

ISSN 1819-3161

# ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

4/2016

CONTROL  SCIENCES

## Редакционный совет

Акад. РАН С.Н. Васильев, акад. РАН С.В. Емельянов, чл.-корр. РАН И.А. Каляев, акад. РАН В.А. Левин, чл.-корр. РАН Н.А. Махутов, акад. РАН Е.А. Микрин, чл.-корр. РАН П.П. Пархоменко, чл.-корр. РАН А.Ф. Резчиков, