСЧ над конечным полем вида [11]

$$x_{i+1} = (x_i q) \bmod p_s, \quad (4)$$

где  $p_s = 2p_1 + 1$  — число Смита;  $p_1$  — простое число;  $q$  — примитивный элемент. Период последовательности чисел, полученной на основе (4), равен  $p_s - 1$  [11]. Сложностные оценки для ГПСЧ, реализуемого согласно (4), определяются относительно высокой сложностью выполнения операции вычисления остатка по простому модулю  $\bmod p_s$  [1].

Рассмотрим частный случай, когда разрядность числа  $p_1$  равна  $n/2$ , где  $n$  — разрядность произведения  $x_i q$  в формуле (4). В данном случае разрядность числа Смита будет равна  $n/2 + 1$ . При заданных ограничениях на  $n$ , определяющего разрядность числа Смита и разрядность произведения, находим число итераций  $t$ , которые требуется выполнить при вычислении значения остатка по модулю  $p_s$ . Для решения указанной задачи необходимо протестировать все значения на интервале от  $p_s + 1$  до  $(2^{n-1})$  для определения числа выполнений  $t$  операций вида (2). Данная задача решена для  $n = 8; 16; 24$ , результаты приведены в табл. 1. Максимальное число операций  $T$  для  $A$  размерности 8 и 16 ( $p_s$ , равных 23 и 263 соответственно) бу-

Результаты исследования работы этапа 1 алгоритма

$n$	$p_1$	$p_s$	$d$	$t = 0$	$t = 1$	$t = 2$	$t = 3$
8	11	23	7	80	131	21	0
16	131	263	11	$\sim 9,10 \cdot 10^3$	$\sim 32,5 \cdot 10^3$	$\sim 23,6 \cdot 10^3$	0
24	2063	4127	16	$\sim 734 \cdot 10^3$	$\sim 7,44 \cdot 10^6$	$\sim 8,45 \cdot 10^6$	$\sim 147 \cdot 10^3$

дет равно двум. Для чисел размерности 24, когда  $p_s = 4127$ , число выполняемых операций  $T = 3$ .

Для  $n = 8$  и  $p_s = 23$  значение  $d$  будет равно 7, что близко к  $n$ . При росте  $n$  разрыв между данными числами увеличивается — для  $n = 24$  и  $p_s = 4127$  значение  $d = 16$ , что составляет  $2/3$  от  $n$ . Дальнейшее увеличение разрядности числа  $A$  делает поиск  $T$  затруднительным, так как требуется осуществить перебор  $\Theta(2^n)$ , а точнее,  $(2^n - L)$  его значений.

Для реализации Операции для величины  $A$  по модулю  $L$  по предложенному способу используется ПЛИС семейства Virtex 4 LX (Xilinx Corp.), выполненные на основе 90-нанометровой технологии [8—10]. Специализированные микропроцессорные ядра (XtremeDSP), применяемые при реализации Операции, имеют различные характеристики для ПЛИС разных семейств (производителей) [10]. Например, для семейства Stratix II (Altera Corp.) они реализуют только операции умножения над 9-разрядными двоичными числами [7], тогда как для семейства Virtex 4 LX внутри данных ядер реализуются операции умножения над 18-разрядными двоичными числами и операции сложения/вычитания над 48-разрядными двоичными числами [8—10]. Степень задействования конфигурируемых генераторов функций (ГФ) и логических элементов (ЛЭ) ПЛИС Virtex 4 LX, а также вклад времени задержки межсоединений (МС) в общее время задержки определяются согласно следующим критериям (коэффициентам). Первый, коэффициент задействования генераторов функций  $K_{зГФ}$  определяется по формуле [6]

$$K_{зГФ} = Q_{ЭС} / (6N_{ЛЭ}), \quad (5)$$

где  $N_{ЛЭ}$  — число логических элементов;  $Q_{ЭС} =$

$$= \sum_{i=3}^7 (i-1)N_{ГФ(i)} - \text{оценка сложности функциональной модели в базе ПЛИС по числу двух-}$$

входов элементов, реализующих произвольную булеву функцию (БФ) — элементарных схем (ЭС);  $N_{ГФ(i)}$  — число генераторов функций. Приведенное (по числу входов) число ЛЭ, задействованных для реализации цифровой схемы на основе ГФ на ПЛИС Virtex 4 LX, определено как  $N_{ЛЭ} = 1/2N_{ГФ(4)} + N_{route}$ , где  $N_{route}$  — число конфигурируемых логических блоков (КЛБ), используемых не для реализации БФ (как межсоединения и для реализации запо-

минающих устройств). Коэффициент задействования ЛЭ —  $K_{зЛЭ}$ , вычислен по формуле [6]

$$K_{зЛЭ} = N_{ЛЭ} / Q, \quad (6)$$

где  $Q$  — число задействованных ГФ от четырех переменных — ГФ(4) для ПЛИС Virtex 4 LX. Вклад задержки МС в общее время задержки функционирования  $K_{МС}$  вычисляется по формуле [12—14]

$$K_{МС} = T_{МС} / T_{об}, \quad (7)$$

где  $T_{МС}$  — вклад МС в общее время задержки функционирования ( $T_{об}$ ) заданной цифровой схемы. Коэффициенты (5) и (6) позволяют делать выводы относительно эффективности использования ГФ при реализации проектов на ПЛИС заданного типа, а коэффициент (7) — выводы относительно наличия потенциальной возможности снижения времени задержки функционирования цифровой схемы при ее реализации на ПЛИС/FPGA.

Сравнительные оценки  $T_{об}$  при реализации Операции для  $n$ -разрядных двоичных чисел ( $n = 8; 16; 24$ ) для генераторов псевдослучайных последовательностей (ПСП) вида (4) на ПЛИС XC4VLX200-FFL1513-11 (семейства Virtex 4 LX) приведены в табл. 2 (без использования ядер XtremeDSP) и в табл. 3 (с их использованием). Логические ресурсы данной ПЛИС для реализации Операции при заданных ограничениях задействованы не более, чем на 1 %. В табл. 2 и 3 приняты

Таблица 2

Оценки сложности и реальных затрат по реализации Операции на ПЛИС без ядер XtremeDSP

$n$	$N_{ГФ(4)}$	$N_T$	$N_{route}$	$K_{зГФ}$	$K_{зЛЭ}$	$T_{об}$	$K_{МС}$
8	36	24	32	0,36	0,74	3,52	0,08
16	137	42	70	0,49	0,67	3,52	0,08
24	319	77	168	0,49	0,67	3,52	0,08

Таблица 3

Оценки сложности и реальных затрат по реализации Операции на ПЛИС при использовании XtremeDSP

$n$	$N_{ГФ(4)}$	$N_T$	$N_{route}$	$N_{DSP}$	$K_{зГФ}$	$K_{зЛЭ}$	$T_{об}$	$K_{МС}$
8	6	12	0	10	1,0	0,50	6,76	0,14
16	12	22	0	22	1,0	0,50	9,73	0,13
24	16	35	2	45	0,8	0,56	12,7	0,13

следующие обозначения:  $N_{GF(4)}$  — число GF(4), задействованных для реализации операции,  $N_T$  — число  $D$ -триггеров,  $N_{DSP}$  — число ядер XtremeDSP, сконфигурированных как сумматоры;  $N_{route}$  — число ЛЭ, задействованных для маршрутизации. В табл. 2 и 3 приведены также коэффициенты (5)—(7) и  $T_{об}$ , выраженное в наносекундах.

Проекты оптимизированы по времени (из множества построенных реализаций выбирается та, для которой оценки временной сложности — минимальные). GF и ЛЭ (при реализации Операции на ПЛИС без использования ядер XtremeDSP) задействованы не более чем на 50 и 75 % соответственно (см. табл. 2). Для реализации Операции характерна большая доля логических ресурсов, задействованных для передачи сигналов внутри ПЛИС, а не для синтеза логических функций. Кроме того, промежуточные результаты сохраняются в регистрах. Поэтому время задержки функционирования  $T_{об}$  определяется не ЛЭ и GF, а блоками ввода-вывода ПЛИС. Это обеспечивает низкий вклад МС в данную величину — примерно 8 %, а также постоянное  $T_{об}$ , равное 3,52 нс.

Что касается реализации Операции на ПЛИС Virtex 4 LX с использованием ядер XtremeDSP, то время задержки функционирования в данном случае будет варьироваться в диапазоне от 6,76 до 12,7 нс (см. табл. 3). GF задействованы на 80—100 %, ЛЭ — на 50—56 %, а специализированные ядра — на 10; 22 и 46 % для  $n = 8; 16$  и  $24$  соответственно. Данный факт объясняется тем, что вычисление суммы четырех, восьми и десяти чисел разрядности  $n$ , равной 8; 16 и 24 соответственно, организовано при использовании двух-, трех- и четырехуровневых схем, использующих XtremeDSP. Задержка функционирования ядра XtremeDSP, выступающего как уровень данной схемы, равна 2,6 нс [9]. Ядра соединены между собой при использовании МС. Величина  $K_{МС}$  имеет значение 13—14 %.

### Заключение

По приведенному алгоритму оценка временной сложности вычисления  $N$  значений остатков по модулю  $L$  для потока чисел  $A_1, A_2, \dots, A_N$  имеет порядок  $\Theta((N + T)\tau_1)$ , где  $T$  — число ступеней в структурной модели Операции, в известных алгоритмах — порядок  $\Theta(N\tau_2)$ , где  $\tau_2$  — оценка времени вычисления значения одного остатка и  $\tau_1 \ll \tau_2$ .

Определена сложность реализации устройства в базе ПЛИС/FPGA для выполнения операции получения остатка от деления по заданному модулю для потока чисел разрядности  $n = 8; 16$  и  $24$ . Устройство имеет лучшие характеристики по оценкам быстродействия при реализации на ПЛИС семейства Virtex 4 LX без использования специализированных ядер XtremeDSP. При этом оценки быстродействия устройства не уменьшаются с увеличением разрядности обрабатываемых чисел в потоке.

### Список литературы

1. Молдовян Н. А. Алгоритмы аутентификации информации в АСУ на основе структур в конечных векторных пространствах // Автоматика и телемеханика. 2008. № 12. С. 163—177.
2. Латыпов Р. Х., Нурутдинов Ш. Р., Столов Е. Л., Фардажев Р. Г. Применение теории линейных последовательных машин в системах диагностики // Автоматика и телемеханика. 1988. № 8. С. 3—27.
3. Патент РФ № 2324972. Устройство для формирования остатка по произвольному модулю от числа / В. И. Петренко, Ю. В. Кузьминов, Д. Л. Карагулян, О. В. Мосин. 2008. Бюл. № 14.
4. Патент РФ № 2192092. Устройство для преобразования  $n$ -разрядного двоичного позиционного кода в двоичный код остатка по модулю  $m$  / Л. А. Овчаренко, В. И. Турченок. 2002. Бюл. № 30.
5. Патент РФ № 1785081. Устройство для формирования остатка по произвольному нечетному модулю от числа / В. В. Бережной, Н. И. Червяков, А. А. Оленев. 1992. Бюл. № 48.
6. Шалагин С. В., Кайбушев Ф. Х., Зелинский Р. В. Реализация на ПЛИС генераторов псевдослучайных последовательностей и средств их CRC-контроля // Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева. 2009. № 2. С. 57—61.
7. Stratix II GX. Handbook. Altera Corporation URL:www.altera.com/products/devices/stratix-ii/stratix-ii-gx/s2gx-index.jsp. 1995—2008.
8. Кузелин М. О., Кнышев Д. А., Зотов В. Ю. Современные семейства ПЛИС фирмы Xilinx: Справ. пособие. М.: Горячая линия — Телеком. 2004. 440 с.
9. Virtex-4 LX FPGAs. Xilinx, Inc. URL:http://www.xilinx.com/products/\_virtex4/lx.htm. 1994—2008.
10. Зотов В. Ю. Проектирование встраиваемых микропроцессорных систем на основе САПР фирмы Xilinx. М.: Горячая линия — Телеком. 2006. 522 с.
11. Рыжиков Ю. И. Имитационное моделирование. Теория и технологии. М.: Альтекс-А. 2004. 380 с.
12. Захаров В. М., Нурутдинов Ш. Р., Шалагин С. В. Аппаратная реализация умножения элементов поля Галуа на программируемых микросхемах архитектуры FPGA // Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева. 2001. № 1. С. 36—41.
13. Шалагин С. В. Экспериментальное исследование методики синтеза комбинационных схем на программируемых микросхемах класса FPGA // Микроэлектроника. 2004. Т. 33. № 1. С. 56—67.
14. Шалагин С. В. Умножение элементов расширений полей Галуа в базе ПЛИС/FPGA // Информационные технологии. 2007. № 12. С. 22—27.

УДК 004

**Ю. М. Богданов**, канд. техн. наук, первый зам. ген. директора по информационным технологиям, Центр информационных технологий и систем органов исполнительной власти,

**Д. И. Карнаух**, канд. экон. наук, нач. отдела информационно-аналитических систем, ЗАО "Строительное управление № 155", e-mail: qdaniel@mail.ru

## Информационное обеспечение комплексных процессов государственного управления

*Предложен системный подход к созданию информационного обеспечения для поддержки комплексных задач государственного управления, связанных с разработкой и сопровождением решений при планировании и проведении реформ. Новизна предложенного подхода состоит в интегральном взгляде на информатизацию процессов государственного управления. Область применения научных результатов статьи — информатизация процессов государственного управления произвольными социально-экономическими отраслями (например, здравоохранением и образованием).*

**Ключевые слова:** государственное управление, реформы, информационное обеспечение, технологическая платформа, методология моделирования, информационные модели, интеграция, единое информационное пространство

### Введение

На рубеже XX—XXI веков Россия вошла в стадию активного реформирования. Необходимость реформ была продиктована кардинальным изменением политического строя и структуры государства. В условиях распада устоявшихся связей и принципов организации совместной деятельности, начиная с уровня республик и заканчивая конкретными ведомствами, кардинальные реформы представлялись единственным средством сохранения государственного потенциала.

Многие проводимые реформы являлись революционными, поскольку осуществлялись в условиях начального формирования рыночной экономики, зачастую носили бессистемный характер и не только не решали тех критических проблем,

которые достались России в наследство в результате распада СССР, но и порождали новые. Положительному эффекту реформирования препятствовало, главным образом, отсутствие в стране необходимого опыта рыночных преобразований.

По состоянию на 2009 г. можно констатировать, что процесс активного реформирования большинства отраслей экономики еще далек от завершения, а эффективность функционирования ключевых организационно-хозяйственных механизмов в стране далека от совершенства. Необходимо отметить, что в системе государственного управления задачи, связанные с планированием, прогнозной оценкой, оперативным мониторингом и анализом процессов реформирования социально-экономических отраслей, являются наиболее комплексными и занимают приоритетное место. Подобные задачи направлены на сохранение и развитие человеческого потенциала как основного стратегического показателя конкурентоспособности государства. В данной статье комплексные процессы государственного управления в первую очередь связываются именно с такими задачами.

По мере накопления опыта в сфере государственного управления и совершенствования организационных структур государственного аппарата на первый план в ходе подготовки и проведения реформ выходят проблемы иного плана, а именно:

- отсутствие действенной методологической базы для проведения аналитических и прогнозных расчетов в целях оценки возможных последствий принимаемых в ходе реформирования решений;
- отсутствие эффективных информационных средств моделирования сценарных условий развития отдельных отраслей экономики;
- отсутствие единой вертикальной и горизонтальной технологической инфраструктуры обеспечения коллективной работы экспертов в ходе подготовки и реализации проектов реформ.

Ежегодно по различным государственным программам проводятся многочисленные научные исследования, направленные на совершенствование государственного управления. Практическая применимость результатов многих исследований далеко не бесспорна, но даже те немногие научные результаты, которые могли бы послужить практической пользе, не находят конкретного воплощения.

Основная проблема, из-за которой результаты подобных научных исследований оказываются невостребованными, — отсутствие дальнейшего развития результатов исследований, воплощения их в виде информационных моделей и последующей алгоритмизации в информационных системах. Поскольку очевидно, что задача по решению этой проблемы выходит за рамки компетенции государственных служащих, решить ее могут только профессиональные разработчики информационных систем в тандеме с системными аналитиками и представителями научного сообщества, решающими задачи разработки целевого методического обеспечения. Для достижения искомых результатов подобная кооперация должна строиться на принципах четкой детерминации центра ответственности за конечный результат, иначе в лучшем случае достижением подобной рабочей группы будет разобщенный результат, требующий трудоемкой интеграции, а в худшем — набор низкокачественных разобщенных материалов, не пригодных к практическому применению. Необходимо отметить, что результаты научно-исследовательских работ, проводимых по государственному заказу и направленных на разработку расчетных методик, как правило, требуют адаптации, часто существенной, прежде чем на их основе могут быть построены рабочие информационные модели. Отсутствие развития результатов исследований обусловлено отчасти тем, что сами исполнители научных работ зачастую не видят или сознательно не предусматривают продолжения результатов своих работ. Это значительно осложняет дальнейшее использование полученных научных результатов в практических целях, их преобразование в программные алгоритмы и воплощение в виде информационных систем.

Ключевой вывод: в целях повышения эффективности работы государственных экспертов в части решения задач, связанных с моделированием сценарных условий проведения реформ, необходимо использовать комплексный подход к разработке соответствующего научно-практического информационного обеспечения, включающий следующие этапы:

- разработка методологии моделирования возможных результатов проведения реформ;
- адаптация методологии в целях разработки на ее основе информационных моделей;
- создание технологической платформы, интегрирующей разработанные информационные модели в виде алгоритмов программных модулей;
- развитие технологической платформы для построения горизонтальной интегрирующей инфраструктуры с включением смежных субъектов-пользователей: смежные отделы, департа-

менты, представители смежных министерств и учреждений;

- развитие технологической платформы для построения вертикальной интегрирующей инфраструктуры с включением субъектов-пользователей различных уровней вертикали государственного управления: федеральный уровень, региональный уровень, муниципальный уровень, уровень отдельных государственных учреждений.

#### **Разработка методологии моделирования возможных результатов проведения реформ**

Процесс разработки методологии должен начинаться с досконального изучения предметной области, применительно к которой разрабатывается методология. В ходе изучения предметной области целесообразно использовать системный подход. При системном подходе предметную область необходимо разложить на протекающие в ней процессы, граничные процессы, субъекты — участники процессов и объекты, участвующие в процессах. В зависимости от поставленной задачи необходимо определить достаточный уровень детализации системного анализа предметной области. Например, применительно к структурному устройству любой социально-экономической отрасли может быть выделено три уровня детализации: федеральный уровень; уровень субъектов; уровень учреждений. Также необходимо определить возможные допущения при проведении анализа. Так, при разработке методологии анализа государственных расходов на здравоохранение, очевидно, можно не уделять существенного внимания коммерческим услугам, оказываемым за рамками государственных гарантий.

После выделения субъектов, объектов и определения процессов, протекающих внутри исследуемой системы, необходимо сформировать перечень сценарных параметров, определяющих протекание процессов. Этот перечень, целиком или частично, впоследствии должен быть положен в основу информационной системы, позволяющей моделировать возможные последствия проведения реформ при заданных значениях сценарных параметров. Возможность задания сценарных условий при моделировании развития конкретной исследуемой системы (которую может представлять отдельная отрасль экономики, например, здравоохранение или образование) является одним из ключевых условий применимости методологии моделирования возможных результатов проведения реформ, воплощенной в виде информационно-аналитической системы.

## **Адаптация методологии в целях разработки информационных моделей**

Методология в классическом понимании — это алгоритм поиска цели, набор приемов, методов, средств, способов, принципов достижения цели. Для построения на основе имеющейся методологии информационных моделей она должна пройти процесс адаптации. Адаптация методологии для разработки информационных моделей заключается в максимальной структуризации, выделении основных сущностей и алгоритмизация взаимосвязей между сущностями.

В процессе адаптации методология превращается в информационную модель, которая является основой для разработки компьютерных алгоритмов и построения на их основе информационной системы, представляющей собой конечный инструмент, пригодный для практического использования.

Задача адаптации методологии для разработки информационных моделей является сложнее, чем кажется на первый взгляд. Во-первых, данная задача должна решаться на стыке целевых научных знаний и технических знаний в сфере информационных технологий. Во-вторых, во многих случаях методология является слишком общей, как в случае с различными методическими рекомендациями федерального уровня, разработанными для использования в регионах, и не позволяет принять ее в виде "как есть": в этих случаях требуется серьезная переработка и детализация исходного методического аппарата.

## **Создание технологической платформы интеграции информационных моделей**

Информационная модель представляет собой набор формул и алгоритмов, описание объектов вычислений и взаимосвязей между ними. Для того чтобы информационная модель стала применима на практике, она должна быть преобразована в программный алгоритм и имплементирована в имеющуюся или вновь разрабатываемую компьютерную технологическую среду. При решении комплексных задач, как правило, важным требованием является интеграция частных подсистем в единую информационную среду. Например, применительно к сфере образования, для того чтобы рассчитать государственные расходы по всем уровням образования, требуется выполнить расчеты по каждому из уровней образования (начиная с дошкольного и заканчивая высшим и послевузовским), а для этого необходимо, чтобы расчетные информационные модели были сконцентрированы в единой технологической информационной среде: в таком случае их можно будет собрать во-

едино, не прибегая к таким трудоемким манипуляциям, как ручное сведение и обработка результирующей информации различных информационных моделей в табличном редакторе.

При выборе или разработке технологической платформы необходимо учитывать следующий набор критериев:

- возможность организации коллективной работы с применением ролевого подхода;
- использование принципов стандартизации построения модульной архитектуры;
- возможность имплементации новых программных модулей;
- возможность проведения гибкой настройки модулей и их адаптации к текущим задачам;
- возможность интеграции модулей между собой;
- использование открытых стандартов обмена данными;
- возможность масштабирования.

## **Технологическая платформа интеграции информационных моделей на примере системы СМАП**

В 2006 г. с участием авторов была разработана и внедрена в Министерстве экономического развития РФ технологическая платформа СМАП. Аббревиатура СМАП в расшифровке означает "Система моделей анализа и прогнозирования". Архитектура СМАП представляет собой удачный пример технологической платформы, используемой для интеграции различных информационных моделей. В СМАП, в частности, были интегрированы модели по прогнозным расчетам объемов и их финансового обеспечения по гарантируемым государством населению услугам здравоохранения и образования. В 2009 г. были проведены разработка и интеграция в СМАП консолидирующих моделей для обеспечения возможности выполнения расчетов полных государственных расходов на образование и здравоохранение. Результирующие показатели моделей СМАП представлены в разрезе регионов РФ. Разработанные и включенные в СМАП информационные модели решают задачи федерального уровня, но архитектура платформы позволяет развивать имеющиеся и добавлять новые информационные модели, в том числе и детализированного регионального уровня, при необходимости интегрируя их между собой.

Рассмотрим подробнее технические аспекты построения и функционирования платформы СМАП.

Платформа СМАП основана на трехзвенной архитектуре: СУБД—серверное приложение—клиент, и включает несколько логических уровней (рис. 1).

Нижний уровень — уровень данных: исходные данные, данные классификаторов, данные пара-

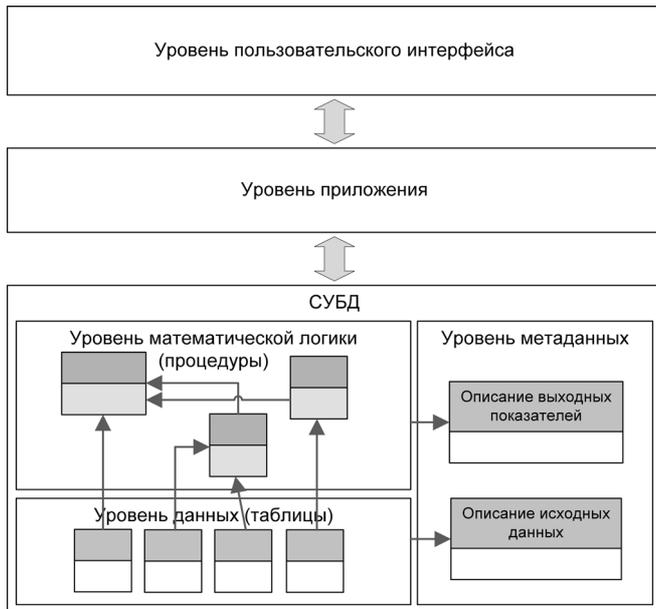


Рис. 1

метров, служебные таблицы. СУБД в СМАП используется не только для хранения данных, поскольку это один из самых неэффективных способов ее применения. В СУБД также сосредоточены процедуры математической логики — собственно информационные модели и другие вспомогательные функции.

Кроме двух рассмотренных уровней СУБД СМАП предполагает наличие еще одного принципиально важного звена — уровня метаданных. На этом уровне осуществляется описание таблиц исходных данных и их показателей, а также результирующих запросов (виртуальных таблиц) — результатов всевозможных расчетов информационных моделей. Благодаря реализации уровня метаданных в СМАП созданы возможности включения новых и модификации существующих информа-

ционных моделей без перепрограммирования основного приложения.

Уровень приложения отвечает за формирование интерфейса пользователя и за взаимодействие с СУБД с помощью обработки команд пользователя, формирования запросов и возврата результатов выполнения расчетных процедур.

Уровень пользовательского интерфейса отвечает за графическое отображение интерфейса на экране пользователя и за трансляцию команд пользователя основному приложению.

В качестве базовой технологии для разработки СМАП была выбрана каркасная технология Microsoft .NET Framework, позволяющая реализовывать управляемые web-приложения, для работы которых на стороне пользователя не требуется никаких специальных программ кроме современной версии любого браузера. Управляемое web-приложение в определении компании Microsoft — это приложение, не взаимодействующее напрямую с операционной системой, а взаимодействующее со средой выполнения CLR.

Среду выполнения можно считать агентом, который управляет кодом во время выполнения и предоставляет приложению основные службы, такие как управление памятью, управление потоками и удаленное взаимодействие. При этом накладываются условия строгой типизации и другие виды проверки точности кода, обеспечивающие безопасность и надежность. Фактически основной задачей среды выполнения является управление кодом.

Для разработки web-приложений в .NET Framework используется технология ASP.NET. Технология ASP.NET размещает среду выполнения и обеспечивает масштабируемую среду для управляемого кода на стороне сервера. ASP.NET работает непосредственно со средой выполнения, формирует на стороне сервера web-интерфейс (web-страницы) для последующей передачи его пользователю, обрабатывает поступившие запросы пользователя, осуществляет взаимодействие с СУБД.

В качестве СУБД в целях обеспечения наилучшей технологической совместимости компонентов программной платформы было выбрано решение Microsoft SQL Server. MS SQL Server является реляционной СУБД промышленного масштаба и предоставляет множество возможностей не только для хранения данных, но и для их обработки с помощью механизмов встроенных процедур и пользовательских функций, для управления событиями

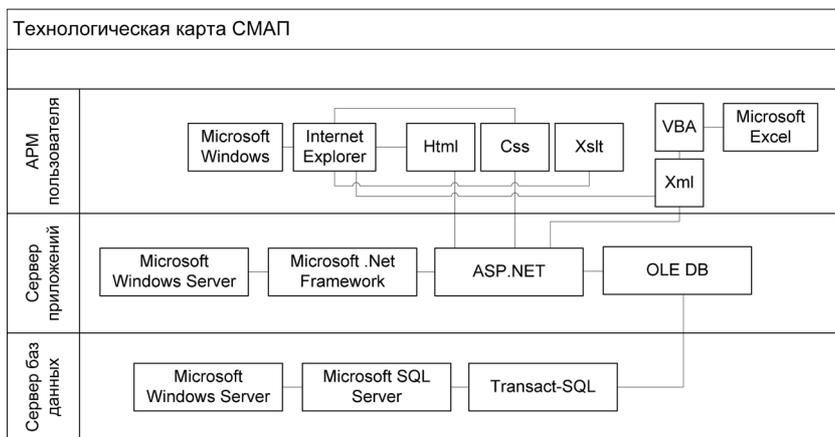


Рис. 2

с помощью механизма триггеров, для обеспечения сохранности информации с помощью средств поддержки планов резервного копирования.

Детальная технологическая карта СМАП представлена на рис. 2.

По технологической карте необходимо сделать ряд дополнительных пояснений.

1. Использование браузера Microsoft Internet Explorer на стороне пользователя является предпочтительным, хотя допускается использование и других браузеров, например, Mozilla Firefox и Opera.

2. Html, Css, Xslt и Xml являются базовыми стандартизированными технологиями для формирования Интернет-страниц.

3. Microsoft Excel используется в качестве удобного средства на этапе пользовательской подготовки массивов исходных данных для их последующего импорта в систему. Заполненные стандартизированные таблицы (шаблоны) Excel с помощью заложенных в них VBA-процедур сохраняются в виде файлов Xml. Далее Xml-файлы могут быть импортированы в базу данных с использованием связки технологий ASP.NET и OLE DB. Эта процедура, как видно из схемы, обрабатывается на стороне сервера приложений, формирующего SQL-запросы на добавление данных в БД.

### Развитие технологической платформы для построения горизонтальной интегрирующей инфраструктуры

В ходе решения таких комплексных задач, как анализ возможных последствий проведения реформ при различных сценарных условиях, как правило, возникает проблема в выстраивании системы взаимодействия экспертных групп. Эксперты различных государственных ведомств, а иногда и в рамках одного ведомства, зачастую испытывают существенные затруднения при выработке совместной позиции. Это обусловлено тем, что в ходе взаимодействия эксперты лишены возможности общаться на едином логическом языке в рамках единого информационного пространства: различные экспертные группы используют различные методологии, различные инструментальные средства, различные ключевые параметры и даже различные интерпретации терминов понятийного аппарата.

Можно выделить основные причины, которые обуславливают возникновение подобных проблем:

- отсутствие четких регламентов взаимодействия между экспертными группами;

- отсутствие налаженных связей между экспертными группами;
- разное видение ситуации экспертными группами;
- отсутствие единой интерпретации целей у экспертных групп;
- смещение центра влияния на принятие решений, предопределяющее "зависимый" выбор решения;
- недостаточная научная проработанность задач, решаемых экспертами.

Проиллюстрировать проблемы взаимодействия экспертных групп можно с помощью схемы, приведенной на рис. 3 (под организацией можно понимать как отдельное ведомство, так и подразделение;  $q1-q5$  — условный уровень качества по пятибалльной шкале).

У каждого эксперта может быть индивидуальное видение (восприятие) задачи и связанных с ней проблем. Также у каждого эксперта в рамках общего проекта может существовать своя обособленная цель (возможно ассоциируемая с организацией), не связанная или связанная лишь косвенно с общим системным результатом. Достигаемый каждым экспертом результат вопреки объективным целям может быть малоэффективным или совсем неэффективным с точки зрения решаемых задач. Кроме того, даже положительный с точки зрения объективных целей результат, полученный отдельным экспертом, может быть не использован и отложен в "корзину", что в итоге может свидетельствовать о наличии дублирования функций вместо эффективного взаимодействия.

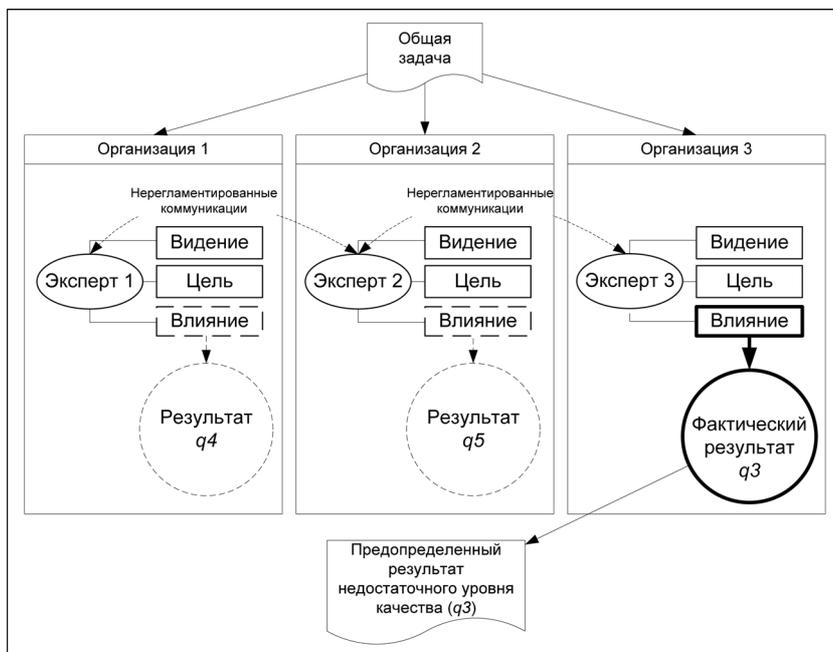


Рис. 3

В приведенном примере фактический результат, получаемый на выходе системы, обусловлен отнюдь не системными задачами, а локальными целями эксперта и степенью его влияния на процесс принятия решений.

На схеме показана упрощенная ситуация. В реальных условиях, даже если получен правильный и эффективный с точки зрения решаемых задач результат, он может быть не использован ввиду отсутствия реальной заинтересованности заказчика (постановщика задачи) в его использовании или неумении его использовать. С одной стороны, это может свидетельствовать о слабой заинтересованности руководителя — заказчика решения конкретной проблемы, с другой — о его безграмотности и неумении эффективно использовать получаемые результаты.

Решением проблемы выстраивания эффективной системы взаимодействия экспертных групп является создание единого информационного пространства на базе стандартизированной технологической платформы. Единое информационное пространство предоставляет экспертам возможности коллегиального обсуждения и анализа целевой информации, включающей как единый набор исходных данных, так и результирующие расчетные показатели, построенные с использованием единых информационных моделей, но в то же время не исключает возможности различной интерпре-

тации целевой информации в ходе выработки совместных решений. В результате создания единого информационного пространства на базе горизонтальной интегрирующей инфраструктуры экспертные группы теряют признаки разрозненных единиц и становятся частями единой системы, направленной на получение максимально эффективного результата в ходе совместной работы.

К преимуществам такого решения можно отнести:

- создание единой коммуникативной системы, объединяющей экспертные группы;
- формирование единого видения экспертов на цель и поставленные задачи, решаемые в ходе совместной работы;
- научно обоснованный подход к решению задач за счет использования методологии, заложенной в информационные модели;
- налаженное взаимодействие в рамках единого информационного пространства;
- формирование прозрачного подхода к принятию решения за счет использования идентичных наборов исходных данных и алгоритмов их обработки.

Систему взаимодействия экспертов после создания единого информационного пространства можно проиллюстрировать рис. 4, где под организацией можно понимать отдельное ведомство, подразделение.

#### Развитие технологической платформы для построения вертикальной интегрирующей инфраструктуры

Любую стоящую перед государством задачу можно рассматривать с точки зрения различных уровней вертикали государственного управления. Необходимость расстановки акцентов при решении прикладных задач на том или ином уровне диктуется потребностью в детализации информации.

Например, для анализа минимальных гарантируемых государственных расходов на здравоохранение в рамках Программы государственных гарантий оказания гражданам РФ бесплатной медицинской помощи с точки зрения федеральных задач планирования можно ограничиться уровнем субъектов РФ без детализации по поселениям субъектов и по конкретным лечебно-профилактическим учреждениям. При этом в расчетах целесообразно использовать усредненные федеральные нормативы. В то же время для планирования государственных расходов на здравоохранение в конкретном регионе необходим более детализированный подход, ориентированный на использование собственных, учитывающих специфику данного конкретного региона, условий, таких как:

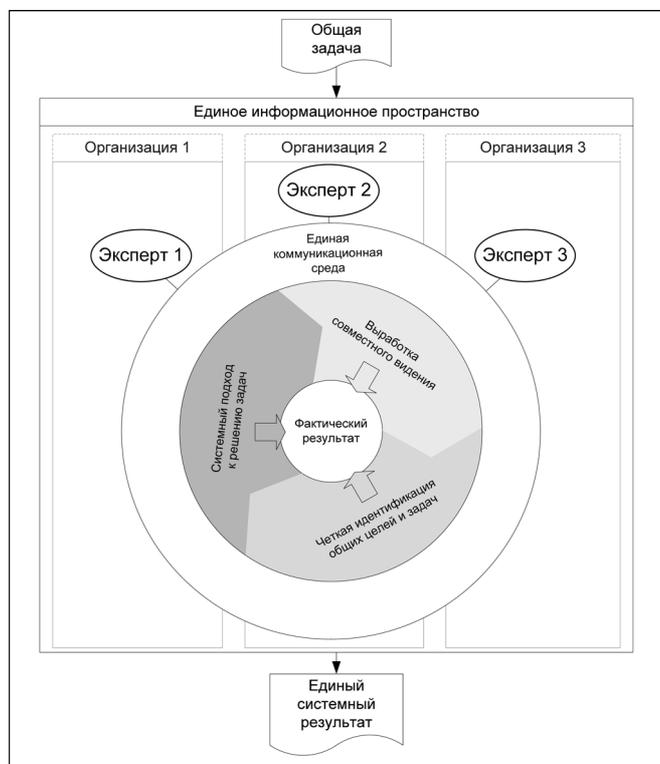


Рис. 4

- нормативы оказания медицинской помощи, определяемые статистикой заболеваемости в конкретных поселениях региона;
- структура поселений региона;
- структура сети лечебно-профилактических учреждений региона;

и др.

При разработке методического аппарата зачастую основной упор делается на конкретный уровень государственного управления. В то же время при совершенствовании подходов к решению задач в области государственного управления актуальной становится проблема адаптации методического аппарата к различным "неохваченным" уровням государственной вертикали. Подобная адаптация методологии представляет собой серьезную кропотливую работу. Параллельно с адаптацией методологии встает задача по совершенствованию информационных моделей и программно-технологических средств, используемых для имплементации адаптированных информационных моделей в единую технологическую платформу.

Процесс развития технологической платформы в ходе построения вертикальной интегрирующей инфраструктуры может осуществляться как сверху вниз (от федерального уровня к уровню регионов), так и снизу вверх (от уровня регионов к федеральному уровню).

С точки зрения федеральных министерств и ведомств наиболее оптимальным представляется первый подход, поскольку он позволяет проводить комплексную оценку ситуации применительно к решаемой задаче, а затем по мере необходимости осуществлять нисходящую детализацию оценок. Такой подход позволяет не упустить важных моментов при решении расчетно-аналитических задач федерального значения, при этом существенно сокращает временные издержки на разработку и внедрение комплексной методологии детализированных до нижних уровней расчетов. И хотя с точки зрения субъектов РФ оптимальным представляется второй подход, он идет в разрез с требованиями стандартизации и унификации применительно к задачам государственного управления и планирования, может создать существенные трудности последующей интеграции информационных систем федерального и регионального уровней и значительно усложнить решение такой задачи государственного значения, как реализация концепции электронного правительства.

Очевидно, что при проектировании и создании вертикальной интегрирующей инфраструктуры необходимо отталкиваться от существующей системы подготовки и принятия решений в сфере государственного управления, но в то же время важно постараться нивелировать ряд недостатков этой системы, перечисленных ниже:

- нечеткое распределение ответственности: за одну задачу могут отвечать несколько ведомств федерального и регионального уровня, при этом степень ответственности существенно размывается, а расход ресурсов на обеспечение процесса выработки решений возрастает;
- недостаточная степень согласованности при взаимодействии субъектов системы в процессе решения общих задач: федеральные и региональные ведомства используют свои собственные инструменты (методологию, информационные системы), в результате принятие отраслевых решений значительно усложняется многочисленными этапами согласований, и во многих случаях решения в области финансирования социально-экономических отраслей строятся на остаточном принципе;
- отсутствие действенных инструментов (как методических, так и информационных) сопровождения принимаемых решений: на данный момент сбор информации из регионов на федеральном уровне по ряду отраслей (например, здравоохранение и образование) осуществляется с существенным запозданием; собранная информация не всегда достоверна и в нужной степени детализирована, что означает фактическую невозможность оперативных воздействий.

## Выводы

Государственная система не способна "лечить себя самостоятельно". Это подтверждено тем фактом, что большинство серьезных научных исследований, необходимых для поддержки проведения реформ, как важнейшей функции государственного аппарата, проводится с привлечением сторонних специалистов, различных НИИ и научных школ при высших образовательных учреждениях. В то же время процессы сотрудничества государства с научным сообществом оставляют желать лучшего, поскольку результаты, получаемые в ходе сотрудничества, зачастую не обладают свойством преемственности и в большинстве случаев не имеют многократного применения. Научные разработки, осуществляемые по государственному заказу, в своем подавляющем большинстве не нацелены на создание практических инструментов — информационных систем.

Развитие технологий в области компьютерной индустрии не стоит на месте, различное утилитарное программное обеспечение регулярно разрабатывается и внедряется в государственных ведомствах. Однако достаточно серьезно ощущается разрыв в кооперации между представителями индустрии информационных технологий и научным сообществом.

Многие расчетные задачи в государственных учреждениях решаются на компьютере с использованием простейших офисных программ, причем с низким коэффициентом использования полезных возможностей этих программ. Поэтому, когда речь заходит о таких процессах, как моделирование условий проведения отраслевых реформ, многовариантное планирование возможных последствий принимаемых решений, полноценный мониторинг (охватывающий процессы всех уровней вертикали государственного управления от Правительства до учреждений конкретных регионов), то возникает насущная необходимость в создании эффективных информационных инструментов — программно-аппаратных комплексов, способных решать задачи такого уровня.

В статье предложен системный подход к созданию информационного обеспечения для поддержки комплексных задач государственного управления, связанных с разработкой и сопровождением решений при планировании и проведении реформ. Успешная практическая реализация этого подхода во многом зависит от разработки методологии, регламентирующей коллективную работу распределенных как по вертикали, так и по горизонтали ведомств и экспертных групп, поскольку очевидно,

что без четких регламентов, согласованных всеми участниками процесса, коэффициент полезного действия совместной работы с научно-практическим инструментарием может быть сведен к нулю.

Предложенный подход к организации коллективной работы экспертов в рамках решения комплексных задач государственного управления задает ориентир на создание информационного инструментария постоянного использования, который будет основан на постоянном развитии в контексте текущих и перспективных задач государства, направленном на совершенствование получаемых результатов для достижения новых качественных показателей государственного развития.

#### Список литературы

1. **Винер Н.** Кибернетика. М.: Сов. радио, 1968.
2. **Маркова О. П., Донин В. М., Лунин Ю. В., Карнаух Д. И.** Новая технология организации работы экспертов // Врачи и информационные технологии. 2004. № 10.
3. **Богданов Ю. М., Карнаух Д. И., Донин В. М.** и др. Управление экономикой на основе знаний: новая компьютерная технология корпоративной подготовки управленческих решений // Менеджер здравоохранения. 2006. № 7.
4. **Янг С.** Системное управление организацией / Пер. с англ. М.: Сов. радио, 1972.
5. **Рассел Д. А.** Управление высокотехнологичными программами и проектами. М.: ДМК Пресс, 2006.

## С 2011 г. в нашем журнале будет выходить журнал в журнале — "НЕЙРОСЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

Журнал "Нейросетевые технологии" посвящается важному разделу современной науки — одному из разделов информационных технологий, связанному с применением в вычислительных системах такого понятия, как нейронные сети. Нейросетевые технологии включают в себя следующие разделы:

- ◆ теория нейронных сетей;
- ◆ нейроматематика;
- ◆ нейроуправление;
- ◆ нейрочипы.

Журнал ориентирован на студентов, преподавателей и научных работников в области супервычислений, параллельных алгоритмов.

УДК 519.6

**С. В. Волкоморов**, аспирант,  
**А. П. Карпенко**, д-р физ.-мат. наук, проф.,  
**В. А. Мартынюк**, канд. техн. наук, доц.,  
МГТУ им. Н. Э. Баумана,  
e-mail: mart@rk6.bmstu.ru

## Анализ кинематики параллельных механизмов средствами системы автоматизированного проектирования САТИА\*

*Рассматриваются задача анализа кинематики и анимации механизмов с помощью современной системы автоматизированного проектирования САТИА. Приводятся результаты исследования кинематики некоторых типов параллельных механизмов как элементов робота-манипулятора типа "хобот".*

**Ключевые слова:** параллельный механизм, робот-манипулятор типа "хобот", система автоматизированного проектирования САТИА

### Введение

Работа выполнена в контексте исследований по разработке научных основ роботов-манипуляторов типа "хобот", построенных с использованием параллельных механизмов [1, 2]. Применение таких роботов может оказаться высокоэффективным, например, в машиностроении при механической обработке внутренних поверхностей полостей сложной формы, в технологии катастроф при организации доступа к внутренним объемам разрушенных зданий и сооружений и т. д.

Обычно для решения перечисленных и других аналогичных задач применяют традиционные манипуляторы, представляющие собой последовательное соединение звеньев, не использующих механизмы с параллельной кинематикой. Указанные манипуляторы имеют следующие недостатки: низкий показатель грузоподъемности; низкая точность позиционирования рабочего органа; относительно низкая жесткость [3].

\* Работа выполнена в рамках аналитической ведомственной целевой программы "Развитие потенциала высшей школы (2009–2010 годы)", проект 2.1.2/1509.

Одним из эффективных способов преодоления недостатков традиционных манипуляторов является использование в качестве их звеньев механизмов с параллельной кинематикой. Манипуляторы параллельной кинематики также не свободны от недостатков. Например, возможны потеря управляемости в некоторых конфигурациях таких манипуляторов, интерференции отдельных кинематических цепей манипулятора (их соприкосновения). В этой связи актуальными при проектировании параллельных манипуляторов являются задачи предварительного анализа их кинематики и анимации.

Указанные задачи являются актуальными и в более широком контексте. Дело в том, что современные САПР дают проектировщику возможность предъявить заказчику анимированный виртуальный макет изделия в ситуации, когда физического макета или промышленного образца проектируемого изделия еще не существует. Это позволяет выполнить предварительный анализ кинематики изделия, избежать многих проектных ошибок и, в результате, существенно ускорить процесс проектирования.

Первая задача, которую необходимо решить при выборе программного инструмента для анализа кинематики и трехмерной анимации исследуемых параллельных механизмов, состоит в определении класса используемой системы. В силу значительной кинематической сложности, даже односекционных параллельных механизмов, выбор возможен только между графическими системами среднего класса типа Inventor, Solid Works, Solid Edge, КОМПАС и "тяжелыми" системами типа САТИА, UNIGRAPHICS, Pro-Engineer.

В отличие от большинства САПР среднего класса анимация механизмов в "тяжелых" САПР осуществляется не с помощью вариации ограничений, наложенных сборкой, а путем моделирования разрешенных движений в кинематических парах исследуемого механизма. Важно также, что функции кинематического анализа реализованы непосредственно в самой "тяжелой" САПР, а не в ее некотором дополнительном приложении. Вторым аргументом в пользу использования для анимации параллельных механизмов "тяжелых" САПР является большая надежность этих систем, а также наличие специальных средств для работы с большими сборками, примером которых и является многосекционный манипулятор типа "хобот".

Таким образом, для трехмерной визуализации и анимации рассматриваемых параллельных механизмов целесообразно использовать графическую систему "тяжелого" класса. Собственно выбор одной из систем CATIA, UNIGRAPHICS, Pro-Engineer не является принципиальным. В данной работе в качестве такой системы использована система CATIA (Computer Aided Three Dimensional Application).

Рассматриваются четыре варианта отдельной секции многосекционного робота-манипулятора типа "хобот": параллельный механизм "трипод 2" с двумя степенями свободы, построенный на основе трипода типа 3-UPS; аналогичный механизм "трипод 3" с тремя степенями свободы; параллельный механизм "гексапод 4" с четырьмя степенями свободы, построенный на основе гексапода типа 6-UPS; аналогичный механизм "гексапод 6" с шестью степенями свободы [1, 2].

В разделе 1 работы дан краткий обзор необходимых средств систем CATIA [4]. В разделе 2 приведена методика анализа кинематики и анимации параллельного механизма типа трипод 2. В разделах 3, 4 и 5 рассмотрены трипод, гексапод 4 и гексапод 6, соответственно.

### 1. Используемые средства системы CATIA

Общий перечень кинематических пар, которые могут быть использованы при анализе кинематики механизмов в системе CATIA достаточно широк. На рис. 1 (см. вторую сторону обложки) представлены те из них, которые использованы в работе. В кинематической паре *R* возможно только вращательное движение одной детали относительно другой; в паре *P* — взаимное продольное перемещение одной детали относительно другой; в паре *C* — как взаимное вращательное, так и продольное (вдоль общей оси вращения) перемещения деталей друг относительно друга; в паре *S* — вращения одной детали относительно другой вокруг трех ортогональных осей.

Для каждой из рассмотренных кинематических пар (за исключением сферической пары) проектировщик может указать перемещения, которые являются свободными, и перемещения, которые могут осуществляться только под действием внешних сил (приводов). Такие перемещения называются "принужденными". Например, чтобы указать, что в цилиндрическом шарнире вращательное движение является свободным, а движение вдоль продольной оси принужденным, в соответствующем диалоговом окне системы CATIA (рис. 2) нужно включить переключатель Length driven и не включать переключатель Angle driven. Заметим, что всякий перевод возможного свободного перемещения той или иной кинематической пары в ранг

принужденного перемещения, сокращает число степеней свободы анализируемого механизма.

Перед анализом кинематики механизма система CATIA предварительно автоматически определяет число подвижностей этого механизма, что может быть сделано, например, по известной формуле Малышева—Сомова

$$W = \lambda n - \sum_{i=1}^{\lambda-1} (\lambda - i)p_i, \quad (1)$$

где  $\lambda = 6$  — число степеней свободы твердого тела в пространстве;  $n$  — число подвижных звеньев механизма;  $p_i$  — число подвижных кинематических пар, имеющих степень подвижности  $i$  [5]. Результаты предварительного анализа механизма представляются в диалоговом окне, пример которого приведен на рис. 3. Содержимое этого окна показывает следующее:

- анимация механизма возможна (Mechanism can be simulated — Yes);
- число использованных кинематических пар равно 7 (Number of joints: 7);
- число принужденных перемещений равно 2 (Number of commands: 2);
- число подвижностей механизма без учета принужденных перемещений равно 2 (Degrees of freedom without command(s): 2);
- число подвижностей механизма с учетом принужденных перемещений равно 0 (Degrees of freedom with command(s): 0).

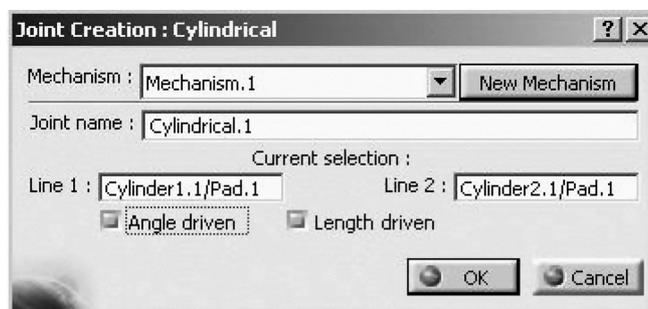


Рис. 2. CATIA-диалоговое окно, соответствующее цилиндрической кинематической паре

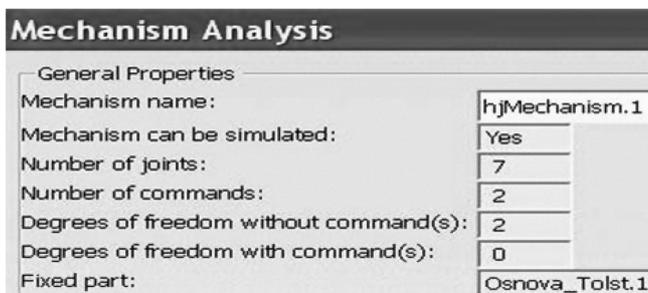


Рис. 3. Пример результатов предварительного анализа механизма в системе CATIA

Заметим, что кинематический анализ механизма средствами системы САТИА возможен только в том случае, когда число подвижностей механизма с учетом принужденных перемещений равно нулю.

Во время проведения кинематического анализа система САТИА предоставляет возможность определить перемещения заданной ("измерительной") точки механизма, линейные и угловые скорости этого перемещения и другие параметры движения.

## 2. Трипод 2

Параллельный механизм типа "трипод 2" состоит из неподвижного основания  $A_1A_2A_3$ , подвижной платформы  $B_1B_2B_3$ , штанг  $A_1B_1$ ,  $A_2B_2$ ,  $A_3B_3$ , каждая из которых состоит из двух полуштанг и призматической кинематической пары 1, 2, 3, а также из центральной неподвижной штанги  $AB$  (рис. 4). Штанги  $A_1B_1$ ,  $A_2B_2$ ,  $A_3B_3$  прикреплены к основанию кинематическими парами типа "кардан" (две степени свободы), а к платформе — сферическими шарнирами. Центральная штанга в точке  $B$  также прикреплена к платформе карданной кинематической парой.

По формуле (1) для этого механизма имеем:  $n = 7$ ;  $p_1 = 3$  (призматические кинематические пары);  $p_2 = 4$  (кинематические пары типа кардан);  $p_3 = 3$  (сферические шарниры). Таким образом, число степеней подвижности механизма

$$W = 6 \times 7 - 5 \times 3 - 4 \times 4 - 3 \times 3 = 2,$$

т. е. трипод 2 имеет две степени свободы (вращательных).

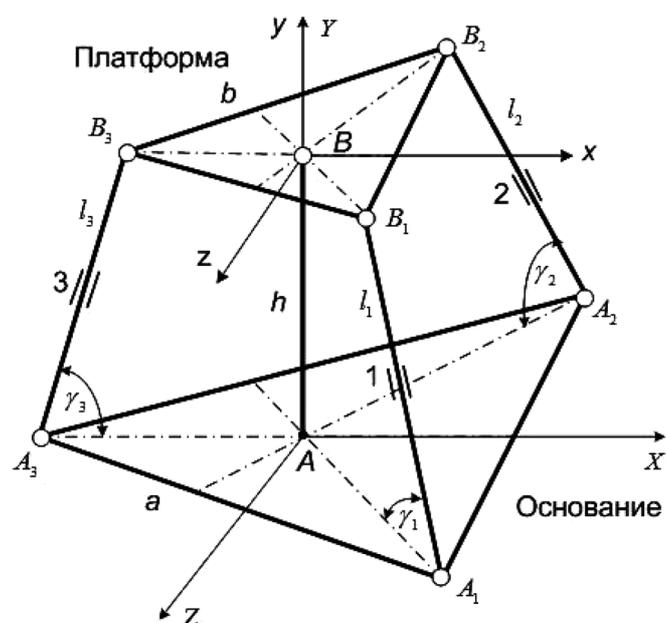


Рис. 4. Схема трипода 2

Положим, что точки  $B_1, B_2, B_3$  образуют правильный треугольник со стороной  $b$  и с центром в точке  $B$ . Пусть точки  $A_1, A_2, A_3$  также образуют правильный треугольник со стороной  $a$  и с центром в точке  $A$ . Штанги  $A_iB_i$  имеют длины  $l_i$  и наклонены к плоскости основания под углами  $\gamma_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ . Штанга  $AB$  имеет длину  $h$  и перпендикулярна основанию. Обозначим  $R = \frac{a\sqrt{3}}{3}$ ,  $r = \frac{b\sqrt{3}}{3}$ .

Примем следующие размеры механизма:  $r = 94,971$  мм;  $R = 151,133$  мм;  $l_i^{\min} = 175,120$  мм;

$l_i^{\max} = 263,368$  мм;  $i = 1, 2, 3$ . Пусть в состоянии, когда платформа параллельна основанию, длины штанг равны  $l_i^0 = l^0 = 182,000$  мм, так что

$h = \sqrt{(l^0)^2 - (R - r)^2} = 174$  мм. САТИА-модель этого механизма представлена на рис. 5 (см. вторую сторону обложки).

Для исследования кинематики приведенной модели трипода 2 средствами системы САТИА сначала решим для этого трипода прямую задачу кинематики аналитически. С этой целью введем в рассмотрение систему координат  $AXYZ$  с центром в точке  $A$ , ось  $AX$  системы направлена по вектору  $A_3A$ , ось  $AY$  — вертикально вверх (от основания к платформе), а ось  $AZ$  дополняет систему до правой тройки. Аналогично свяжем с платформой систему координат  $Bxyz$  (см. рис. 4). Положение платформы относительно основания зададим углами Эйлера  $\varphi_1, \varphi_2$  [1].

Отметим, что для правильной интерпретации результатов экспериментов с приведенной САТИА-моделью, необходимо следующим образом соотносить рис. 4 и 5: в модели, представленной на рис. 5, ось  $Bz$  проходит между штангами 1, 3 и соответствует конструктивной поперечной оси, вокруг которой поворачивается верхняя платформа.

В сделанных предположениях и обозначениях обобщенная координата  $l_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ , как функция углов  $\varphi_1, \varphi_2$  определяется выражением

$$l_i = l_i(\varphi_1, \varphi_2) = \sqrt{\sum_{j=1,2,3} (A_{i,j} - [B_{i,j}])^2}. \quad (2)$$

Здесь одну из величин  $l_1, l_2, l_3$  следует трактовать как избыточную обобщенную координату [1]. Другими словами, из числа призматических кинематических пар 1, 2, 3 (см. рис. 4) только две пары следует считать активными (пусть это будут пары 1, 3), а их соответствующие движения — принужденными.

Кроме величин, введенных выше, в формуле (2) использованы следующие обозначения:  $A_{i,j}$ ,

$i, j \in [1:3]$  — координаты точки  $A_i$  в системе координат  $AXYZ$ ; аналогично,  $B_{i,j}$  — координаты точки  $B_i$  в системе координат  $Bxyz$ ;

$$\begin{pmatrix} [B_{i,1}] \\ [B_{i,2}] \\ [B_{i,3}] \\ 1 \end{pmatrix} = T(\varphi_1, \varphi_2) \begin{pmatrix} B_{i,1} \\ B_{i,2} \\ B_{i,3} \\ 1 \end{pmatrix}; \quad (3)$$

$$T = T(\varphi_1, \varphi_2) = \begin{bmatrix} \cos \varphi_1 & -\sin \varphi_1 & 0 & 0 \\ \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 & \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 & -\sin \varphi_2 & h \\ \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 & \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 & \cos \varphi_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

( $4 \times 4$ ) матриц однородных преобразований [6].

Легко видеть, что в принятых выше соглашениях координаты точек  $A_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ , в системе координат  $AXYZ$  равны

$$A_1 = R\left(\frac{1}{2}, 0, \frac{\sqrt{3}}{2}\right)^T; A_2 = R\left(\frac{1}{2}, 0, -\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^T; \\ A_3 = R(-1, 0, 0)^T,$$

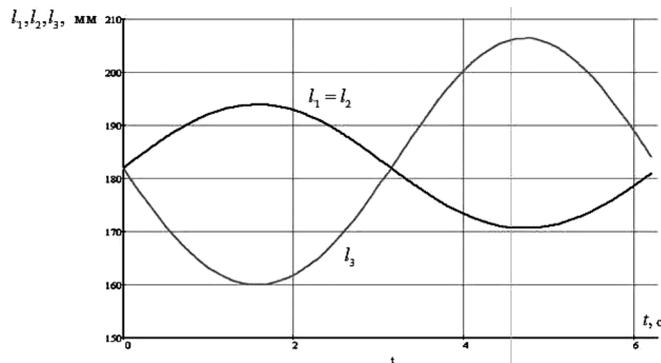


Рис. 6. Изменения длин штанг  $l_1, l_2, l_3$ , обеспечивающие закон (4) движения платформы трипода 2

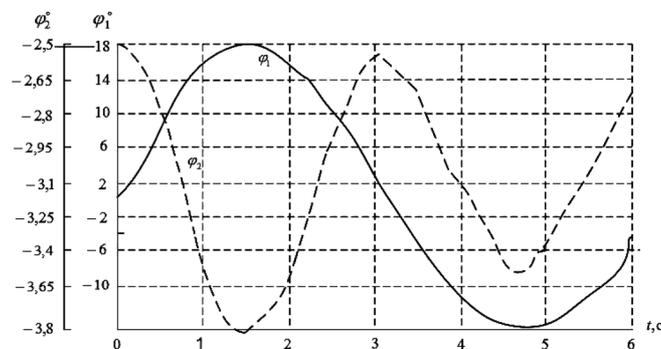


Рис. 7. Результаты САТИА-анализа кинематики трипода 2

а координаты точек  $B_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ , в системе координат  $Bxyz$  определяются по аналогичным формулам с заменой  $R$  на  $r$ .

Выполним средствами системы САТИА исследование кинематики механизма, модель которого представлена на рис. 5, при законе движения платформы

$$\varphi_1(t) = \frac{\pi}{12} \sin t, \quad \varphi_2(t) = 0, \quad (4)$$

т. е. при "плоском" гармоническом колебании ее с постоянной угловой скоростью вокруг оси  $Bz$ . Как следует из выражения (2), такое движение платформы обеспечивают изменения длин штанг  $l_1, l_2, l_3$ , приведенные на рис. 6. Некоторые результаты исследования показаны на рис. 7.

Заметим, что, в отличие от (4), угол  $\varphi_2(t)$  на рис. 7 отличен от нуля и изменяется в интервале, приблизительно равном  $[-2,5^\circ \dots -3,8^\circ]$ . Это объясняется следующими причинами: конструктивными погрешностями в модели механизма; погрешностями начального положения платформы; погрешностями цифрового моделирования. Несимметричность графика функции  $\varphi_1(t)$  относительно прямой  $\varphi_1(t) = 0$  также объясняется указанными причинами.

### 3. Трипод 3

Данный параллельный механизм отличается от механизма, представленного на рис. 4, 5, тем, что в нем центральная штанга  $AB$ , аналогично штангам  $A_1B_1, A_2B_2, A_3B_3$ , состоит из двух полуштанг и призматической кинематической пары.

Из формулы (1) следует, что в этом случае  $n = 8$ ,  $p_1 = 4$  (призматические кинематические пары),  $p_2 = 4$  (пары типа кардан),  $p_3 = 3$  (сферические шарниры). Таким образом, число степеней подвижности трипода 3

$$W = 6 \times 8 - 5 \times 4 - 4 \times 4 - 3 \times 3 = 3,$$

т. е. механизм имеет три подвижности (две вращательные и одну поступательную).

Примем размеры трипода 3, близкими к размерам трипода 2:  $r = 94,971$  мм;  $R = 151,133$  мм;  $l_i^{\min} = 175,120$  мм;  $l_i^{\max} = 263,368$  мм;  $l_i = l^0 = 207,000$  мм;  $h^0 = \sqrt{(l^0)^2 - (R-r)^2} = 199,240$  мм;  $i = 1, 2, 3$ . САТИА-модель этого механизма представлена на рис. 8 (см. вторую сторону обложки).

В обозначениях и допущениях п. 2 для обобщенной координаты  $l_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ , как функции

углов  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  и расстояния  $h$  имеет место следующая формула, аналогичная формуле (2):

$$l_i = l_i(h, \varphi_1, \varphi_2) = \sqrt{\sum_{j=1,2,3} (A_{i,j} - [B_{i,j}])^2}. \quad (5)$$

Отметим, что в этом случае среди обобщенных координат  $l_i$  отсутствуют избыточные обобщенные координаты.

Также рассмотрим "плоское" гармоническое колебание платформы с постоянной угловой скоростью:

$$Y_B(t) = \text{const} = h^0; \varphi_1(t) = \frac{\pi}{12} \sin t; \varphi_2(t) = 0. \quad (6)$$

Средствами системы САТИА выполнен анализ кинематики модели механизма, представленной на рис. 8. В качестве законов изменения длин штанг  $l_1, l_2, l_3$  были приняты законы, вытекающие из выражений (5), (6).

График функции  $\varphi_1(t)$  в этом случае близок к графику, представленному на рис. 7. Угол  $\varphi_2$ , в отличие от трипода 2, здесь изменяется в диапазоне, ширина которого не превышает  $0,08^\circ$ . Эффект объясняется тем, что параллельность платформы основанию в момент времени  $t = 0$  в рассматриваемом эксперименте была задана с большей точностью.

Кроме рассматриваемых углов  $\varphi_1, \varphi_2$  поворота платформы, интерес представляют также линейные перемещения концов штанг. В этой связи на рис. 9 приведены полученные в эксперименте перемещения точки  $B_3 = M$  (измерительной точки) в проекции на оси координат  $Ax, Ay$ . Отметим значительное отклонение характера зависимости  $X_M(t)$  от ожидаемого. Причины такого поведения функции  $X_M(t)$  перечислены в разд. 2.

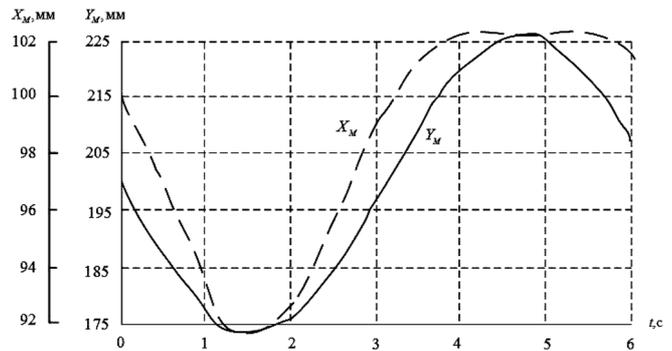


Рис. 9. Результаты САТИА-анализа кинематики трипода 3



Рис. 10. Схема гексапода 4

#### 4. Гексапод 4

Механизм состоит из неподвижного основания  $A_1A_2A_3A_4A_5A_6$ , подвижной платформы  $B_1B_2B_3B_4B_5B_6$ , штанг  $A_iB_i, i \in [1;6]$ , каждая из которых состоит из двух полуштанг и призматической кинематической пары 1–6, а также из центральной неподвижной штанги  $AB$  (рис. 10).

Как вытекает из формулы (1), для данного механизма  $n = 14, p_1 = 7$  (призматические кинематические пары),  $p_2 = 6$  (шарниры типа кардан),  $p_3 = 7$  (сферические шарниры). Итого,

$$W = 6 \times 14 - 5 \times 7 - 4 \times 6 - 3 \times 7 = 4,$$

т. е. платформа гексапода 4 имеет четыре подвижности (три вращательных и одну поступательную).

Положим, что точки  $A_i, i \in [1;6]$ , расположены на окружности радиуса  $R$  с центром в точке  $A$  (рис. 11), а точки  $B_i, i \in [1;6]$ , аналогично, — на окружности, имеющей радиус  $r$  и центр в точке  $B$ .

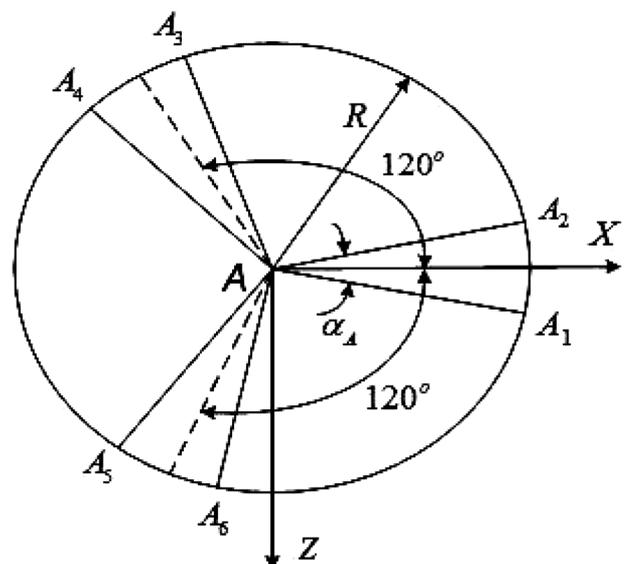


Рис. 11. Геометрия основания

Штанга стержня  $A_i B_i$  имеет длину  $l_i$  и наклонена к плоскости основания под углами  $\gamma_i$ . Опорная штанга  $AB$  имеет длину  $h$  и перпендикулярна основанию.

Примем следующие размеры механизма:  $r = 95,00$  мм;  $R = 252,00$  мм;  $l_i^{\min} = 173,00$  мм;  $l_i^{\max} = 268,00$  мм;  $l_i^0 = l^0 = 204,00$  мм;  $h^0 = 256,09$  мм;  $A_i A_{i+1} = B_i B_{i+1} = 58,00$  мм;  $i \in [1:6]$ . Легко увидеть, что при этом  $\sin \frac{\alpha_A}{2} \approx 0,115$ ,  $\cos \frac{\alpha_A}{2} \approx 0,993$ ;

$\sin \frac{\alpha_B}{2} \approx 0,305$ ,  $\cos \frac{\alpha_B}{2} \approx 0,952$ . САТИА-модель этого

механизма представлена на рис. 12 (см. вторую сторону обложки).

Обобщенная координата  $l_i$ ,  $i \in [1:6]$ , как функция расстояния  $h = Y_B$  и углов Эйлера  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$  в рассматриваемом случае равна

$$l_i = l_i(Y_B, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) = \sqrt{\sum_{j \in [1:6]} (A_{i,j} - [B_{i,j}])^2}, \quad (7)$$

где

$$\begin{pmatrix} [B_{i,1}] \\ [B_{i,2}] \\ [B_{i,3}] \\ 1 \end{pmatrix} = T(h, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) \begin{pmatrix} B_{i,1} \\ B_{i,2} \\ B_{i,3} \\ 1 \end{pmatrix}_i;$$

$T[h, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3]$  — матрица однородных преобразований [2].

Легко видеть, что координаты точек  $A_i = (A_{i,1}, A_{i,2}, A_{i,3})^T$  в формуле (7) определяются выражениями

$$A_1 = R\left(\cos \frac{\alpha_A}{2}, 0, \sin \frac{\alpha_A}{2}\right)^T;$$

$$A_2 = R\left(\cos \frac{\alpha_A}{2}, 0, -\sin \frac{\alpha_A}{2}\right)^T;$$

$$A_3 = R\left(-\cos\left(60^\circ + \frac{\alpha_A}{2}\right), 0, -\sin\left(60^\circ + \frac{\alpha_A}{2}\right)\right)^T;$$

$$A_4 = R\left(-\cos\left(60^\circ - \frac{\alpha_A}{2}\right), 0, -\sin\left(60^\circ - \frac{\alpha_A}{2}\right)\right)^T;$$

$$A_5 = R\left(-\cos\left(60^\circ - \frac{\alpha_A}{2}\right), 0, \sin\left(60^\circ - \frac{\alpha_A}{2}\right)\right)^T;$$

$$A_6 = R\left(-\cos\left(60^\circ + \frac{\alpha_A}{2}\right), 0, \sin\left(60^\circ + \frac{\alpha_A}{2}\right)\right)^T.$$

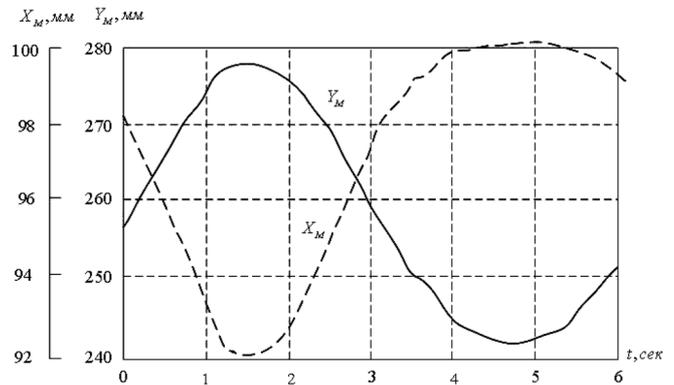


Рис. 13. Результаты САТИА-анализа кинематики гексапода 4

Координаты точек  $B_i = (B_{i,1}, B_{i,2}, B_{i,3})^T$  определяются аналогичными выражениями с заменой величины  $\alpha_A$  на величину  $\alpha_B$ ;  $i \in [1:6]$ .

В формуле (7) любые две из величин  $l_i$ ,  $i \in [1:6]$ , следует трактовать как избыточные обобщенные координаты [1], т. е. из числа призматических кинематических пар  $I-6$  (см. рис. 10) только четыре пары следует полагать активными (пусть это будут пары  $I-4$ ), а соответствующие движения принужденными.

Рассмотрим, как и ранее, "плоское" гармоническое колебание платформы с постоянной угловой скоростью:

$$Y_B(t) = \text{const} = h^0;$$

$$\varphi_1(t) = \frac{\pi}{12} \sin t; \quad \varphi_2(t) = 0; \quad \varphi_3(t) = 0. \quad (8)$$

На рис. 13 представлены некоторые результаты анализа кинематики гексапода 4, выполненного системой САТИА с использованием модели механизма, представленной на рис. 12. Использовались законы изменения длин штанг  $l_i$ ,  $i \in [1:6]$ , вытекающие из выражений (7), (8). В качестве "измерительной" рассмотрена точка  $M$ , имеющая в системе координат  $Oxuz$  координаты  $(r, 0, 0)$ , т. е. расположенная на оси  $Ox$  на расстоянии  $r$  от центра платформы.

## 5. Гексапод 6

Данный параллельный механизм (платформа Гоффа—Стюарта) отличается от механизма, рассмотренного в разд. 4, отсутствием центральной штанги  $AB$  (см. рис. 10).

Из формулы (1) следует, что в данном случае  $n = 13$ ,  $p_1 = 6$  (призматические кинематические пары),  $p_2 = 6$  (универсальные шарниры),  $p_3 = 6$  (сферические шарниры). Итого,

$$W = 6 \times 13 - 5 \times 6 - 4 \times 6 - 3 \times 6 = 6,$$

т. е. гексапод 6 имеет 6 степеней свободы (3 вращательных и 3 поступательных).

В соглашениях разд. 4 САТИА-модель рассматриваемого механизма имеет вид, представленный на рис. 14 (см. вторую сторону обложки).

Аналогично принятому в разд. 4, обобщенная координата  $l_i$ ,  $i \in [1:6]$ , как функция координат центра платформы  $X_B, Y_B, Z_B$  и ее углов Эйлера  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ , для гексапода 6 равна [2]

$$l_i = l_i(X_B, Y_B, Z_B, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) = \sqrt{\sum_{j \in [1:6]} (A_{i,j} - [B_{i,j}])^2}. \quad (9)$$

В формуле (9) величины  $[B_{i,j}]$ ,  $i, j = 1, 2, 3$ , определяются выражением

$$\begin{pmatrix} [B_{i,1}] \\ [B_{i,2}] \\ [B_{i,3}] \\ 1 \end{pmatrix} = T(X_B, Y_B, Z_B, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) \begin{pmatrix} B_{i,1} \\ B_{i,2} \\ B_{i,3} \\ 1 \end{pmatrix}_i,$$

где  $T = T(X_B, Y_B, Z_B, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3)$  —  $(4 \times 4)$ -матрицы однородных преобразований.

Также рассмотрим "плоское" гармоническое колебание платформы с постоянной угловой скоростью:

$$\begin{aligned} X_B(t) &= 0; Y_B(t) = \text{const} = h^0; Z_B(t) = 0; \\ \varphi_1(t) &= \frac{\pi}{12} \sin t; \varphi_2(t) = 0; \varphi_3(t) = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Средствами системы САТИА выполнен анализ кинематики модели гексапода 6, представленной на рис. 14. В качестве законов изменения длин штанг  $l_i$ ,  $i \in [1:6]$ , были приняты законы, вытекающие из выражения (9), (10). В качестве "измерительной" рассмотрена та же точка  $M(r, 0, 0)$ .

Графики функций  $X_M(t)$ ,  $Y_M(t)$  в этом случае близки к аналогичным графикам, представленным на рис. 13. Вследствие причин, указанных в разд. 2, координата  $Z_M$  здесь, в отличие от гексапода 4, изменяется в диапазоне  $\sim [-4,5; -11,5]$  мм.

## Заключение

В работе приведена методика анализа кинематики и анимации механизмов средствами современной "тяжелой" системы автоматизированного проектирования САТИА. Выполнен анализ кинематики четырех типов механизмов параллельной кинематики: параллельного механизма с двумя степенями свободы, построенного на основе трипода типа 3-UPS; аналогичного механизма с тремя степенями свободы; параллельного механизма с четырьмя степенями свободы, построенного на основе гексапода типа 6-UPS; аналогичного механизма с шестью степенями свободы.

Результаты работы представляют самостоятельный интерес, а также предполагаются к использованию при анализе кинематики и анимации многосекционных роботов-манипуляторов типа "хобот", построенных на основе рассмотренных параллельных механизмов.

*Авторы благодарят Ю. Т. Каганова за плодотворное обсуждение результатов работы и ценные советы.*

## Список литературы

1. **Каганов Ю. Т., Карпенко А. П.** Математическое моделирование кинематики и динамики робота-манипулятора типа "хобот". 1. Математические модели секции манипулятора, как механизма параллельной кинематики типа "трипод" [Электронный ресурс] // Наука и образование: Электронное научно-техническое издание. 2009. № 10. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/133262.html>.
2. **Каганов Ю. Т., Карпенко А. П.** Математическое моделирование кинематики и динамики робота-манипулятора типа "хобот". 2. Математические модели секции манипулятора, как механизма параллельной кинематики типа "гексапод" [Электронный ресурс] // Наука и образование: Электронное научно-техническое издание. 2009. № 11. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/133731.html>.
3. **Merlet J. P.** Parallel Robots. Solid mechanics and its applications. Kluwer Academic Publishers, 2000. 394 p.
4. **Мартынюк В. А.** САТИА. Начало работы [Электронный ресурс]. URL: <http://bigor.bmstu.ru>.
5. **Аргоболевский И. И.** Теория механизмов и машин. М.: Наука, 1988. 640 с.
6. **Зенкевич С. Л., Ющенко А. С.** Основы управления манипуляционными роботами. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 480 с.

**А. А. Кузьмин**, аспирант,  
**И. П. Норенков**, д-р техн. наук, проф., зав. каф.,  
 МГТУ им. Н. Э. Баумана,  
 e-mail: inorenkov@gmail.com

## Автоматизация проектирования мнемосхем электрических сетей на диспетчерских щитах управления

*Рассмотрен подход к решению задачи автоматизированного проектирования мнемосхем диспетчерских щитов электрических сетей (МЭС) на основе критерия наглядности МЭС. Предложен метод решения задачи, сводящийся к поиску наидлиннейшей цепи в неографе.*  
**Ключевые слова:** электрическая сеть, диспетчерский щит, поиск пути в неографе, генетический алгоритм

### Введение

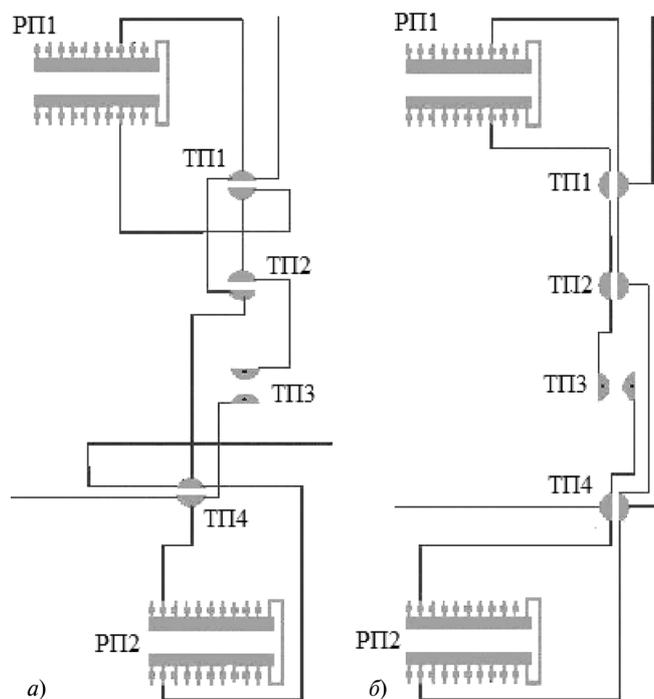
Оптимизация процессов оперативно-диспетчерского управления электрическими сетями тесно связана с задачей проектирования диспетчерских щитов. Диспетчерский щит (ДЩ) является основным инструментом диспетчера, позволяющим оперативно принимать решения в аварийных ситуациях, распределять активные и реактивные мощности между отдельными объектами электрической сети, регулировать потоки мощности по отдельным участкам сети, осуществлять коммутационные переключения [1]. Выполнение этих функций диспетчером в отсутствие наглядного отображения сети затруднительно или вообще невозможно. Поэтому задача проектирования оптимальных, с точки зрения наглядности, мнемосхем электрической сети (МЭС) является весьма актуальной. Поскольку электрические сети могут включать сотни—тысячи подстанций, требующих изображения на МЭС, целесообразно использовать средства автоматизированного проектирования МЭС.

В математическом обеспечении САПР наиболее близкими к задаче проектирования МЭС являются задачи размещения и трассировки, используемые в САПР радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) [2]. Однако критерии оптимальности при проектировании печатных плат и СБИС, с одной стороны, и МЭС, с другой стороны, не совпадают, что влечет за собой и различия в моделях и подходах к оптимизации РЭА и МЭС.

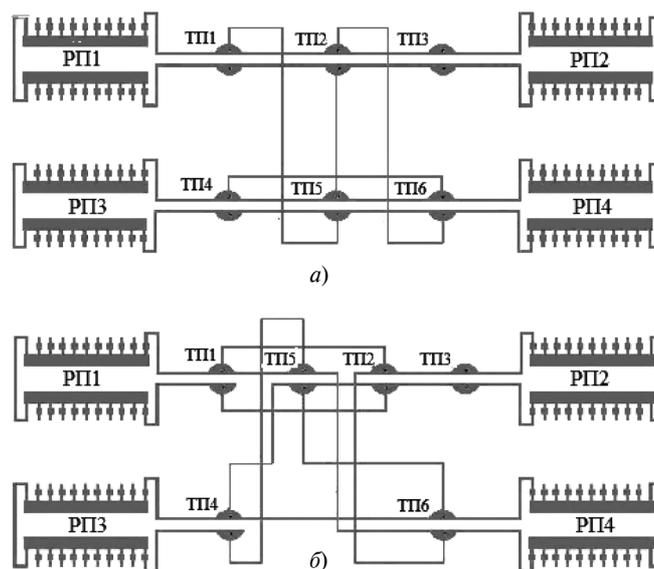
На рисунках ниже приведены фрагменты МЭС, иллюстрирующие влияние взаимного расположения элементов и связей между ними на нагляд-

ность МЭС (в качестве критерия наглядности для примера используется минимальное число пересечений линий связи).

На рис. 1, *а* изображен фрагмент МЭС, в котором элементы типа ТП (трансформаторная подстанция) ориентированы горизонтально, на рис. 1, *б* — тот же фрагмент МЭС с вертикально ориентиро-



**Рис. 1.** Фрагмент МЭС, иллюстрирующий влияние ориентации элементов на наглядность отображения



**Рис. 2.** Фрагмент МЭС, иллюстрирующий влияние размещения линий связи на наглядность отображения

ванными элементами типа ТП. При этом на фрагменте рис. 1, *a* имеется пять пересечений линий связи, которые существенно снижают наглядность схемы, на фрагменте рис. 1, *б* (более наглядном) пересечения линий связи отсутствуют. На рис. 2, *a*, *б* также приведены два отображения одного фрагмента МЭС с различным размещением линий связи. На фрагменте рис. 2, *a* (более наглядном) число пересечений линий равно 11, на фрагменте рис. 2, *б* — 17.

Решение задачи оптимального проектирования МЭС состоит из следующих этапов:

- 1) определение оптимальной с точки зрения объединения элементов в цепочки структуры МЭС;
- 2) размещение элементов МЭС в монтажном пространстве диспетчерского щита;
- 3) размещение линий связи элементов МЭС.

Статья посвящена решению наиболее важной из перечисленных задач — задачи определения оптимальной структуры МЭС, сводящейся к поиску цепочки элементов максимальной длины.

### Постановка задачи

Рассматривается построение схемы электрической сети (ЭС), удобной для восприятия человеком и для выполнения им необходимых операций по мониторингу ЭС.

Моделью схемы ЭС является граф  $G = (V, E)$ , где множество вершин  $V$  отображает узлы сети (ими являются изображения распределительных и трансформаторных подстанций), а множество ребер  $E$  — соединения между узлами.

Качество схемы определяется ее наглядностью, которая, в свою очередь, характеризуется числом пересечений линий и компактностью расположения смежных узлов. Исходя из опыта эксплуатации ЭС, компактность целесообразно оценивать длинами простых цепей, состоящих из ТП и соединяющих вершины распределительных подстанций (РП).

Цепочкой назовем множество вершин, инцидентных ребрам таких простых цепей, без концевых вершин, соответствующих РП. Расположение цепочек при укладке графа может быть вертикальным или горизонтальным.

Формулировка оптимизационной задачи

$$\begin{aligned} & \text{extr } F(S), \\ & S \in D, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $S = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$  — множество цепочек;  
 $C_k = \{v_{kj}\}$  —  $k$ -я цепочка;

$D = \{S \mid \bigcap_{k=1}^m C_k = \emptyset, \bigcup_{k=1}^m C_k \subset V\}$ . Целевая функция  $F(S)$  формулируется, исходя из требований минимизации числа цепочек и максимизации  $N = |\bigcup_{k=1}^m C_k|$  —

числа вершин, вошедших в цепочки. Например, можно принять  $F(S) = a_1 N/|V| + a_2/m$ , где  $a_1$  и  $a_2$  — весовые коэффициенты.

### Метод решения задачи

Подходы к решению задачи основаны на поиске оптимальной последовательности вершин графа в цепочках, соответствующей максимуму функции  $F(S)$ . Поскольку эта задача сводится к поиску наидлиннейшего пути в графе, то она является *NP*-трудной [3], и при реальных размерах задачи следует использовать приближенные методы. К их числу относится предлагаемый метод, основанный на ранжировании вершин. Алгоритм, реализующий метод, начинается с выбора исходной вершины  $P_{\text{исх}}$  (это начальная вершина, предшествующая искомой цепочке, — вершина одной из РП), которой присваивается ранг 0. Далее выбирается одна из смежных вершин, и она получает ранг 1. Процесс продолжается следующим образом: выбирается одна из вершин, смежных с уже проранжированной вершиной, имеющей минимальный ранг  $r$ , и ей присваивается ранг  $k + 1$ , если  $k$  — максимальный ранг среди смежных вершин. Процесс продолжается, пока остаются непроранжированные вершины. В результате получаем последовательность вершин, начиная с целевой  $P_{\text{ц}}$  (она соответствует второй РП) в порядке убывания рангов. Эту последовательность назовем начальной главной цепочкой.

Известно, что алгоритмы ранжирования непосредственно применимы к ациклическим графам. В общем случае необходимо учитывать наличие циклов. Так, в описанном выше алгоритме ранжирования циклы обнаруживаются по наличию у некоторой вершины  $X$  при присвоении ей ранга более одной уже проранжированной смежной вершины. Если при этом у  $X$  нет смежных непроранжированных вершин, то дальнейшая трассировка из вершины  $X$  невозможна. Очевидно, что  $X$  не принадлежит главной цепочке, но поскольку ее ранг выше, чем ранг у ближайшей к ней вершины, входящей в главную цепочку, то вершина  $X$  должна войти в оптимальное решение. Поэтому происходит трансформация главной цепочки путем замены в ее составе простой цепи между некоторыми вершинами  $y_1$  и  $y_2$  на другую простую цепь между теми же вершинами, включающую вершину  $X$  с максимальным рангом среди вершин вне главной цепочки. Заменяемую цепь назовем перемычкой, а заменяющую — вставкой. В общем случае различных вставок с вершиной  $X$  может быть много и нужно выбрать ту, которая максимально увеличивает длину главной цепочки, т. е. нужно

выбрать вставку с максимальным значением параметра  $\mathcal{E}$

$$\mathcal{E} = Q_{\text{ХВ}} - Q_{\text{ХП}},$$

где  $Q_{\text{ХВ}}$  и  $Q_{\text{ХП}}$  — число вершин соответственно во вставке и перемычке.

Серия трансформаций продолжается, пока имеются вставки с  $\mathcal{E} > 0$ .

**Пример.** На рис. 3 показаны результаты ранжирования фрагмента графа. Полученные первоначальные ранги вершин указаны рядом с вершинами.

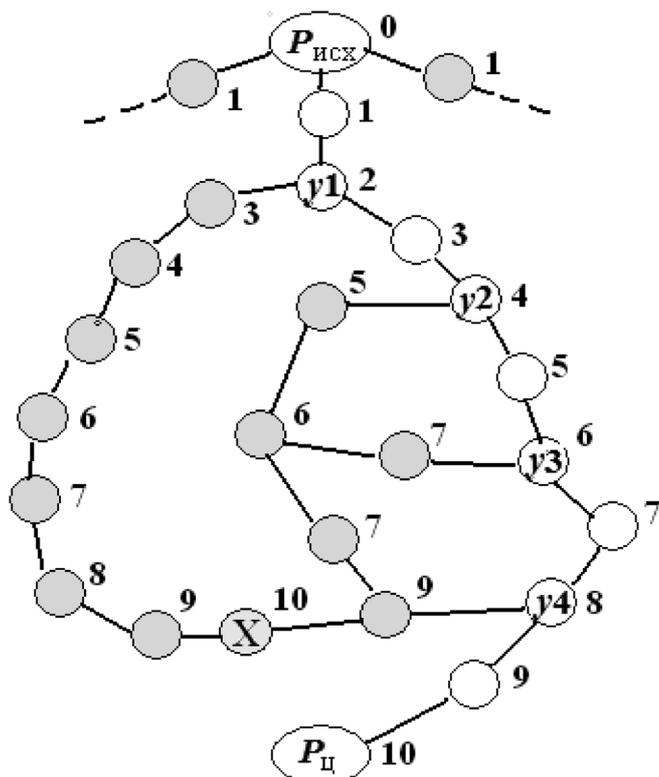


Рис. 3. Пример ранжирования графа

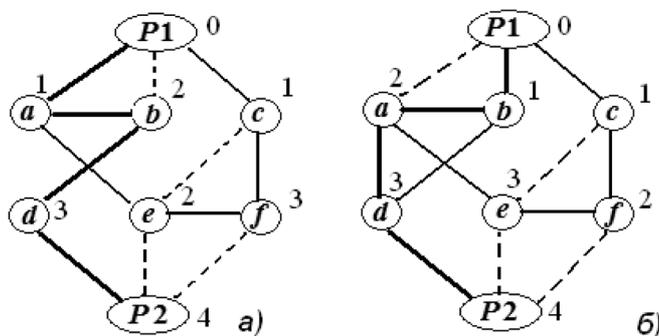


Рис. 4. Влияние порядка выбора вершин на формирование цепочек

Вершины начальной главной цепочки показаны светлыми кружками. Имеются три возможных вставки с вершиной  $X$  — это цепи между вершинами  $y1-y2$ ,  $y1-y3$  и  $y1-y4$  с значениями 11, 9 и 4 параметра  $\mathcal{E}$ . Оптимальной является вставка между вершинами  $y1$  и  $y2$ . После замены перемычки  $y1-y2$  на вставку ранг вершины  $P_{\text{ц}}$  увеличивается с 10 до 21.

Результат решения задачи зависит от того, какой была выбрана начальная главная цепочка. На рис. 4 представлены два варианта решения задачи, отличающиеся тем, в каком порядке проводилось ранжирование вершин. В варианте рис. 4, а присвоение ранга 1 вершинам  $a, b, c$  начиналось с вершины  $a$ , получилась начальная цепочка  $(a, b, d)$ , выделенная утолщенными линиями, замена участка  $(P1, a)$  на цепь  $(P1, c, f, e, a)$ , показанную тонкими сплошными линиями, привела к получению цепочки  $(c, f, e, a, b, d)$  с  $N = 6$ . В варианте рис. 4, б присвоение ранга 1 вершинам  $a, b, c$  начиналось с вершины  $b$ , получилась начальная цепочка  $(b, a, d)$ , замена перемычки  $(P1, b, a)$  на вставку  $(P1, c, f, e, a)$  привела к получению решения  $(c, f, e, a, d)$  с  $N = 5$ .

Таким образом, решение зависит от того, каковы приоритеты вершин при их ранжировании. То есть качество решения зависит от порядка ранжирования вершин, или, другими словами, от вектора  $Z = (z_1, z_2, \dots, z_n)$  приоритетов вершин. Априорно оптимальное значение  $Z$  установить невозможно, необходимо применять оптимизационные процедуры. Поэтому задача (1) трансформируется в задачу оптимизации с целевой функцией  $F_1(S, Z)$ , для решения которой следует применять генетические алгоритмы.

Для рассматриваемой задачи с двумя вершинами РП и с  $n$  вершинами ТП хромосома имеет  $n$  генов, значениями генов являются приоритеты ранжирования вершин. При генетическом поиске формируется массив  $M$  из вершин, смежных уже проранжированным вершинам. Пусть максимальный ранг проранжированных вершин есть  $k$ . Ранги  $k + 1$  вершинам в массиве  $M$  назначаются в соответствии с приоритетами вершин массива  $M$ , задаваемыми аллелями хромосомы. После обработки всех вершин в текущем массиве  $M$  его состав обновляется.

#### Список литературы

1. Пашков С. А. Методы идентификации сложных схем переключения // Труды II Международной конференции "Идентификация систем и задачи управления", 2003 г. URL: [http://www.avtb.ru/book\\_view.jsp?idn=005696&page=2424&format=html](http://www.avtb.ru/book_view.jsp?idn=005696&page=2424&format=html)
2. Автоматизация проектирования в радиоэлектронике: Справочник / Е. В. Авдеев, А. Т. Еремин, И. П. Норенков, М. И. Песков; Под ред. И. П. Норенкова. М.: Радио и связь, 1986. 368 с.
3. Гэри М., Джонсон Д. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи. М.: Мир, 1982. 416 с.

УДК 004.023

**А. С. Филиппова**, д-р техн. наук, доц.,  
e-mail: annamuh@mail.ru,

**В. Ю. Кузнецов**, канд. техн. наук, программист,  
**Э. Р. Басимов**, аспирант,  
Уфимский государственный авиационный  
технический университет

## Моделирование препроцессора в задачах оптимального размещения сенсоров в области мониторинга\*

*Рассматриваются задачи размещения технических устройств (сенсоров) в области мониторинга различной природы. Процесс проектирования размещения состоит из нескольких условно самостоятельных этапов. На первом этапе (препроцессинг) решается оптимизационная задача выбора минимального числа сенсоров и их расположения в области мониторинга при условии покрытия кругами или прямоугольниками всей области мониторинга. Приведенные ситуации сводятся к решению комбинаторной задачи покрытия кругами многосвязного ортогонального полигона.*

**Ключевые слова:** комбинаторная оптимизация, задачи покрытия, автоматизация проектирования, размещение газоанализаторов, карта вейпоинтов

### Введение

Многие проблемы оптимального размещения сенсоров в области мониторинга моделируются минимальным покрытием кругами многосвязных ортогональных полигонов (МОП). В качестве таковых будем рассматривать многоугольные области, содержащие односвязные ортогональные многоугольники с запретом на размещение внутри них центров кругов. Задачи покрытия МОП кругами находят широкое применение при решении прикладных проблем в различных отраслях деятельности человека. В астрономических исследованиях решается задача покрытия кругами плоскости; в химии применяется задача покрытия шарами трехмерной области; замощения дорог моделируются покрытиями плоскостей плитами различной

\*Работа поддержана грантом РФФИ 10-07-91330-ННИО\_а и грантом Президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ РФ НШ-65497.2010.9.

геометрической формы. Как правило, задачи покрытия являются первичными при решении более сложных технических проблем. Примером могут служить работы А. И. Ерзина, Ю. В. Шамардина и В. В. Залюбовского [1], посвященные построению беспроводной сенсорной сети.

Рассматривается задача покрытия ортогонального многоугольника одинаковыми фигурами произвольной формы с запрещенными участками (дефектами). Многоугольник называется ортогональным полигоном  $P$ , если все стороны в нем являются горизонтальными или вертикальными. Полигон  $P$  простой, если он не имеет запретных участков. Необходимо покрыть ортогональный полигон заданными фигурами так, чтобы их число было минимальным.

Задачи покрытия двумерных объектов (2D Bin Cover Problem, 2DBCP) представляют собой важный раздел комбинаторной оптимизации. Их кажущаяся близость к задачам упаковки (2D Bin Packing Problem 2DBP) позволила применять к решению 2DBCP и 2DBP сходные подходы. Однако их принадлежность к классу NP-трудных задач оказывается сомнительной. Решение задачи МОП должно удовлетворять следующему условию: каждая точка покрываемой области принадлежит одному или нескольким покрывающим объектам. Для оценки качества приближенного покрытия используется величина, именуемая "фактором аппроксимации" (Factor Approach, FA) [2]. Для задачи покрытия — это отношение числа покрывающих объектов в допустимом решении к числу покрывающих объектов в оптимальном решении. Некоторые прикладные задачи покрытия и методы их решения рассматривались в работе [3]. Здесь приводятся некоторые прикладные задачи покрытия и модель начального этапа их решения, препроцессинга.

### Задача покрытия кругами многосвязных ортогональных полигонов

Заданы многосвязный ортогональный многоугольник  $P$  и вещественное число  $r$ . Требуется покрыть  $P$  кругами радиуса  $r$  так, чтобы их число  $N$  достигло минимума.

Задача покрытия многоугольника легко сводится к более простой проблеме покрытия прямоугольной области с препятствиями (ПП). Для этого выделим четыре крайние в многоугольнике грани (рис. 1, см. третью сторону обложки). Граница мно-

гоугольника обозначена сплошной линией, крайние грани — жирными линиями. Через крайние грани проведем стороны описанного вокруг МОП прямоугольника, они обозначены штриховой линией. Исходный многоугольник обозначим  $P$ , ограниченную прямоугольником область —  $A$ . Дополнение  $A \setminus P$  будем трактовать как множество фиктивных препятствий. Далее будем работать с прямоугольной областью с препятствиями<sup>1</sup>. Заданные и фиктивные препятствия на рисунке заштрихованы.

На плоскости введем систему координат  $(OX, OY)$  таким образом, чтобы оси координат совпадали с нижней и левой сторонами покрываемой прямоугольной области  $A$ . Исходная информация задачи может быть представлена следующим набором данных:

$$\langle W, L, Z, r \rangle.$$

Здесь  $W$  и  $L$  — ширина и длина покрываемого прямоугольника  $A$ ;  $Z$  — препятствия, заданные множеством прямоугольников  $Z = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_m\}$ . Стороны прямоугольников из  $Z$  параллельны осям координат;  $Z_i = \langle z_x^i, z_y^i, z_l^i, z_w^i \rangle$  — прямоугольник, моделирующий препятствие, где  $(z_x^i; z_y^i)$  — координаты нижнего левого угла прямоугольника  $Z_i$ ,  $(z_l^i; z_w^i)$  — длина и ширина прямоугольника  $Z_i$ .

Многоугольник  $A \setminus Z$  требуется покрыть минимальным числом  $N$  равных кругов радиуса  $r$ .

Решения задачи могут быть представлены в виде набора данных

$$R = \langle N, X, Y \rangle,$$

где  $N$  — число покрывающих кругов в решении;  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ ,  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_N\}$  — векторы координат центров кругов.

Решение  $R$  является **допустимым** покрытием, если выполняются следующие условия:

1<sup>0</sup> Круги находятся внутри прямоугольника  $A$ .

$$x_j \geq 0; y_j \geq 0; x_j \leq L; y_j \leq W; \forall j = 1, \dots, N.$$

2<sup>0</sup> Центры кругов не лежат внутри препятствий.

Выполняется хотя бы одно из неравенств:

$$(x_j - z_x^i)(x_j - z_x^i - z_l^i) \geq 0 \text{ или } (y_j - z_y^i)(y_j - z_y^i - z_w^i) \geq 0 \text{ для всех } i = 1, \dots, m \text{ и } j = 1, \dots, N.$$

3<sup>0</sup> Покрыта вся область  $A \setminus Z$ .

Если  $(p_x; p_y)$  — произвольная точка на области  $A \setminus Z$ , то  $\exists j: (p_x - x_j)^2 + (p_y - y_j)^2 \leq r^2$ .

Допустимое решение  $R$  является **оптимальным**, если число  $N$  кругов покрытия минимальное.

<sup>1</sup> Будем именовать далее область  $A$  *многоугольником*, так как она является его частным случаем.

Пример покрытия приведен на рис. 1, б. Препятствия на рисунке изображены темным цветом. Описанная задача широко применяется на практике. Далее рассмотрены некоторые приложения.

Метод решения, основанный на блочной и гексагональной технологии, описан в работах [3, 4]. Далее приведены прикладные задачи, препроцессинг для которых описывается задачей покрытия МОП.

### Задачи оптимального размещения сенсоров в области мониторинга

**Задача размещения газоанализатора на территории нефтеперерабатывающего завода.** Производственные установки по сбору и переработке нефти и газа представляют собой совокупность оборудования сложной формы, размещенного на некоторой территории. Требования к пожаро- и взрывобезопасности устанавливаются техническими "Требованиями к установке датчиков стационарных газосигнализаторов в производственных помещениях и на наружных площадках предприятий нефтяной и газовой промышленности". При этом предполагается, что каждый взрывоопасный агрегат должен оснащаться сигнализаторами утечки газа. Пункты стандарта определяют требования к установке газоанализаторов. Вся территория установки должна контролироваться газоанализаторами.

Стандартом оговаривается, что вся территория установки должна контролироваться на предмет утечки газов, однако в нем не указано, как именно должны размещаться газоанализаторы. На рис. 2 (см. третью сторону обложки) показано, что при оптимальном размещении газоанализаторов (рис. 2, б) можно сэкономить материальные ресурсы.

Конкретизация общей постановки задачи зависит от типа прибора.

Если газоанализаторы оснащены автономным источником питания и беспроводным каналом передачи данных, то адекватной математической постановкой задачи является задача покрытия кругами многосвязного ортогонального полигона.

Если же газоанализаторы требуют использования проводных коммуникаций, то адекватной математической постановкой будет задача энергоэффективного покрытия. Существующие эвристические методы решения действуют в два этапа: область покрывается кругами (препроцессор) и осуществляется поиск наилучшего маршрута передачи данных. В известных эвристиках на первом этапе оптимизация покрытия не проводится, что может повлечь за собой материальные потери. Таким образом, независимо от типа газоанализаторов целесообразно находить решение задачи покрытия кругами многосвязного ортогонального полигона.

Как показывает практика, территория установок на нефтеперерабатывающих предприятиях не полностью покрывается газоанализаторами, это может привести к несвоевременному обнаружению аварийной загазованности. Поэтому следует решить, что значит оптимально разместить газоанализаторы на территории промышленного объекта с учетом решения задачи препроцессинга.

При оптимальном размещении газоанализаторов для принятия обоснованного решения о минимально допустимом числе газоанализаторов требуется найти рациональное покрытие многосвязного ортогонального полигона. Допустимое решение задачи приведено на рис. 3 (см. третью сторону обложки). Круги, выделенные цветом, входят в множество газоанализаторов, размещенных согласно стандарту возле опасного оборудования.

**Задача генерации карт вейпоинтов.** В настоящее время системы виртуальной реальности получили широкое распространение. Ими являются справочные системы, виртуальные музеи, компьютерные игры и различные тренажеры. С точки зрения пользователя система виртуальной реальности представляет собой трехмерный мир, функционирующий по своим законам. В этом мире находятся персонажи и пользователь. С точки зрения разработчика система виртуальной реальности — один из самых сложных программных продуктов, использующих новейшие научные разработки. На рис. 4 приведена упрощенная структура типовой системы.

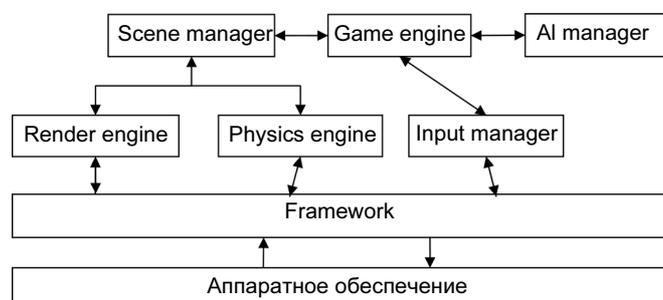


Рис. 4. Структура типовой системы виртуальной реальности

Законы функционирования виртуального мира описываются игровым ядром — game engine<sup>2</sup>. Это главный модуль системы. Виртуальный мир формирует менеджер сцены — Scene manager, а за его отображение отвечает графическое ядро — Render engine. Графическое ядро может лишь отобразить мир, но оно не знает о его физических свойствах. За взаимодействия между виртуальными объектами отвечает физическое ядро — Physics engine.

<sup>2</sup> Этот модуль называется игровым ядром (game engine) во всех системах виртуальной реальности, не только в компьютерных играх.

Пользователь может влиять на виртуальный мир посредством устройств ввода (двигая мышь, нажимая кнопки на клавиатуре и т. д.). За обработку реакции пользователя отвечает менеджер устройств ввода — Input manager. Framework — каркас системы. Он включает в себя различные библиотеки и используется для упрощения и стандартизации работы с аппаратным обеспечением. Все остальные модули системы взаимодействуют лишь с каркасом, но не с оборудованием. Обычно присутствуют и другие модули, не показанные на рис. 4, например, ядро спецэффектов (particle engine), менеджер анимации (animation manager) и т. д. Перечисленных модулей достаточно для того, чтобы поместить пользователя в виртуальный мир и дать ему возможность взаимодействовать с этим миром. Однако в таком мире не будет других персонажей, кроме пользовательского. AI manager — менеджер искусственного интеллекта — берет на себя управление искусственными персонажами (NPC, non player character). Из всех рассмотренных модулей системы виртуальной реальности менеджер искусственного интеллекта (ИИ) является наименее исследованным. Например, для управления сценой и визуализацией графики разработаны эффективные алгоритмы, а универсального алгоритма поведения персонажей не существует. Остановимся подробнее на задачах ИИ: планирование поведения, реализации поведения.

На этапе планирования NPC должен выработать поведенческое решение. Это творческая задача, и выработать общие подходы к ее решению не представляется возможным. После того как решение принято, нужно его реализовать. Главной задачей реализации поведения является поиск маршрута, поскольку большинство действий NPC связано с передвижением по миру.

Задача поиска маршрута NPC решается в два этапа:

1. *Стратегический поиск пути.* Ищется маршрут до точки назначения, не учитывающий обход препятствий. Например, если мир представляет собой большое здание с множеством комнат, то стратегический маршрут будет включать указание, по каким коридорам и комнатам нужно пройти NPC.

2. *Локальный поиск пути.* Ищется маршрут от текущей позиции NPC до следующего пункта назначения стратегического маршрута. Локальный маршрут должен обходить препятствия.

Для локального поиска пути используется алгоритм A\*. Для своей работы он использует только карту мира и не требует дополнительных структур данных. Стратегический поиск пути требует использования дополнительной структуры данных — карты вейпоинтов<sup>3</sup>. Она представляет собой граф,

<sup>3</sup> От англ. waypoint — путевая точка.

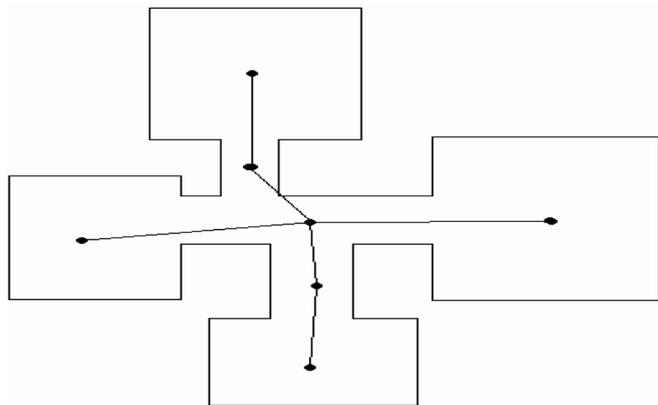


Рис. 5. Пример карты вейпоинтов

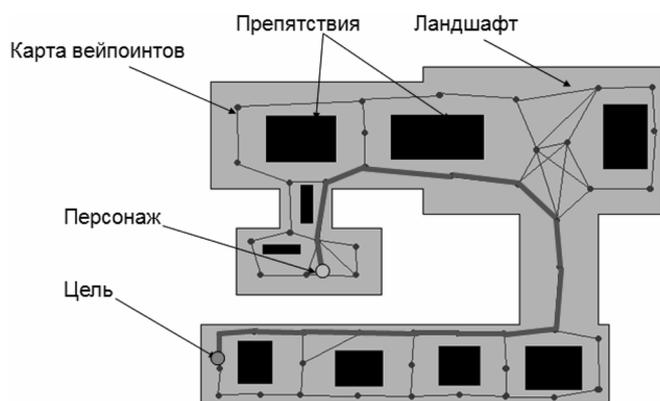


Рис. 6. Поиск пути на основе карты вейпоинтов

вершины которого являются некоторыми позициями в виртуальном мире, а ребра являются связями между ними. Пример карты вейпоинтов приведен на рис. 5.

Стратегический поиск пути по карте вейпоинтов осуществляется любым алгоритмом поиска кратчайшего пути на графах (рис. 6). Число вершин в карте вейпоинтов выбирается таким образом, чтобы длина дуг между любыми смежными вершинами не превышала заданного расстояния, в противном случае локальный поиск пути будет выполняться слишком долго. Слишком большое число вершин в карте вейпоинтов приведет к тому, что стратегический поиск пути будет выполняться слишком долго.

Проблема стратегического поиска пути заключается в том, что карта вейпоинтов создается вручную, и это отнимает много времени. Автоматическая генерация карт вейпоинтов позволяет значительно ускорить разработку систем виртуальной реальности. Создание карты вейпоинтов сводится к задаче покрытия кругами многосвязных ортогональных многоугольников: сцену можно разбить на зоны так, чтобы произвольная вертикальная

прямая пересекала виртуальный мир не более чем в одной точке; центры кругов — вейпоинты, а ребра графа строятся по принципу: если два круга пересекаются, то между вершинами, образованными этими кругами, строится ребро (рис. 7, см. третью сторону обложки).

**Задача проектирования освещения в закрытых помещениях.** В последние годы появилось большое число публикаций по определению и нормированию критериев качества освещения. Многие исследования проводились в целях определения требований к освещению при обычных условиях. Результаты этих исследований предназначены в первую очередь для повышения качества освещения рабочих помещений общественных зданий. Несмотря на увеличение числа выявленных светотехнических параметров, характеризующих качество освещения, в настоящее время не существует единой точки зрения на то, какие из них, а самое главное, каким образом они должны регламентироваться. Особенно трудно обеспечить соответствие полученных результатов предварительного расчета с прямыми визуальными наблюдениями.

В последние годы все чаще указывается диапазон рекомендуемых значений освещенности. Это позволяет в зависимости от экономических возможностей и характерных особенностей данной установки обеспечить уровни, более или менее близкие к оптимальным. Необходимость учитывать назначение и значимость помещения, размещение в нем оборудования, характер и последовательность зрительных работ, время, затрачиваемое на каждую работу, требует от проектировщика высококвалифицированного подхода. Существенную помощь проектировщику освещения могут оказать системы автоматизированного проектирования. Можно показать, что задача проектирования освещения сводится к задаче покрытия кругами плоских областей.

Освещенность находится по следующей формуле:

$$E = \frac{I}{r^2} \cos i,$$

где  $I$  — сила света (в канделах);  $r$  — расстояние до точечного источника света;  $i$  — угол падения лучей света относительно нормали к поверхности.

Зная минимальное значение освещенности, можно вычислить радиус круга, освещаемого одним источником. Зная радиус круга, можно решить задачу покрытия кругами плоской области. Полученное покрытие будет гарантировать, что освещенность в каждой точке не меньше минимально допустимой. Применение комплекса программ для решения задач покрытия может помочь оценить минимально необходимое число светильни-

ков для требуемого освещения помещений и может разместить их рациональным образом.

#### **Выбор точки ожидания для автомобилей такси.**

Службы вызова такси располагают автопарком из  $n$  машин; из них в некоторый момент времени  $m_1$  машин ожидают клиентов, а  $(n - m_1)$  — занимаются перевозкой. Машины, ожидающие клиентов, расположены таким образом, чтобы при поступлении очередного заказа на такси время ожидания клиентов было минимальным. Для этого машины должны быть рассредоточены по городу: каждая машина обладает "радиусом действия"  $r$ , в пределах которого она может доехать до клиента за время, не превышающее  $t$  минут.

Машины, выполнившие заказ, едут к точкам ожидания. Точки ожидания выбираются из условия покрытия максимальной территории города. Оптимальный выбор точек ожидания позволит сократить время обслуживания клиентов, а следовательно, повысить конкурентоспособность службы такси.

**Задача минимального покрытия ортогональных полигонов светодионными модулями.** Задача состоит в следующем. Имеется ортогональный полигон в виде трехмерного корова. Основание корова нужно покрыть модулями двух типов. Требуется минимизировать стоимость использованных модулей. Допускаются непокрытые участки площади, не превосходящие заданное число.

Задача покрытия в этой постановке имеет прикладное значение в виде размещения светодионных модулей при проектировании, например, световых вывесок. Прикладное содержание задачи накладывает дополнительные ограничения по сравнению с другими моделями МОП. Во-первых, полигон является односвязным, т. е. внутри него нет препятствий. Снятие препятствий упрощает применяемые для общего случая алгоритмы конструирования покрытий. Во-вторых, модули покрытия имеют форму, близкую к прямоугольной. Опишем вокруг прямоугольника окружность так, чтобы учитывались ограничения между диодами. Далее можно использовать гексагональную решетку с окружностями двух типов. В-третьих, полигон для размещения модулей может иметь весьма экзотическую форму (рис. 8), учет которой требует модификации гексагонального или блочного алгоритма.

Изображенные на этом рисунке покрытые полигоны вписаны в прямоугольные области. Светлые части прямоугольников будем интерпретиро-

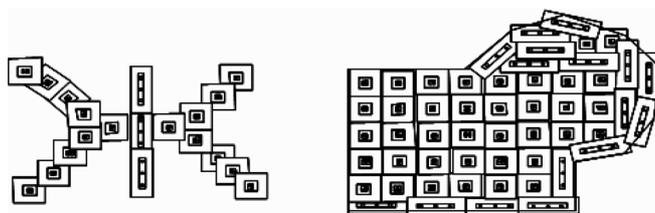


Рис. 8. Примеры покрытия светодионными модулями двух типов

вать как виртуальные препятствия. Это позволяет свести модуль задачи покрытия многоугольного полигона к прямоугольному. Таким образом, и эта задача отвечает общей модели МОП. Эволюционные методы покрытия МОП применимы и для решения данной задачи. Возникающие при этом дополнительные ограничения учитываются в рамках алгоритмов конструирования допустимых покрытий (декодеров).

### **Заключение**

Рассмотрены содержательные постановки некоторых прикладных задач покрытия кругами многосвязных ортогональных полигонов. Они описываются сходными моделями комбинаторной оптимизации. Выделена модель покрытия МОП кругами. Для решения поставленных задач могут применяться эволюционные метаэвристики и другие приближенные методы. Что касается проектирования допустимых покрытий, то для них предлагаются модификации базовых алгоритмов с учетом специфики каждой задачи. В данной статье показано, что большой перечень проблем покрытия сводится к единой модели. Это, в свою очередь, позволяет применить к решению разнообразных задач общие подходы, основанные на эволюционных метаэвристиках.

### **Список литературы**

1. Ерзин А. И., Шамардин Ю. В. Построение оптимального коммуникационного дерева в беспроводной сенсорной сети // Матер. IX Всероссийской конференции "Проблемы оптимизации и экономические приложения", Омск. 2009. С. 40–44.
2. Lovasz L. On the Ratio of Optimal Integral and Fractional Covers // Journal of Discrete Mathematics. 1975. N 13. P. 383–390.
3. Филиппова А. С., Кузнецов В. Ю. Задачи о минимальном покрытии ортогональных многоугольников с запретными участками // Информационные технологии. 2008. № 9. С. 60–64.
4. Филиппова А. С. Моделирование эволюционных алгоритмов решения задач прямоугольной упаковки на базе технологии блочных структур // Информационные технологии. Приложение. 2006. № 6. 32 с.

**А. К. Андреев**, аспирант,  
ГУ "НПО "Тайфун", ФИАЦ, г. Обнинск,  
e-mail: aka@freerc.obninsk.org

## **Компьютерная поддержка принятия решений при угрозе цунами**

*Рассмотрены методы и принципы функционирования автоматизированной информационно-управляющей системы, являющейся компьютерной системой поддержки принятия решений в условиях чрезвычайной ситуации, вызванной цунами.*

**Ключевые слова:** прогнозирование, цунами, система поддержки принятия решений, автоматизированная система предупреждения цунами

### **Введение**

Явление цунами заключается в возникновении в океанах и морях длиннопериодных волн вследствие подводных землетрясений, извержений подводных или островных вулканов и оползней больших масс земных пород.

Цунами оказывают разрушительное воздействие на население и хозяйственную инфраструктуру в наиболее развитых и плотно заселенных частях суши.

Для планирования и организации выполнения мер по обеспечению безопасности населения, хозяйственной деятельности и уменьшения возможного ущерба от цунами создаются специализированные службы предупреждения об угрозе цунами (СПЦ). В условиях чрезвычайной ситуации, возникшей при угрозе цунами, СПЦ на основе поступающих оперативных, прогностических и экспертных данных необходимо решить следующие задачи:

- оценить степень угрозы возникновения цунами и масштаб вероятного воздействия цунами на защищаемую территорию;
- принять решение об объявлении тревоги цунами;
- определиться с выбором мер по обеспечению безопасности населения и хозяйственной деятельности и уменьшения возможного ущерба от цунами и оценить их эффективность;
- обеспечить выполнение организационных мероприятий для реализации принятых решений.

Решение перечисленных задач осуществляется, как правило, в условиях острого недостатка времени, неопределенности и недостаточности информации о складывающейся ситуации. Кроме того, надежный анализ складывающейся ситуации

невозможен без прогноза генерации и распространения цунами, который осуществляется на основе физико-математического моделирования, требует вычислений значительного объема и невозможен без применения современных информационно-вычислительных технологий.

Данная работа посвящена описанию методов, структуры и принципов функционирования автоматизированной информационно-управляющей системы (АИСПЦ), являющейся компьютерной системой поддержки принятия решений в условиях чрезвычайной ситуации, вызванной цунами.

АИСПЦ реализована и внедряется в СПЦ России в рамках Федеральной целевой программы "Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2010 года".

### **Схема компьютерной поддержки принятия решений об угрозе цунами**

Принятие решений об объявлении или отмене тревоги об угрозе цунами осуществляется на основе магнитудно-географического критерия и результатов обработки данных постов инструментальных и визуальных наблюдений за уровнем моря. Магнитудно-географический метод определения опасности возникновения цунами в результате подводного землетрясения использует два критерия: географическое расположение эпицентра землетрясения и пороговое значение магнитуды для этой области. Если оба критерия удовлетворены, то считается, что цунами возникнет, и необходимо объявить тревогу. Разбиение акватории Тихого океана на области и определение пороговых значений магнитуд осуществляется отдельно для каждого Центра предупреждения о цунами. Схема компьютерной поддержки принятия решений об угрозе цунами приведена на рис. 1.

При регистрации подводного землетрясения сейсмическая информация поступает в соответствующий пункт (центр) сейсмологической подсистемы, который рассчитывает и оценивает параметры землетрясений: координаты эпицентра, глубину гипоцентра землетрясения, магнитуду, цунамигенность землетрясения.

При очагах цунами в ближней зоне соответствующего защищаемого пункта ответственность за объявление тревоги цунами возложена на Геофизическую службу Российской академии наук. Поэтому при близком сильном землетрясении в случае признания его цунамигенным (в первую очередь по магнитудно-географическому критерию) соответствующая сейсмостанция немедленно формирует и передает в каналы связи по схеме оповещения

сигналы и сообщения об угрозе цунами по регламенту работы системы. Одновременно параметры землетрясения передаются в соответствующий центр СПЦ (блок 1 на рис. 1).

Если землетрясение находится в дальней зоне Тихого океана, то имеется резерв времени для детального сравнительного анализа сейсмологических данных и данных измерений уровня моря, а также данных от зарубежных центров.

Центр СПЦ, получив предварительные параметры и оценку цунамигенности землетрясения, немедленно начинает анализ поступающей информации. Одновременно начинается непрерывная обработка данных об уровне моря, поступающих от гидрофизической (уровневой) сети СПЦ (блоки 8—10 на рис. 1).

На основе поступивших сейсмологических данных в Центре СПЦ выполняется предварительный расчет времени воздействия волн цунами на защищаемые пункты (времени подхода первой и последней волн цунами) и ожидаемых высот волн (блоки 2—5 на рис. 1). Далее определяются (на основе магнитудно-географического критерия) пункты, для которых существует опасность цунами. По результатам расчета времени подхода волн цунами до пунктов побережья формируется график подачи сообщений об угрозе цунами (блок 6 на рис. 1).

При наличии резерва времени ведется непрерывный анализ информации, поступающей с сети измерений уровня моря. Данные измерений уровня моря позволяют определить как сам факт возникновения волны, так и ее основные параметры: оценку времени прихода, амплитуду первой волны и др. Наличие инструментальных наблюдений за уровнем моря позволяет подтвердить или отменить тревожное сообщение, переданное в соответствующий пункт, до которого волна цунами должна прийти позже.

Отмена угрозы цунами осуществляется по данным сети измерений уровня моря. Состояние угрозы цунами отменяется, если в течение нормативного времени после прихода волны цунами ни в одном пункте измерений не зафиксирован факт прихода волны цунами.

Постоянное дежурство при функционировании СПЦ возложено на дежурного океанолога — специалиста службы цунами, ответственного за обработку поступающей оперативной информации и выдачу предупреждений и сигналов тревоги.

В условиях чрезвычайной ситуации дежурный океанолог должен выполнить целую последовательность действий, причем в условиях острого недостатка времени, что чревато возможными ошибками. И хотя действия дежурного океанолога регламен-



Рис. 1. Схема компьютерной поддержки принятия решений об угрозе цунами

тированы, полностью автоматизировать процедуру принятия решений об объявлении/отмене тревоги об угрозе цунами в настоящее время невозможно, так как доступной объективной информации о складывающейся ситуации, как правило, недостаточно, и дежурный океанолог при принятии решений действует на основе своих знаний и опыта.

Таким образом, компьютерная поддержка принятия решений об угрозе цунами заключается в реализации следующих управляющих функций:

- формирование рекомендаций дежурному океанологу по действиям в соответствии с регламентом и складывающейся обстановкой на основе расчетов, данных о землетрясении и данных об уровне моря;
  - автоматический выбор схемы оповещения и обеспечение реализации логически взаимосвязанных этапов обработки событий по регламенту работы дежурного океанолога.
- Кроме того, поддержка принятия решений об угрозе цунами предполагает выполнение компьютерной системой следующих информационных функций:
- отображение и контроль поступающих сообщений и оперативных данных;
  - непрерывную обработку данных об уровне моря, поступающих от автоматизированных постов, и проведение расчетов в целях обнаружения возникновения волны цунами и оценки ее основных параметров: времени прихода, амплитуды первой волны, периода;
  - формирование и автоматическую передачу в каналы связи всех выходных сигналов и сооб-

щений по регламенту работы в соответствии со схемами оповещения;

- отображение пространственно распределенных данных на картографической основе;
- автоматическое протоколирование всех этапов обработки событий.

### **Структура и информационный обмен автоматизированной информационно-управляющей системы (АИСПЦ)**

АИСПЦ основана на клиент-серверной архитектуре, серверная часть представлена следующими компонентами:

- интегрированной базой данных;
- расчетными модулями для оценки времени добега и высоты волны цунами;
- подсистемой управления;
- коммуникационной подсистемой.

Клиентская часть представлена:

- автоматизированным рабочим местом (АРМ) дежурного океанолога;
- редактором регламента;
- средствами управления расчетов на стороне сервера;
- средствами визуализации результатов расчетов;
- монитором уровня моря.

Поступившие через автоматизированную систему передачи данных Росгидромета (АСПД) телеграммы от сейсмостанций и зарубежных центров принимаются сервисом рассылки и сортировки телеграмм, которые осуществляют их прием, перекодировку и сортируют на два типа: сигналы о сейсмическом событии от сейсмостанции, телеграммы с зарубежных центров предупреждения цунами. Затем сигнал о сейсмическом событии от сейсмостанции поступает на вход диспетчеру расчетов, который осуществляет первичный анализ данных, содержащихся в сигнале, и запускает расчетные модули. Таким образом, запуск расчетов осуществляется автоматически после получения соответствующего сигнала, а за его формирование ответственен модуль формирования сигнала о сейсмическом событии, который может быть установлен как на сейсмостанции, так и на станции цунами.

Далее полученные результаты расчета вместе с исходным сигналом передаются на АРМ дежурного океанолога, где на основе сигнала о землетрясении автоматически формируется регламент действий дежурного океанолога. Действуя по регламенту, дежурный океанолог может выполнить действие, отменить его или пропустить. В каждом случае рядом с действием появляется соответствующая отметка. Помимо выполнения действий по регламенту "АРМ дежурного океанолога" используется для обмена телеграммами через АСПД. Все действия дежурного океанолога, как и входя-

щие/исходящие телеграммы, протоколируются и сохраняются в базе данных на стороне сервера.

Одновременно сервис анализа уровенных данных осуществляет постоянный просмотр поступающих от постов инструментальных измерений уровенных данных, проводит их обработку. В случае обнаружения аномального изменения уровня моря, которое указывает на возможное обнаружение волны цунами, программа "Монитор уровня моря" формирует звуковой сигнал об аномальном изменении уровня моря.

### **Процесс принятия решения об угрозе цунами с использованием АИСПЦ**

После определения характеристик землетрясения с сейсмостанции на сервер центра СПЦ передается сообщение, содержащее характеристики землетрясения. При получении сообщения диспетчер задач АИСПЦ в автоматическом режиме запускает на выполнение цепочку расчетных модулей на сервере. Результатом работы расчетной цепочки являются:

- прогноз значений времен добега и высоты волн цунами;
- сигнал о произошедшем событии (землетрясении) для дежурного океанолога;
- последовательность действий дежурного океанолога в соответствии с характеристиками землетрясения.

После завершения расчета на мониторе дежурного океанолога отображаются данные о землетрясении, а также подается звуковой сигнал тревоги. Одновременно на мониторе отображается последовательность действий дежурного океанолога, которую он должен выполнить в соответствии с веткой регламента, определяемой по характеристикам землетрясения.

Результаты расчета представляются дежурному океанологу на картографической основе и в текстовой форме (рис. 2, см. четвертую сторону обложки).

Дежурный океанолог выполняет действия по регламенту, заключающиеся, прежде всего, в принятии решения об объявлении тревоги цунами, рассылке необходимых сообщений (текстовых телеграмм или телефонных сообщений), а также в принятии решения об отмене тревоги цунами.

Принятие решения об объявлении тревоги цунами дежурный океанолог осуществляет на основе вариантов, формируемых системой по следующей схеме.

В применении к каждому защищаемому пункту  $S_j$  в компьютерной системе введено три уровня угрозы цунами:

- 0-уровень — возможное проявление цунами угрозы не представляет;

- 1-уровень — объявляется возможность появления цунами, осуществляется подготовка инфраструктуры защищаемого пункта к возможному воздействию цунами в целях снижения возможных последствий;

- 2-уровень — объявляются и проводятся мероприятия первого уровня угрозы и эвакуация населения.

Для реализации мероприятий, соответствующих 1-уровню и 2-уровню угрозы требуется соответственно время  $T^1(i) < T^2(i)$ . Оценка этих времен осуществляется на основе экспертной информации и используется в дальнейшем компьютерной системой.

На основе математического моделирования и статистической обработки реальных событий по отношению к каждому защищаемому пункту  $S_j$  вся область  $\Omega$  возможного положения эпицентров подводных землетрясений разбивается на зоны  $\Omega = \Omega_1^i \cup \Omega_2^i \dots \cup \Omega_{k(i)}^i$ . Для каждой зоны  $\Omega_j^i$ ,  $j = 1, \dots, k(i)$ , устанавливаются пороговые значения магнитуды землетрясения  $M_j^1(i) < M_j^2(i)$ :

- если магнитуда  $M$  подводного землетрясения, произошедшего в области  $\Omega_j^i$ , удовлетворяет условию  $M < M_j^1(i)$ , то тревога цунами не объявляется (0-уровень угрозы);
- если магнитуда  $M$  подводного землетрясения, произошедшего в области  $\Omega_j^i$ , удовлетворяет условию  $M_j^1(i) < M < M_j^2(i)$ , то объявляется 1-уровень угрозы цунами;

- если магнитуда  $M$  подводного землетрясения, произошедшего в области  $\Omega_j^i$ , удовлетворяет условию  $M_j^2(i) < M$ , то объявляется 2-уровень угрозы цунами.

При принятии решения об объявлении тревоги цунами в данном защищаемом пункте  $S_j$  во внимание принимаются следующие факторы:

- $T_{зем}$  — время возникновения землетрясения;
- $T_{доб}(i)$  — ожидаемое время добегания волны цунами до защищаемого пункта;
- $M$  — магнитуда произошедшего землетрясения;
- $M_j^1(i) < M_j^2(i)$  — пороговые значения магнитуды землетрясения;
- $T^1(i) < T^2(i)$  — времена реализации защитных мероприятий 1-уровня и 2-уровня соответственно;
- $t_1 < \dots < t_m$  — ожидаемые времена поступления данных наблюдений за уровнем моря от автоматизированных постов  $P_{j(1)}, \dots, P_{j(m)}$ .  
Если для защищаемого пункта  $S_j$ :
- определена зона  $\Omega_j^i$ ;
- на основании сравнения магнитуды произошедшего землетрясения с критическими значениями определен уровень угрозы цунами;
- ближайшее ожидаемое время поступления данных от постов инструментальных наблюдений равно  $t_k$ ,

то система формирует варианты решений дежурному океанологу по объявлению тревоги цунами в пункте  $S_j$  в соответствии со следующими *правилами формирования вариантов*.

1. Если для защищаемого пункта  $S_j$  магнитуда землетрясения  $M$  превышает критическое значение

Таблица 1

Условие	Уровень угрозы	Комментарий
$T_{доб}(i) > (t_k - T_{зем}) + T^2(i)$	1-уровень	Имеется время для оценки складывающейся обстановки по данным измерений уровня моря, поступивших от автоматизированных постов
$(t_k - T_{зем}) + T^1(i) < T_{доб}(i) < (t_k - T_{зем}) + T^2(i)$	2-уровень	Не имеется времени для оценки складывающейся обстановки по данным измерений уровня моря, поступивших от автоматизированных постов
$T_{доб} < (t_k - T_{зем}) + T^1(i)$	2-уровень	

Таблица 2

Условие	Уровень угрозы	Комментарий
$T_{доб}(i) > (t_k - T_{зем}) + T^2(i)$	0-уровень	Имеется время для оценки складывающейся обстановки по данным измерений уровня моря, поступивших от автоматизированных постов
$(t_k - T_{зем}) + T^1(i) < T_{доб}(i) < (t_k - T_{зем}) + T^2(i)$	0-уровень	
$T_{доб} < (t_k - T_{зем}) + T^1(i)$	1-уровень	Не имеется времени для оценки складывающейся обстановки по данным измерений уровня моря, поступивших от автоматизированных постов

магнитуды  $M_j^2(i)$ , т. е.  $M > M_j^2(i)$ , то система рекомендует дежурному океанологу объявить в населенном пункте  $S_i$  уровень угрозы цунами в соответствии с табл. 1.

2. Если для защищаемого пункта  $S_i$  магнитуда землетрясения  $M$  удовлетворяет условию  $M_j^1(i) < M < M_j^2(i)$ , то система рекомендует дежурному океанологу объявить в населенном пункте  $S_i$  уровень угрозы цунами в соответствии с табл. 2.

3. Если для защищаемого пункта  $S_i$  магнитуда землетрясения  $M$  удовлетворяет условию  $M < M_j^2(i)$ , то система рекомендует дежурному океанологу объявить в населенном пункте  $S_i$  0-уровень угрозы цунами.

Следует отметить, что при принятии решения об объявлении, а также отмене тревоги цунами дежурный океанолог руководствуется не только рекомендациями АИСПЦ, но также результатами мониторинга уровня моря и своим опытом при оценке складывающейся ситуации. В АИСПЦ предусмотрены программные средства, обеспечивающие отображение в реальном времени данных, поступивших от автоматизированных постов (рис. 3, см. четвертую сторону обложки). Последовательность действий, выполняемая в процессе принятия решения об угрозе цунами с использованием АИСПЦ, представлена на рис. 4.

### Алгоритмическое обеспечение компьютерной системы поддержки принятия решений при угрозе цунами

**Расчет времен добегания волн цунами.** При получении сообщения о сейсмическом событии, содержащем дату, время, географические координаты эпицентра землетрясения и его магнитуду, выполняется расчет времени добегания волн до защищаемых пунктов на основе алгоритма Гюйгенса [1]. Его существенной особенностью является использование дискретной батиметрической информации (распределения глубин), точность которой является определяющим фактором точности расчета.

**Расчет высот волн в защищаемых пунктах.** Прогнозирование ожидаемых высот волн цунами по данным о землетрясении предполагает численное решение сложных задач механики сплошных сред [1–2], которое требует значительных затрат машинного времени даже в случае использования высокопроизводительной компьютерной техники.

Современный подход к оперативному прогнозу характеристик волн цунами опирается на результаты предварительного математического моделирования (ПММ).

Концепция ПММ заключается в выполнении части расчетных работ по моделированию характеристик цунами заранее (до возникновения опасного события), создание на основе проведенных вычислений базы данных, которая используется потом при проведении расчетов в оперативном режиме функционирования системы.

База включает в себя набор элементарных моделей очагов землетрясений, распределенных в соответствии с сейсмотектоническими особенностями акватории вокруг защищаемых территорий. Для каждого модельного очага землетрясения заранее проводится расчет ожидаемых высот волн



Рис. 4. Последовательность действий, выполняемая в процессе принятия решения об угрозе цунами с использованием АИСПЦ

в защищаемых пунктах, а также моделирование колебаний уровня моря, вызванных волной цунами в местах расположения автоматизированных постов. Результаты расчетов заносятся в базу.

В оперативном режиме при получении сообщения о сейсмическом событии, содержащем дату, время, географические координаты эпицентра землетрясения и его магнитуду, проводится расчет ожидаемых высот волн на основе процедуры интерполяции расчетных значений параметров источника волн на основе имеющейся информационной базы.

Пересчет ожидаемых высот волн по данным об уровне моря, поступающим от автоматизированных постов, осуществляется на основе сравнения расчетных и фактических мареограмм.

Методологические основы и принципы применения современных информационно-вычислительных технологий для создания информационной базы проявления цунами на побережье Дальнего Востока Российской Федерации приведены в работе [2].

Предвычисление (прогнозирование) величины прилива в защищаемых пунктах осуществляется по стандартной методике [3].

**Выделение и идентификация волн цунами.** Сервисная программа анализа уровневых данных осуществляет постоянный просмотр поступающих от автоматизированных постов измерений уровневых данных, проводит их обработку в целях автоматического обнаружения волны цунами и оценки ее характеристик [4].

На первом этапе обработки из рядов наблюдений вычитается приливная составляющая. На втором этапе осуществляется выделение волны цунами на фоне естественного шума. Для этого к ряду наблюдений  $x(j)$  применяется специальный фильтр, который конструируется таким образом, чтобы на его выходе формировался сигнал, максимально приближенный к характеристикам белого шума:

$$x(i) = \sum_{j=1}^{M_p} a_j x(i-j) + \varepsilon(i),$$

где  $\varepsilon_j$  — выход обеляющего фильтра;  $a_j$  — коэффициенты фильтра. Момент прихода волны цунами определяется по превышению  $\varepsilon(j)$  заданной величины (порога).

Настройка параметров фильтра выполняется для фоновых неприливных колебаний уровня. Определение момента прихода волны цунами позволяет оценить максимальную высоту пришедшей волны. Оценка максимальной высоты волны проводится, начиная с момента вступления опасного сигнала (цунами). Выполняется расчет мак-

симальной высоты уровня моря путем последовательного сравнения текущего значения уровня с рассчитанным максимумом.

Период волны цунами оценивается с помощью быстрого преобразования Фурье отрезка ряда  $x(j)$ . Рассчитываются амплитуды каждой гармоники и определяется период гармоники с максимальной амплитудой.

## Заключение

Специфика принятия решения об объявлении тревоги об угрозе цунами или отмене тревоги не позволяет полностью автоматизировать процесс принятия решения: в ряде ситуаций решение принимается дежурным океанологом неформально. По этой причине взаимодействие дежурного океанолога и компьютерной системы поддержки принятия решений осуществляется в интерактивном режиме.

Разработанная компьютерная система обеспечивает информационную организационную поддержку действий дежурного океанолога при принятии решений в части:

- оперативного отображения всей имеющейся информации о гидрофизической и сейсмологической обстановке;
- автоматизации проведения необходимых расчетов;
- генерации возможных решений по объявлению тревоги цунами с учетом складывающейся обстановки и географического положения защищаемых пунктов;
- регламентирования действий дежурного океанолога в соответствии со складывающейся обстановкой;
- автоматизации приема и рассылки сообщений;
- автоматического протоколирования действий дежурного океанолога, входящих и исходящих сообщений.

*Автор считает своим долгом выразить благодарность Р. В. Бородину за поддержку при разработке системы.*

## Список литературы

1. Шокин Ю. И., Чубаров Д. Б., Марчук А. Г., Симонов К. В. Вычислительный эксперимент в проблеме цунами. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1989. 168 с.
2. Байбалов В. В., Бейзель С. А., Гусев А. А., Елецкий С. В., Зыскин И. А., Камаев Д. А., Федотова З. И., Чубаров Л. Б., Шокин Ю. И. Информационно-вычислительные аспекты совершенствования национальной системы предупреждения о цунами // Вычислительные технологии. 2008. Т. 13. Вып. 2. С. 4—20.
3. Руководство по обработке и предсказанию приливов. Л.: Изд. Гидрографии ВМФ СССР, 1941. 347 с.
4. Куликов Е. А. Регистрация уровня океана и прогноз цунами // Метеорология и гидрология. 1990. № 6. С. 75—82.

УДК 004.8

**Л. Н. Ясницкий**<sup>1,3</sup>,

д-р техн. наук, проф., зав. каф.,

**А. М. Петров**<sup>2</sup>,

главный специалист-полиграфолог,

**З. И. Сичинава**<sup>3</sup>, аспирант,

e-mail: yasn@psu.ru

<sup>1</sup> Пермский государственный университет,

<sup>2</sup> Управление внутренних дел Пермского края,

<sup>3</sup> Пермский государственный педагогический университет

## Технологии построения детектора лжи на основе аппарата искусственных нейронных сетей

*Предложены и реализованы три технологии построения нейросетевых полиграфов. Выполнен сравнительный анализ, на основе которого указаны области применения нейросетевых полиграфов в зависимости от трудоемкости их использования и степени достоверности получаемых заключений.*

**Ключевые слова:** нейронная сеть, детектор лжи, полиграф, искусственный интеллект

### Актуальность проблемы

В профилактике, раскрытии и расследовании преступлений в системе органов МВД России традиционно применяют компьютерные полиграфы, регистрирующие от четырех до семи параллельно протекающих физиологических процессов человека: дыхание, кровяное давление, биотоки (мозга, сердца, скелетной мускулатуры и т. п.), тремор и др. Регистрируемые физиологические реакции в реальном режиме времени отображаются на экране монитора в виде пульсирующих кривых. Заключение об истинности ответа опрашиваемого человека на компьютерных полиграфах анализируется с помощью компьютерных программ, как правило, построенных по принципам экспертной системы, база знаний которой сформирована на основе результатов исследований психологов, физиологов и специалистов в области инструментальной детекции лжи.

Однако существующие компьютерные программы, анализирующие полиграммы, не отличаются

высокой надежностью. Так, широко распространенный в следственной практике полиграфный аппарат ЭПОС обеспечивает только 70 % правильных заключений. Поэтому результаты компьютерных расчетов, как правило, вручную перепроверяют специалисты-полиграфологи, и достоверность таких заключений во многом зависит от компетентности, опыта и моральных качеств самих полиграфологов, т. е. от так называемого "человеческого фактора".

Итоги обследования зависят не только от специалиста, проводящего опрос, но и от опрашиваемого человека. Дело в том, что формы проявления выраженности реакций при ложном ответе опрашиваемого человека, наряду с общими правилами, зачастую имеют для каждого человека индивидуальные, только ему присущие особенности. Например, у одних людей при ложном ответе дыхание учащается, у других, наоборот, замедляется; аналогично, увеличивается или уменьшается кровяное давление, частота сердечных сокращений и т. д. [1].

Эти индивидуальные особенности изменения физиологических реакций конкретного обследуемого человека, представляют определенную сложность при проведении расчетного анализа полиграмм компьютерными полиграфами. В силу своего принципа действия они не всегда обладают механизмом индивидуальной настройки на опрашиваемого человека. Компьютерные программы, обрабатывающие полиграммы, как правило, применяют заложенные в них алгоритмы одинаково во всех случаях, не учитывают индивидуальные физиологические особенности человека на момент тестирования.

В последнее время в некоторых организациях появились новые полиграфные системы, в которых сделана попытка учесть особенности индивидуальных физиологических реакций опрашиваемого человека, т. е. с предварительной настройкой системы на каждого клиента. Однако это занимает много времени, и требует определенной квалификации оператора (опять "человеческий фактор"), поэтому практикующие полиграфологи к ним относятся неоднозначно.

Человеческий фактор проявляется и при неизбежном возникновении непредвиденных помех. Помехи могут появиться вследствие всякого рода

внешних раздражителей, например, постороннего звука, случайного движения опрашиваемого, изменения в голосе полиграфолога. Искажения сигналов могут возникать и по многим другим причинам, например, вследствие переутомления опрашиваемого человека, в случае попыток его сознательного противодействия и т. д. По наблюдениям пермских полиграфологов [1] существующие у них обесчисляющие программы не имеют эффективных автоматически работающих механизмов фильтрации артефактов. Поэтому в обязанность специалиста-полиграфолога, проводящего психофизиологическое тестирование, входит исключение, или, по крайней мере, их минимизация в процессе проведения опроса. Но насколько это ему удастся, опять же зависит от уровня квалификации, опыта, настроения полиграфолога. Таким образом, мы опять вынуждены констатировать влияние человеческого фактора на объективность результатов обследования.

Итак, мы указали на три недостатка существующих систем инструментальной детекции лжи.

1. Компьютерные программы, работающие по жестко детерминированным алгоритмам, не всегда учитывают индивидуальные физиологические особенности, проявляющиеся в физиологических реакциях на предъявляемые стимулы.

2. Новые системы, в которых сделана попытка учесть индивидуальные особенности опрашиваемого человека, требуют трудоемкой настройки на каждого клиента, что в определенной степени осложняет их практическое применение.

3. Различные артефакты, неизбежно присутствующие в регистрируемых сигналах, существующие обесчисляющие компьютерные программы выявляют редко, и они могут влиять на объективность выводов.

### Постановка задачи

Группа пермских ученых совместно с работниками УВД Пермского края задалась целью создать интеллектуальную программу для анализа полиграмм с использованием подхода, основанного на применении нейросетевых технологий. Нам представляется, что применение такого подхода позволит устранить все отмеченные недостатки существующих полиграфных аппаратов, уменьшить влияние человеческого фактора и, таким образом, значительно повысить надежность работы полиграфа.

Отличие нового подхода состоит в том, что мы принципиально отказались от использования известных закономерностей и правил, традиционно закладываемых в компьютерные программы, предназначенные для обработки полиграмм. Эти пра-

вила в неявном виде автоматически должны формироваться самой компьютерной программой в ходе обмена информацией между прибором и обследуемым человеком. Компьютерная программа, являясь системой искусственного интеллекта, должна сама извлекать и формализовать в виде правил закономерности организма опрашиваемого человека, автоматически настраиваться на его индивидуальные физиологические особенности, отсеивать возможные артефакты. Применение такой программы в конечном итоге должно сократить объем и время работы специалиста-полиграфолога, уменьшить влияние "человеческого фактора", существенно увеличить достоверность заключений об истинности или ложности ответов клиента.

### Технология создания индивидуально настраиваемого нейросетевого полиграфа

Интеллектуальная система распознавания признаков лжи разрабатывалась на базе нейронной сети персептронного типа, схематично показанной на рис. 1. В качестве входного вектора персептрона  $X$  был использован тот же набор параметров, что и в традиционно применяемом в следственной практике контактном полиграфном аппарате ЭПОС [1]:

$x_1$  — верхнее дыхание (грудное);  $x_2$  — нижнее дыхание (брюшное);  $x_3$  — амплитуда дыхания;  $x_4$  — КГР (кожно-гальванические реакции) 1-го уровня;  $x_5$  — КГР (кожно-гальванические реакции) 2-го уровня;  $x_6$  — КГР (кожно-гальванические реакции), амплитуда;  $x_7$  — фотоплетизмограмма (частота пульса);  $x_8$  — фотоплетизмограмма (частота пульса), амплитуда;  $x_9$  — КНП (кровенаполнение).

Выходной вектор  $Y$  состоял из двух компонент:  $y_1 = 1$ ,  $y_2 = 0$ , если опрашиваемый человек сказал правду, и  $y_1 = 0$ ,  $y_2 = 1$ , если он солгал.

Множество обучающих примеров формировалось в результате предъявления обследуемому человеку стимуляционных тестов, суть которых состоит

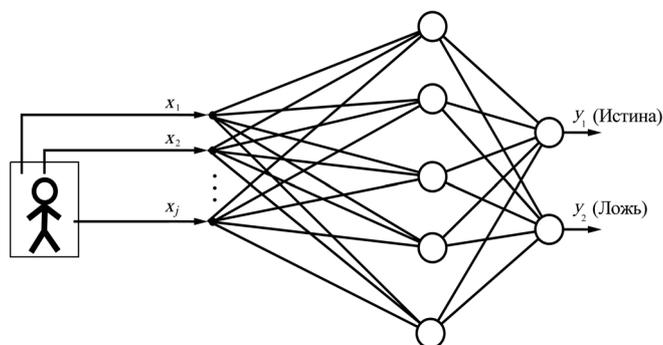


Рис. 1. Принципиальная схема индивидуально настраиваемого нейросетевого полиграфа

в следующем. Полиграфолог задает вопросы, ответы на которые ему известны. С клиента (номер которого обозначим  $q$ ) во время ответов с помощью штатных датчиков полиграфа ЭПОС снимаются физиологические показатели, параметры которых формируют входной вектор  $X_q$ . Выходной вектор  $Y_q$  формирует сам полиграфолог, сопоставляя ответы клиента с тем, что ему заранее известно.

Накопив достаточное число примеров и обучив на них перцептрон, можно задать опрашиваемому человеку вопрос, ответ на который заранее неизвестен. Перцептрон сделает заключение о степени истинности ответа, данного опрашиваемым человеком. Причем, поскольку перцептрон обучен на физиологических реакциях, формируемых самим опрашиваемым человеком, то его заключение объективно учитывает индивидуальные особенности организма именно этого человека. Если обучающая выборка достаточно репрезентативна, то программа, в силу своей нейросетевой базы, будет обладать свойством автоматического отсеивания артефактов [2].

Приведенная технология создания нейросетевого детектора лжи, который мы назвали индивидуально настраиваемым, имеет серьезный недостаток, состоящий в повышенной трудоемкости. Дело в том, что для каждого обследуемого человека приходится заново формировать множество обучающих примеров (порядка 70–100 вопросов-ответов), а затем обучать перцептрон на каждом таком множестве. После этого перцептрон пригоден для тестирования только одного человека, на которого он был настроен.

Таким образом, предлагаемый способ, с одной стороны, позволяет проводить обследование с автоматическим отсеиванием помех и с учетом индивидуальных особенностей организма опрашиваемого человека, что существенно повышает степень объективности и качества выяснения истины, а с другой стороны, этот способ требует больших затрат. Поэтому его можно рекомендовать только для особо ответственных случаев, когда затраты на длительное обучение нейронной сети оправданы.

Эксперименты по созданию и опробованию индивидуально настраиваемого полиграфного аппарата проводились совместно с УВД Пермского края на реальном материале с использованием штатных датчиков полиграфного аппарата ЭПОС и нейропакета [3]. Нейронные сети перцептронного типа (рис. 1) с сигмоидными активационными функциями с одним скрытым слоем обучались с помощью социально-генетического алгоритма [4], представляющего собой комбинацию традиционного генетического алгоритма и метода градиентного спуска. Тестовые испытания нейросетей на

примерах, которых не было в обучающем множестве, показали, что индивидуально настраиваемый нейросетевой полиграф обеспечивает правильные заключения более чем в 97 случаях из 100.

### Технология создания универсального нейросетевого полиграфа

Идея универсального нейросетевого полиграфа состоит в том, что, в отличие от индивидуально настраиваемого, множество обучающих примеров формируется не на конкретном опрашиваемом человеке, а на большом числе различных людей. В нашем эксперименте множество примеров содержало 100 вопросов-ответов, полученных таким способом. Обученная на этих примерах нейросеть подвергалась многократному тестированию. При каждом тестировании 90 элементов использовались в качестве обучающего множества и 10 элементов — в качестве тестирующего. Причем для первого эксперимента мы взяли первые 10 элементов в качестве тестирующего множества, а остальные 90 — в качестве обучающего; для второго эксперимента в качестве тестирующего множества были взяты следующие 10 элементов, а остальные 90, включая первые 10, которые ранее использовались в качестве тестирующего множества, были взяты в качестве обучающего множества и т. д. Таким образом, нейронная сеть обучалась и тестировалась 10 раз. Результаты экспериментов представлены на рис. 2 в виде гистограммы, показывающей процент правильных заключений детектора лжи в зависимости от номера эксперимента.

Как видно из рис. 2, универсальный нейросетевой полиграф делает от 78 до 83 правильных заключений из 100. Средний процент правильных заключений равен 80,2 %.

Зафиксированное в экспериментах снижение процента правильных заключений объясняется тем, что этот полиграф, предварительно обученный на большом числе различных людей, получился ориентированным на некоторого "среднего" человека

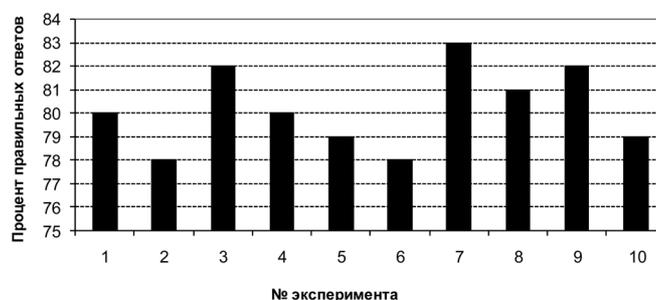


Рис. 2. Результаты, полученные при тестировании универсального нейросетевого полиграфа

и, естественно, перестал учитывать индивидуальные особенности конкретного обследуемого человека. Использование полиграфа стало значительно менее трудоемким, но это привело к снижению надежности заключений. Поэтому универсальный нейросетевой полиграф можно рекомендовать в тех случаях, когда требуется быстро обследовать большое число людей, например, выполнить скрининговое тестирование сотрудников крупной фирмы.

### Технология создания универсально-анкетного нейросетевого полиграфа

Как следует из предыдущего изложения, нам удалось создать два нейросетевых полиграфных аппарата: первый аппарат (индивидуально настраиваемый) учитывает индивидуальные особенности организма опрашиваемого человека, за счет чего имеет высокую надежность заключений, но требует больших трудозатрат в применении; второй аппарат (универсальный) не учитывает индивидуальных особенностей организма опрашиваемого человека и поэтому не обладает высокой надежностью заключений и не требует больших трудозатрат при использовании.

Перед разработчиками встала задача создания полиграфного аппарата, имеющего достоинства двух предыдущих разработок, т. е. учитывающего индивидуальные особенности организма опрашиваемого человека, и не требующего больших трудозатрат при использовании.

Эта задача была решена следующим образом. В схему нейронной сети, представленной на рис. 1, были добавлены дополнительные входные нейроны:  $x_{j+1}, \dots, x_j$ , как показано на рис. 3. Эти нейроны предназначены для ввода дополнительных параметров клиента, получаемых с предварительно заполненной анкеты, включающей следующие сведения:

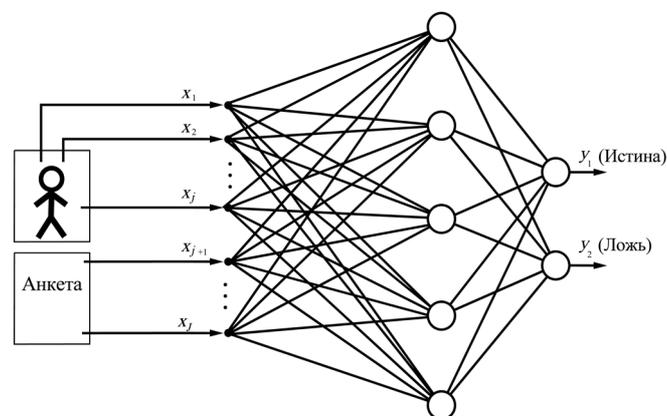


Рис. 3. Принципиальная схема универсально-анкетного нейросетевого полиграфа

- пол;
- возраст, лет;
- знак зодиака;
- вид работы (индивидуальный, физический, смешанный);
- рост, м;
- масса, кг;
- занимался ли человек спортом;
- телосложение (полное, среднее, худощавое);
- судимость (не судим, судим, судим неоднократно);
- тревожность (высокая, обычная, слабая);
- тип характера (экстраверт, интроверт);
- употребление алкоголя (регулярное, умеренное, редкое, не употребляет);
- употребление наркотиков (регулярное, редкое, не употребляет);
- курение (регулярное, редкое, не курит);
- состоит или состоял на учете у психиатра;
- состоит или состоял на учете у невролога;
- состоит или состоял на учете у нарколога;
- наличие беременности;
- наличие хронических заболеваний;
- состояние сердечно-сосудистой системы;
- состояние системы дыхания;
- физическое или психическое истощение;
- перенесенные травмы головы;
- перенесенные травмы позвоночника;
- было ли обморожение кистей рук.

Такая нейронная сеть тоже обучалась на большом числе различных людей, с которых во время опросов снимали не только физиологические параметры, но и анкетные данные, характеризующие индивидуальные особенности их организмов.

Первоначально были взяты все 34 входных параметра (9 физиологических параметров, т. е. снимаемых с помощью штатных датчиков полиграфного аппарата системы ЭПОС, и 25 анкетных данных), но результаты получались хуже на 15–20 %, чем те, которые были получены с помощью универсального полиграфного аппарата. Поэтому было принято решение выявить и исключить из анкетных данных наименее значимые параметры. Для этого был проведен ряд экспериментов с обучением и тестированием нейронной сети, в каждом из которых использовались 9 физиологических параметров, снимаемых с датчиков, и поочередно — один из анкетных параметров. Для надежности эксперименты повторялись по 3 раза. В результате получили гистограмму распределения процента правильных заключений детектора лжи в зависимости от номера используемого анкетного параметра (рис. 4).

Далее из векторов множества обучающих примеров были исключены те анкетные параметры, для которых точность заключений, согласно гис-

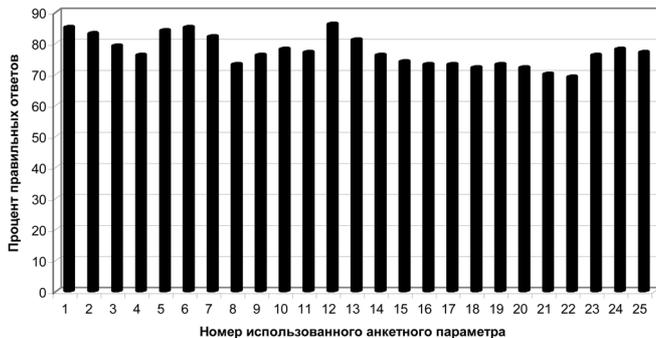


Рис. 4. Процент правильно полученных заключений при поочередном использовании анкетных параметров

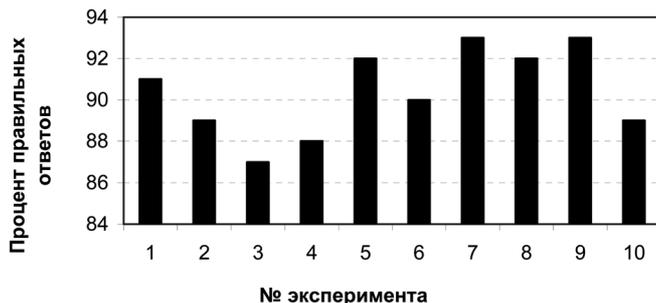


Рис. 5. Результаты, полученные при тестировании универсально-анкетного нейросетевого полиграфа

тограмме рис. 4, оказалась меньше 80 %. В итоге остались следующие анкетные параметры:

- *пол;*
- *возраст, лет;*
- *вид работы (индивидуальный, физический, смешанный);*
- *рост, м;*
- *масса, кг;*
- *тип характера (экстраверт, интроверт);*
- *употребление алкоголя (регулярное, умеренное, редкое, не употребляет).*

После этого было проведено обучение и тестирование нейросети с использованием оставшихся параметров. Нейросеть содержала 16 нейронов

входного слоя: 9 нейронов, полученных с датчиков полиграфного аппарата, и 7 нейронов для ввода параметров, полученных из анкеты. Результаты экспериментов представлены на рис. 5.

Как видно из этого рисунка, универсально-анкетный нейросетевой полиграф делает от 87 до 93 правильных заключений из 100. Средний процент правильных заключений составил 90,4 %, т. е. можно сделать вывод, что использование отобранных в результате экспериментирования анкетных данных повысило процент правильных заключений полиграфа по сравнению с безанкетным (универсальным) полиграфом в среднем на  $90,4 - 80,2 = 10,2$  %.

### Заключение

Предложены, реализованы и проанализированы три технологии построения нейросетевых полиграфов и сделаны следующие выводы.

1. Индивидуально настраиваемый нейросетевой полиграф обеспечивает самую высокую надежность заключений – 97 %, однако его применение связано с высокими трудозатратами.

2. Универсальный нейросетевой полиграф не требует больших трудозатрат в применении, однако надежность его заключений составляет всего 80,2 %.

3. Универсально-анкетный нейросетевой полиграф имеет невысокую трудоемкость в применении и обеспечивает надежность заключений 90,4 %.

### Список литературы

1. Петров А. М., Мягких С. Г. Из записной книжки полиграфолога. Пермь: Компаньон, 2003. 202 с.
2. Ясницкий Л. Н. Введение в искусственный интеллект. Изд. 2. М.: Академия, 2008. 176 с.
3. Черепанов Ф. М., Ясницкий Л. Н. Симулятор нейронных сетей "Нейростимулятор 1.0" // Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 8756. Зарегистрировано в Отраслевом фонде алгоритмов и программ 12.07.2007.
4. Мурашов Д. И., Ясницкий Л. Н. Социальный генетический алгоритм // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. Пермь: Изд. Пермского ун-та, 2006. С. 53–60.

**А. А. Яковлев**, д-р техн. наук, проф.,  
Волгоградский государственный  
технический университет,  
**Е. В. Яковлева**, инженер-конструктор,  
ОАО "Волгограднефтемаш",  
e-mail: yaa\_777@mail.ru

## Автоматизация синтеза и выбора технических решений преобразователей энергии

*Описана методика, позволяющая формировать матрицы технических решений преобразователей энергии на основе анализа модели физического принципа действия. Описан алгоритм формирования списка возможных технических решений из функционально-совместимых конструктивных элементов и экспертный метод выбора наиболее перспективных вариантов преобразователей энергии.*

**Ключевые слова:** физический принцип действия, преобразователь энергии

Одним из путей кардинального улучшения качества проектов создаваемых технических систем является использование на стадии технического предложения новых технологий проектирования, позволяющих формировать множество альтернативных вариантов технических решений и выбирать из них наиболее перспективные для последующей реализации в виде конструкции. Чем больше число вариантов и чем эффективнее методика выбора, тем выше вероятность создания проекта с форсированным уровнем качества.

Традиционным решением в этом случае является разработка морфологических таблиц. Их атрибутами могут быть, например, функции элементов технической системы, а столбцы таблицы заполняются описаниями альтернативных элементов, из которых затем формируются возможные технические решения. Однако определение атрибутов таблицы является нетривиальной задачей и успех ее решения во многом зависит от опыта и интуиции проектировщика. Другим недостатком такого подхода является неработоспособность части получаемых решений вследствие функциональной несовместимости включенных в таблицу элементов.

В работах [1–3] описан метод, который позволяет путем построения модели физического принципа действия (ФПД) разработать таблицу возможных технических решений преобразователя энергии (ПЭ) и определить его конструктивную

организацию, выбрав наиболее перспективный вариант. В данной статье приведена методика построения такой таблицы, описаны алгоритм формирования списков функционально-совместимых конструктивных элементов, составляющих технические решения преобразователя, а также экспертный метод выбора наиболее перспективных ПЭ.

Рассматриваемый здесь подход основан на создании таблиц (матриц соответствия) [1], ячейки которых указывают на соответствие каждого конструктивного элемента выполняемым им элементарным функциям в конструкции ПЭ. Заголовок таблицы содержит список выявленных из модели ФПД элементарных функций. Каждый кортеж таблицы соответствует одному альтернативному элементу. Значение атрибутов таблицы определяется предикатной функцией  $P(f_i)$ , которая принимает истинное или ложное значение в зависимости от выполнения данным альтернативным элементом соответствующей функции  $f_i$ , из специфицированных в заголовке таблицы.

Классификация элементарных функций для элементов графа модели ФПД приведена в табл. 1.

Введены также дополнительные признаки элементарных функций. Например, конструктивные элементы, реализующие функцию изменения направления потока для данной формы движения, разделяются: для одномерного потока ( $f_9^1$ ); двухмерного потока ( $f_9^2$ ); трехмерного потока ( $f_9^3$ ).

Элементы, реализующие функцию изменения значения потока могут изменять значение своего сопротивления потоку экстенсора дискретно и непрерывно, т. е. в некотором диапазоне значений. Элементы с дискретным изменением сопротивления могут иметь или принимать: одно конкретное значение, снижающее поток экстенсора до необходимого значения ( $f_{10}^1$ ); несколько значений, в том числе нулевое и равное бесконечности, обеспечивающее полное отсутствие потока экстенсора ( $f_{10}^2$ ). Элементы с непрерывным изменением сопротивления могут принимать следующие значения: от нуля до бесконечности ( $f_{10}^3$ ); от нуля до некоторого заданного значения ( $f_{10}^4$ ); от одного до другого значения ( $f_{10}^5$ ); от заданного значения до бесконечности ( $f_{10}^6$ ).

Классификация элементарных функций конструктивных элементов

Элементарная функция	Элемент графа модели ФПД	Обозначение
Обеспечение внутренних степеней свободы рабочего тела	Вершина, рабочее тело	$f_1$
Обеспечение внутренней изоляции рабочего тела от нежелательных взаимодействий	То же	$f_2$
Обеспечение внешних степеней свободы рабочего тела	Вершина, контрольная поверхность	$f_3$
Обеспечение внешней изоляции рабочего тела от нежелательных взаимодействий	То же	$f_4$
Обеспечение внутренней степени свободы для проводимого экстенсора	Дуга	$f_5$
Обеспечение внешней изоляции проводника экстенсора от нежелательных взаимодействий	"	$f_6$
Объединение потоков	Гипердуга	$f_7$
Разделение потоков	"	$f_8$
Изменение направления потока	Дуга	$f_9^1, f_9^2, f_9^3$
Изменение значения потока за счет сопротивления проводящей среды	"	$f_{10}^1, f_{10}^2, f_{10}^3, f_{10}^4, f_{10}^5, f_{10}^6$
Изменение значения потока за счет поперечного сечения проводящей среды	"	$f_{11}^1, f_{11}^2, f_{11}^3$
Изменение специфических характеристик потока	"	$f_{12}$

Анализ конструкций функциональных элементов в самых различных областях техники показал, что в общем случае эти элементы могут выполнять одновременно несколько элементарных функций. Причем такие наборы функций у конструктивных элементов часто не совпадают. При использовании морфологических методов это вызывает проблемы, связанные со стыковкой конструктивных элементов в техническом решении.

Последовательность разработки матрицы технических решений состоит из выполнения следующих шагов.

**Шаг 1. Выбор вещества рабочего тела.** Из справочной литературы выбирают альтернативные варианты рабочего тела. Вещество рабочего тела должно допускать все взаимодействия, которые отражены в графе модели ФПД, т. е. обеспечивать соответствующие внутренние степени свободы (функция  $f_1$ ). Кроме того, проводится проверка вещества рабочего тела, чтобы исключить возможность недопустимых в нем взаимодействий (функция  $f_2$ ). Дальнейшие шаги методики целесообразно осуществлять отдельно для каждого варианта рабочего тела.

**Шаг 2. Определение функций для обеспечения требуемых взаимодействий (обеспечение внешних степеней свободы).** Для каждого взаимодействия и потока рабочего тела определяется необходимость наличия конструктивных элементов, обеспечивающих элементарные функции  $f_3$ . Данные заносятся в формуляр таблицы  $M1$  со схемой

$$S_{M1} = \{m_1^1, m_1^2, m_1^3, m_1^4\},$$

где  $M1$  — наименование реляционной таблицы;  $S_{M1}$  — структура таблицы, включающая атрибуты (заголовки столбцов)  $m_1^1 - m_1^4$ ;  $m_1^1$  — обозначение элемента графа модели ФПД (вершины и/или дуги);  $m_1^2$  — обозначение элементарной функции;  $m_1^3$  — вербальное описание элементарной функции для данного элемента графа;  $m_1^4$  — порядковый номер функции.

**Шаг 3. Определение функций для изоляции рабочего тела от нежелательных взаимодействий (изоляция внешних степеней свободы).** Для каждой вершины графа ФПД определяются недопустимые или нежелательные взаимодействия. С каждым из таких взаимодействий сопоставляется элементарная функция  $f_4$ . Данные заносятся в формуляр таблицы  $M2$  со схемой

$$S_{M2} = \{m_2^1, m_2^2, m_2^3, m_2^4, m_2^5\},$$

где  $m_2^1$  — обозначение элемента графа ФПД (вершины или дуги);  $m_2^2$  — вербальное описание нежелательного взаимодействия;  $m_2^3$  — обозначение элементарной функции;  $m_2^4$  — вербальное описание элементарной функции для данного элемента графа;  $m_2^5$  — порядковый номер функции (продолжается нумерация записей таблицы  $M1$ ).

**Шаг 4.** *Определение функций конструктивных элементов для обеспечения внутренних степеней свободы дуг графа ФПД.* Для каждой дуги определяется необходимость наличия конструктивных элементов, выполняющих элементарную функцию  $f_5$ . Данные заносятся в формуляр таблицы  $M1$ .

**Шаг 5.** *Определение функций конструктивных элементов для внешней изоляции от нежелательных взаимодействий потоков экстенсоров и рабочего тела.* Для каждой дуги определяется необходимость наличия конструктивных элементов, выполняющих элементарную функцию  $f_6$ . Данные заносятся в таблицу  $M2$ .

**Шаг 6.** *Определение функций конструктивных элементов для объединения и разделения потоков.* При наличии в графе дуг с одним входом и несколькими выходами (гипердуг) для каждой из них определяется необходимость наличия конструктивных элементов, выполняющих функции  $f_7$  и  $f_8$ . Данные заносятся в формуляр таблицы  $M1$ .

**Шаг 7.** *Определение множества функций элементов управления.* Для каждой дуги графа определяется необходимость в наличии конструктивных элементов, выполняющих элементарные функции  $f_9$ – $f_{12}$ . Данные заносятся в таблицу  $M1$ .

**Шаг 8.** *Определение источников информации на основе предварительного группирования элементарных функций.* Осуществляется подбор конструктивных элементов для выполнения ими всех выявленных элементарных функций. Рекомендуются брать элементы того устройства, на основе которого была составлена модель ФПД. Выявляются наборы выполняемых ими элементарных функций. Определяются классы МПК (Международной патентной классификации) и другие возможные источники информации описаний альтернативных элементов. Данные заносятся в таблицу  $M3$  со схемой

$$S_{M3} = \{m_3^1, m_3^2, m_3^3, m_3^4\},$$

где  $m_3^1$  — порядковый номер конструктивного элемента;  $m_3^2$  — наименование элемента;  $m_3^3$  — множество обозначений элементарных функций, выполняемых элементом;  $m_3^4$  — классы МПК и другие источники информации, в которых содержатся описания конструктивных элементов, выполняющих подобные функции.

**Шаг 9.** *Определение показателей качества.* Составляется список показателей качества, по которым будут сравниваться варианты технических решений ПЭ.

**Шаг 10.** *Поиск альтернативных конструктивных элементов.* Поиск описаний конструктивных элементов осуществляется в источниках информации, указанных в таблице  $M3$  (атрибут  $m_3^4$ ). Для каждого найденного конструктивного элемента уточняются наборы выполняемых им элементарных функций, а также описывается достигаемый результат. Осуществляется заполнение атрибутов  $m_4^1$ – $m_4^5$  формуляра таблицы  $M4$  со схемой

$$S_{M4} = \{m_4^1, m_4^2, m_4^3, m_4^4, m_4^5, m_4^6\},$$

где  $m_4^1$  — обозначение конструктивного элемента;  $m_4^2$  — наименование конструктивного элемента;  $m_4^3$  — источник или ссылка на источник информации в таблице  $M3$ ;  $m_4^4$  — уточненный набор элементарных функций, выполняемых данным элементом. В это поле могут заноситься обозначения элементарных функций из атрибутов  $m_1^2$  и  $m_2^3$ , либо порядковые номера функций из атрибутов  $m_4^1$  и  $m_2^5$ ;  $m_4^5$  — описание результата при использовании данного элемента;  $m_4^6$  — список показателей качества, определенных в шаге 9.

**Шаг 11.** *Оценка конструктивных элементов.* Проводится экспертная оценка конструктивных элементов по каждому показателю качества. Оценки заносятся в таблицу  $M4$ , атрибут  $m_4^6$ .

**Шаг 12.** *Составление матрицы технических решений.* Исходными данными является список конструктивных элементов  $A$  (таблица  $M4$ ) и список элементарных функций  $F$ , выполняемых этими элементами (таблицы  $M1$ ,  $M2$ ). Формируется матрица  $D$  соответствия множеств  $A$  и  $F$ , причем  $D_{ij} = 1$ , если  $i$ -й элемент выполняет данную элементарную функцию, в противном случае  $D_{ij} = 0$ .

**Шаг 13.** *Синтез вариантов технических решений.* Техническое решение ПЭ представляет собой список конструктивных элементов  $A_k$ , сформированный так, что входящие в него элементы выполняют все элементарные функции списка  $F$ . Во многих случаях конструктивные элементы выполняют сразу несколько элементарных функций, часть которых может повторяться. В списке  $A_k$  должны находиться только функционально совместимые элементы, т. е. выполняемые таким списком элементов элементарные функции не должны дублироваться.

Множество технических решений получается путем подбора различных комбинаций конструктивных элементов так, чтобы получить из них наборы, выполняющие все специфицированные функции.

Число элементов в техническом решении может быть различным. В частном случае, когда альтернативные элементы выполняют одинаковые наборы элементарных функций, существует возможность преобразования исходной таблицы в морфологическую.

Технические решения получают путем формирования списков функционально совместимых конструктивных элементов, выполняющих все элементарные функции, выявленные из модели ФПД. Даже при сравнительно небольшом объеме информации без использования ЭВМ нельзя найти все возможные варианты технических решений и оценить их.

Исходные данные для формирования списков возможных технических решений можно представить в виде следующей структуры:

$$\langle A, F, P, E \rangle,$$

где  $A$  — множество описаний конструктивных элементов, из которых формируются технические решения;  $F$  — множество функций, выявленных при анализе модели ФПД;  $P$  — множество показателей качества для оценки получаемых техниче-

ских решений;  $E$  — множество наборов экспертных оценок конструктивных элементов по каждому показателю качества.

*Выходные данные.* Техническое решение двигателя представляется списком конструктивных элементов  $A_k$ . Поскольку список формируется в оперативной памяти ЭВМ, то в узлах списка можно хранить только указатели (ссылки) на описания конструктивных элементов. Узел списка элементов имеет следующую структуру:

$$N_{el} = \langle p_e, p_{se} \rangle,$$

где  $p_e$  — указатель на описание конструктивного элемента;  $p_{se}$  — указатель на следующий узел списка элементов.

Итоговый список технических решений представляется узлами типа

$$N_{td} = \langle E_{sum}, p_{se0}, p_{st} \rangle,$$

где  $E_{sum}$  — множество суммарных значений экспертных оценок конструктивных элементов по каждому показателю качества;  $p_{se0}$  — указатель на начало списка элементов, входящих в данное техническое решение;  $p_{st}$  — указатель на следующий узел списка технических решений.

На рис. 1 показано графическое представление формируемого в памяти ЭВМ списка технических решений ПЭ с указанием на соответствующие им списки элементов и множество описаний конструктивных элементов.

Формирование списка возможных технических решений преобразователей реализуется в два этапа.

**Этап 1. Формирование начального списка технических решений.** Осуществляется просмотр множества конструктивных элементов и находятя элементы, выполняющие первую из требуемых элементарных функций. Для каждого найденного элемента в динамической памяти ЭВМ выделяется память под узел списка элементов и под узел списка технических решений. В поле  $p_e$  узлов списков элементов заносятся указатели на ячейки памяти, где хранятся описания соответствующих конструктивных элементов. В поле  $p_{se0}$  узлов списка технических решений заносятся значения указателей на первые узлы списков элементов. Результаты этого шага алгоритма проиллюстрированы на рис. 2.

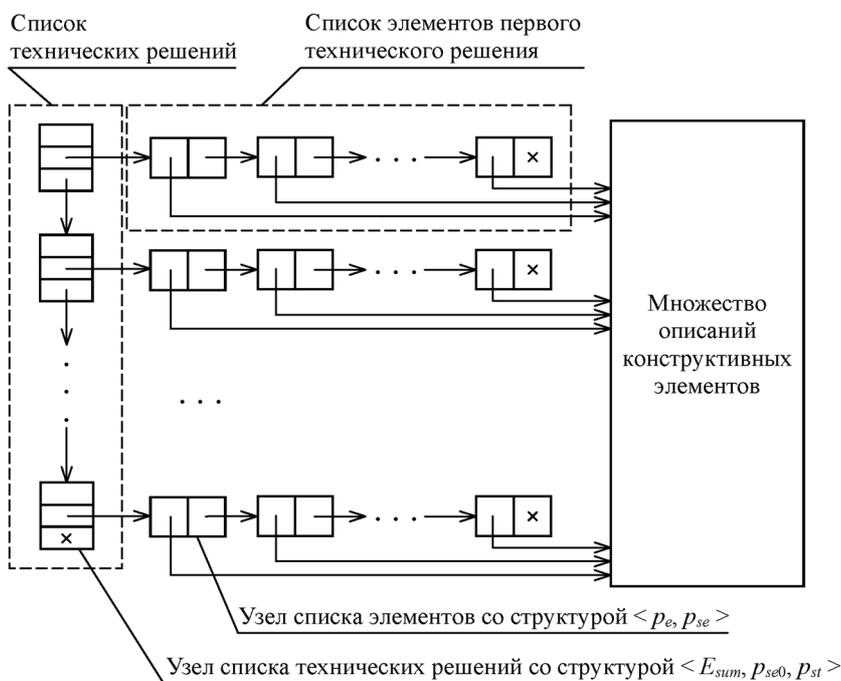


Рис. 1. Список технических решений преобразователей энергии, формируемый в памяти ЭВМ

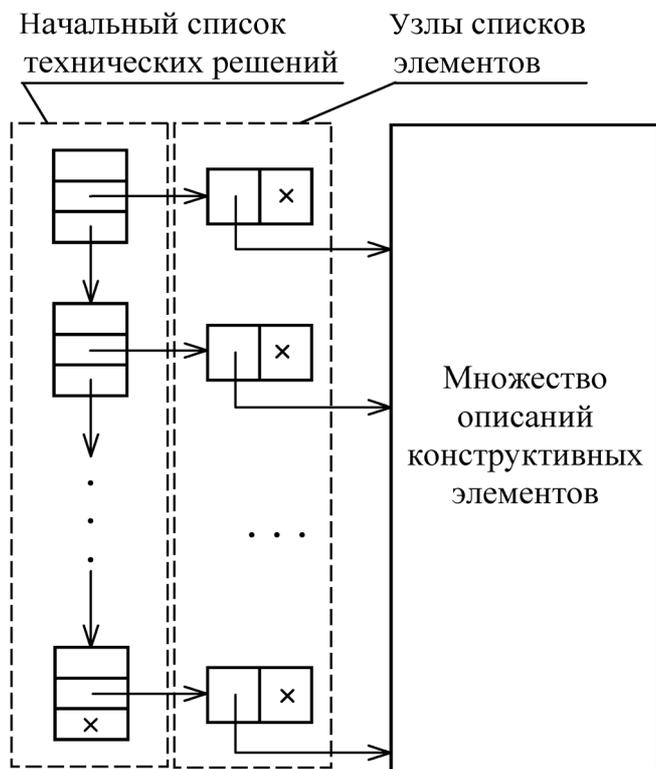


Рис. 2. Формирование в памяти ЭВМ начального списка технических решений

**Этап 2. Формирование списка технических решений.** Эта часть является циклом обработки каждого из узлов списка технических решений. Список элементов технического решения доступен через указатель  $p_{se0}$ . Во время каждой итерации проверяются выполняемые списком элементарные функции. Если все функции выполняются, происходит переход к следующей итерации и обрабатывается следующий узел списка технических решений. В противном случае осуществляется поиск конструктивных элементов, которые совместимы с уже входящими в список (множество функций, выполняемых списком элементов, не должно пересекаться с множеством функций включаемого в список элемента).

Для каждого найденного элемента, который удовлетворяет условию совместимости с остальными элементами, выделяется память под новый узел списка элементов и новый узел списка технических решений. Затем из памяти удаляется обработанный узел списка технических решений и начинается обрабатываться следующий. Цикл заканчивается, когда будут проверены все узлы списка.

Во время выполнения операторов цикла необходимо удалять узлы списка технических решений не только из начала списка, но и из середины. Во

втором случае, чтобы настраивать указатели на следующие узлы списка, значения указателей предыдущего узла сохраняются в переменной, которая перед началом цикла инициализируется значением указателя на начало списка.

На рис. 3 графически проиллюстрировано удаление обработанного узла и добавление нового узла в список технических решений вместе с новым узлом списка элементов технического решения.

Оценка и выбор наилучших технических решений осуществляется экспертным методом [4], который адаптирован применительно к данной методике синтеза технических решений ПЭ. Базовые показатели качества определяются на основе анализа известных аналогов проектируемого ПЭ с учетом перспектив технического прогресса и требований потребителя. В качестве базовых показателей могут приниматься: показатели существующих лучших образцов; планируемые и прогнозируемые показатели; рекомендации международных организаций.

При проектировании новых образцов ПЭ, когда аналог разрабатываемого изделия отсутствует, для определения базовых показателей используется вся доступная информация вплоть до перспективных показателей гипотетического образца, обоснованных результатами научных исследований.

Показатели качества вырабатываются ведущим конструктором с привлечением всех необходимых специалистов, а затем их номенклатура рассматривается экспертной комиссией, которая принимает окончательное решение. Показатели могут быть

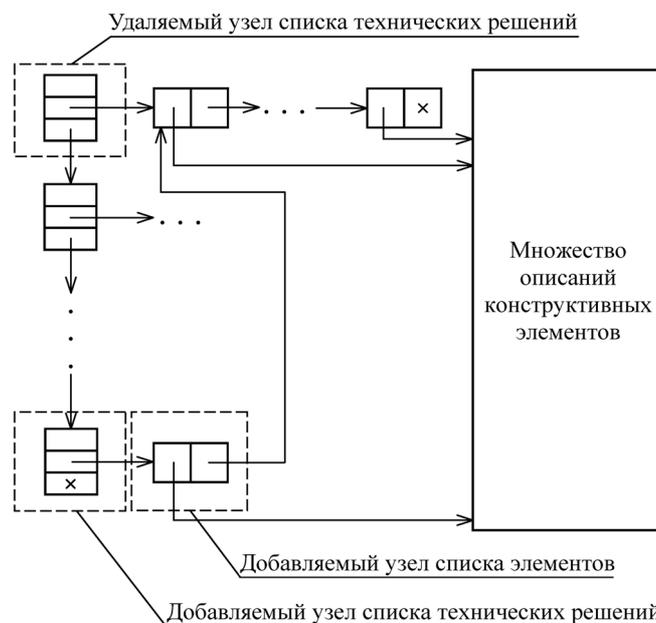


Рис. 3. Графическая иллюстрация удаления обработанных и добавления новых узлов списка технических решений

единичными (характеризуют одно свойство изделия) и групповыми (несколько свойств). Значения принятых показателей качества определяются при сопоставлении аналогичных базовых и перспективных показателей.

Коэффициенты весомости показателей определяются экспертным методом, который предполагает создание экспертной комиссии из высококвалифицированных специалистов, уровень компетентности которых в оценке качества рассматриваемого объекта примерно одинаков. Число экспертов должно быть не менее семи человек.

Порядок определения коэффициента весомости сводится к выполнению следующих процедур.

1. *Ранжирование показателей качества* путем попарного сопоставления предусматривает заполнение каждым экспертом специальной карты, представленной в табл. 2.

На пересечении строки со столбцом более значимого показателя ставят знак "-", а менее значимого "+". Затем в каждой строке подсчитывают число знаков "+", т. е. число предпочтений  $P_{ij}$ .

В случае оценки изделия по относительно небольшому числу показателей качества (менее 10) может проводиться трехбалльная оценка при парном сопоставлении: значительное предпочтение одного показателя другому оценивается в три балла;

простое — в два балла; незначительное — в один балл. В этом случае  $P_{ij}$  — сумма баллов в строке. Тогда в формулу расчета коэффициента корреляции Спирмена [см. ниже формулу (2)] и коэффициента конкордации [см. ниже формулу (4)] необходимо подставлять вместо  $P_{ij}$  ранги показателей качества  $x_{ij}$ . Рангом называется порядковый номер показателя с учетом его весомости.

2. *Статистическая обработка карт экспертов* предусматривает заполнение табл. 3, где  $n$  — число показателей;  $l$  — число экспертов, а величины  $\beta_i$  и  $\bar{\beta}_i$  вычисляются по формулам

$$\beta_i = \sum_{j=1}^l P_{ij} \text{ и } \bar{\beta}_i = \beta_i/l. \quad (1)$$

3. *Выявление некомпетентных экспертов* обеспечивается с помощью коэффициента ранговой корреляции Спирмена и критерия Диксона.

Коэффициент корреляции Спирмена для каждого  $j$  эксперта рассчитывается по формуле

$$\rho_j = 1 - 6 \sum_{i=1}^n d_{ij}^2 / (n^3 - n), \quad (2)$$

где  $d_{ij} = |\bar{\beta}_i - P_{ij}|$ .

Критерий Диксона для каждого  $j$ -го эксперта равен

$$D_j = \frac{\rho_j - \rho_{\min}}{\rho_{\max} - \rho_{\min}} \geq 0,637, \quad (3)$$

где  $\rho_{\max}$  и  $\rho_{\min}$  — максимальное и минимальное значения  $\rho$  в группе экспертов.

При  $D_j \leq 0,637$  эксперты недостаточно компетентны и их показания в дальнейшем не учитываются. При этом в группе должно остаться не менее семи экспертов.

4. *Определение степени согласованности экспертных оценок* и ранжирование показателей качества проводят по данным компетентных экспертов. Для этого составляется табл. 4.

Рассчитывается коэффициент конкордации по формуле

$$W = 12 \sum_{i=1}^n (\bar{\beta}_i - \beta_i)^2 / l_i^2 (n^3 - n) \geq 0,5, \quad (4)$$

где  $\bar{\beta}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \beta_j$  — суммарное среднее число предпочтений;  $l_i$  — число компетентных экспертов.

Коэффициент конкордации находится в интервале от нуля до единицы. При  $W \leq 0,5$  считают, что мнения экспертов несогласованны — необходимо увеличить экспертную группу, а при  $W \geq 0,5$  — со-

Таблица 2

Экспертная карта для попарного сопоставления показателей качества

№ п/п	Наименование показателя	Номер показателя						Число предпочтений $P_{ij}$
		1	2	...	$i$	...	$n$	
1		0						
2			0					
...				0				
$i$					0			
...						0		
$n$							0	

Таблица 3

Суммарное  $\beta_i$  и среднее  $\bar{\beta}_i$  число предпочтений  $i$  показателя качества

№ п/п	Наименование показателя	Число предпочтений $P_{ij}$ каждого эксперта						$\beta_i$	$\bar{\beta}_i$
		1	2	...	$j$	...	$l$		
1									
2									
...									
$i$									
...									
$n$									

гласованность хорошая. Если  $W \geq 0,9$  — мнения слишком согласованы — возможно экспертиза проведена формально без глубокого изучения объекта и следует ее повторить.

Показателю с наибольшим числом предпочтений  $\beta_i$  присваивается ранг 1, а далее, с уменьшением  $\beta_i$  — ранги 2, 3, 4 и т. д.

5. *Определение коэффициентов весомости  $k_i$*  основано на предположении, что их значения пропорциональны величине  $\beta_i$ . Сумма коэффициентов весомости равна единице, тогда

$$k_i = \beta_i / \sum_{i=1}^n \beta_i \quad (5)$$

Для оценки уровня качества проектируемого изделия используется комплексный метод, который применяется, когда целесообразно уровень качества изделия выразить одним числом. Комплексный показатель представляется в виде средневзвешенного показателя. Уровень качества определяется отношением

$$q_W = \frac{W_0}{W_{06}}, \quad (6)$$

где  $W_0$  и  $W_{06}$  — соответственно фактический и базовый комплексные показатели.

Средневзвешенный показатель используют потому, что затруднительно или невозможно выявить аналитически выраженную зависимость комплексного критерия от единичных или групповых показателей. В данном случае используется средневзвешенное геометрическое

$$w_{\text{тр}} = \prod_{i=1}^n w_i^{k_i}, \quad (7)$$

где  $w_i$  — частные показатели качества;  $k_i$  — коэффициенты весомости.

Особенность оценки качества технического решения заключается в том, что каждый конструктивный элемент может получить несколько экспертных оценок, в зависимости от числа связанных с ним элементарных функций, влияющих на показатели качества ПЭ. Для этого заполняется матрица влияния альтернативных элементов на показатели качества (табл. 5). Для выявления наилучших технических решений средневзвешенные геометрические показатели сравниваются.

В поля таблицы вводится единица, если элементарная функция влияет на данный показатель технической системы, в противном случае вводится ноль.

Для оценки конструктивных элементов составляется табл. 6, куда заносятся конструктивные элементы, выполняющие элементарные функции, которые влияют на показатели проектируемого изделия.

Если элемент выполняет несколько таких функций, то в таблицу делаются записи для каждой из этих функций. Оценка проставляется только для тех показателей, на которые влияет функция, выполняемая конструктивным элементом.

Для проверки работоспособности описанной методики был разработан программный модуль, который позволяет получить полный список возможных технических решений для заданной модели ФПД [5] и сравнивать их.

Таблица 4

Ранги значимости показателей качества

№ п/п	Наименование показателя	Число предпочтений $\Pi_{ij}$ каждого компетентного эксперта						$\beta_i$	Ранг
		1	2	...	$j$	...	$l$		
1									
2									
...									
$i$									
...									
$n$									

Таблица 5

Определение элементарных функций, влияющих на показатели качества

№ п/п	Наименование показателя	Порядковый номер функции из таблиц $M1$ и $M2$ , влияющей на показатели							
		$k$			...	$j$	...		$m$
1									
2									
...									
$i$									
...									
$n$									

Таблица 6

Таблица влияния элементов на показатели качества

Конструктивный элемент	Элементарная функция	Показатели					
		1	2	...	$i$	...	$n$

## Выводы

1. Разработанный метод позволяет выявить на основе анализа модели физического принципа действия элементарные функции, которые должны выполнять конструктивные элементы преобразователя энергии. Набор этих функций конечен и известен, что позволяет исключить интуицию из этого этапа проектирования.

2. Морфологические методы синтеза технических решений для преобразователей энергии могут не работать так, как конструктивные элементы реализуют различные наборы элементарных функций, и многие сочетания элементов оказываются неработоспособными вследствие функциональной несовместимости.

3. Разработана методика построения таблиц технических решений для рассматриваемого класса устройств. Строки таблиц соответствуют альтернативным элементам проектируемого преобразователя. Число атрибутов определяется множеством выделенных элементарных функций. Технические решения получают из наборов функционально совместимых конструктивных элементов.

4. Методика позволяет поставить в соответствие каждому элементу, входящему в техническое решение, свой набор элементарных функций. Это дает возможность осуществлять с помощью ЭВМ обработку патентной и другой научно-технической информации для получения множества возможных технических решений, среди которых можно выбрать самые перспективные конструкции преобразователей энергии.

## Список литературы

1. Яковлев А. А. Разработка множеств технических решений установок для преобразования энергии. М.: Машиностроение-1, 2007. 128 с.
2. Камаев В. А., Яковлев А. А. Моделирование физических принципов действия и формирование множеств технических решений преобразователей энергии // Информационные технологии. 2006. № 1. С. 2—8.
3. Яковлев А. А. Синтез моделей физического принципа действия преобразователей энергии с газообразным рабочим телом // Информационные технологии. 2006. № 3. С. 23—28.
4. Труханов В. М. Надежность технических систем типа подвижных установок на этапе проектирования и испытания опытных образцов. М.: Машиностроение, 2003. 320 с.
5. Яковлев А. А., Сыпачева Е. В. Программа синтеза технических решений установок для преобразования энергии: Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007613773, зарег. 5.09.07.



**Издательство "Новые технологии"**  
начинает выпускать  
теоретический и прикладной  
научно-технический журнал

## ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

В журнале будут освещаться состояние и тенденции развития основных направлений индустрии программного обеспечения, связанных с проектированием, конструированием, архитектурой, обеспечением качества и сопровождением жизненного цикла программного обеспечения, а также рассматриваться достижения в области создания и эксплуатации прикладных программно-информационных систем во всех областях человеческой деятельности.

*Журнал распространяется только по подписке.  
Оформить подписку можно через подписные Агентства  
или непосредственно в редакции журнала.*

Подписные индексы по каталогам:  
"Роспечать" — 22765; "Пресса России" — 39795.

# CONTENTS

**Chanyshv O. G. Automatic Text Clusterization Method by the Dominants' Clusters Crossings Analysis . . . . . 2**

Primary purpose: the determination of text pair with a maximal thematic closeness from text set. Each text is presented by the dominants with nonempty verbal clusters (partial lexical-semantic fields). The sum of "degrees of dominants' semantic similarity" is accepted as text pair's closeness measure.  $N = R_{i,j}/R_i + R_{i,j}/R_j$  — is the degree of semantic similarity of identical dominants in different texts, where  $R_{i,j}$  — crossing size of their verbal clusters,  $R_i$  — cluster's size in  $t_i$  text,  $R_j$  — cluster's size in  $t_j$  text. Results of the experiments with use of various methods word weighing are presented.

**Keywords:** text clusterization, binary classifying taxons, dominants, clusters of words, lexico-semantic field, degree of a semantic similarity

**Gorbatov V. A., Dobrik I. I. The Graph-Theoretic Expert Estimation of Alternatives . . . . . 8**

The tasks of an estimation of system effectiveness to its signs are reduced to expert estimation of alternatives. The methodology of effective expert estimation of the alternatives, based on optimum graph theoretic strategy including transformation: the rating count — graph-theoretic parallel form — the diagram of Hasse is offered.

**Keywords:** expert estimation, alternatives, optimum graph-theoretic strategy

**Ognev V. A., Ivanov S. R. Improving Noise Immunity of "Satellite-Receiver" Communications Using EIOS/LIC Signals . . . . . 16**

In paper the method of improving the reliability of the digital information extraction in GPS/GALILEO-receivers is presented. The method implies the new GNSS signals processing. The mathematical model of the new GNSS signals is shown and the structure of prospective receiver is developed. The approach to the construction of a GNSS-receiver simplified model is demonstrated. This model allows exploring the performance of GNSS-receivers in different noise conditions. The numerical modeling results which proved efficiency of proposed approach are presented.

**Keywords:** global navigation satellite system, GNSS-receiver, noise immunity, phase-locked loop, jam, numerical model

**Khovanskov S. A., Norkin O. R. Algorithm of Optimization Multi-Agent System Distributed Computing and his Research through Program Model . . . . . 23**

To solve any complex problem, which has strict time limitation, use of distributed computing. Such a system could be built on the basis, of a computer network under control of multi-agent system. During the task, all agents on the basis of collective decision-making, perform the optimization of computational blocks appointments between computers according to their computing resources. The goal of optimization is to reduce run-time task.

**Keywords:** distributed computing, multi-agent systems, optimization of multi-agent system, oriented graph of solving task, agent, critical route, algorithm of agent, program model

**Benevolenskiy S. B., Nagornyh D. N., Smirnova A. A. The Features of Reserve Database Creation for the Centre of Data Processing of GRID-Systems. . . . . 27**

This work contains the results of creation and features of software functioning for reserve database in the centre of data processing of GRID-systems, based on the offered fail-safe algorithm for servers' sections synchronization.

**Keywords:** fail-safe algorithms, software, network, data-processing centres, GRID-systems

**Zakharov V. M., Stolov E. L., Shalagin S. V. Algorithm of Calculation of Module Remainder and Estimations its Complexity in Basis FPGA . . . . . 32**

Offered algorithm of calculation of the remainder from fission of any binary number given dimensionality for given constant value, synthesized on the base of sister operations of adding the partial remainders. Defined and researched complexity of model a device for abstract, structured and function-logical levels in FPGA-based programmable logical integral circuits.

**Keywords:** remainder module, sister operations, estimations of complexity, FPGA-based programmable logical integral circuits

**Bogdanov Yu. M., Karnaukh D. I. Informational Technology Support of Complex Governmental Management Processes . . . . . 37**

In this article authors describe the system approach to governmental management software design and development. This software should offer process management and decision making support of such complex governmental tasks as economic reformation. The newness of described approach based on integrational view at governmental management processes automation. The target of article results is automation of governmental management processes in whole social economic areas (for example, medicine and education).

**Keywords:** governmental management, reforms, informational technology software, technology framework, modeling methodology, informational models, integration, unified information space

**Volkomorov S. V., Karpenko A. P., Martunyk V. A.** *Analysis of Kinematics and Dynamics of Parallel Mechanisms Using CATIA CAD-system* . . . . . 45

In this paper we consider the problem of analysis kinematics and dynamics of parallel mechanisms using CATIA CAD-system. We present analysis results from same parallel mechanisms, such as the section of a trunk robot-manipulator.

**Keywords:** parallel mechanism, trunk robot-manipulator, CATIA CAD-system

**Kuzmin A. A., Norenkov I. P.** *Computer Aided Design of Electrical Mnemoscheme on Control panel* . . . . . 52

The approach to a design of electrical mnemoscheme on control panel by computers is presented. The optimization criterion is obviousness of mnemoscheme. The suggested method is based on a search of longest chain in indirected graph.

**Keywords:** electrical network, control panel, path search in indirected graph, genetic algorithm

**Filippova A. S., Kuznetsov V. Yu., Basimov E. R.** *Preprocessor Modeling in Problems of Sensor Optimal Placing in Monitoring Field* . . . . . 55

The problems of technical devices (sensors) in monitoring areas of different origin are under consideration. The placing projecting process consists of several conditionally independent stages. At the first stage (preprocessing) we solve the optimization problem of choosing minimal sensor numbers and their placing in the monitoring area under the condition of covering the whole monitoring area with circles or rectangles. The above situations are reduced to solving the combinatorial problem of covering a poly-coherent orthogonal polygon.

**Keywords:** combinatorial optimization, problems of covering, project automation, gas analyzer placing, waypoint map

**Andreev A. K.** *Computer Decision-Making Support in Case of a Tsunami Hazard* . . . . . 60

This article explains the developed methods and the functional principles of the automatic information-management system, being a part of the computer decision-making support system in tsunami hazard emergency situations.

**Keywords:** forecast, tsunami, a computer system, decision-making support system, automatic tsunami warning system

**Yasnitsky L. N., Petrov A. M., Sichinava Z. I.** *Technologies of Construction of Lie-Detector on the Basis of Device of Artificial Neural Networks* . . . . . 66

Three technologies of construction of neural polygraphs are proposed and implemented. A comparative analysis, on which given the scope of neural polygraphs, depending on the complexity of their use and degree of reliability of the findings.

**Keywords:** neural network, lie-detector, polygraph, artificial intellect

**Yakovlev A. A., Yakovleva E. V.** *Automation of Synthesis and Choice Technical Decisions of Converters of Energy* . . . 71

The technique is described, allowing to form matrixes of technical decisions of converters of energy on the basis of the analysis of model of a physical principle of action. The algorithm of formation of the list of possible technical decisions from functionally-compatibly constructive elements and an expert method of a choice of the most perspective variants of converters of energy is described.

**Keywords:** physical principle of action, the converter of energy

---

---

**Адрес редакции:**

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала (499) 269-5510

E-mail: [it@novtex.ru](mailto:it@novtex.ru)

Дизайнер *Т.Н. Погорелова*. Технический редактор *Е.В. Конова*.

Корректор *Е.В. Комиссарова*.

Сдано в набор 09.09.2010. Подписано в печать 18.10.2010. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 9,8. Уч.-изд. л. 10,88. Заказ 880. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Министерстве Российской Федерации по делам печати,

телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-15565 от 02 июня 2003 г.

Отпечатано в ООО "Подольская Периодика"

142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, 15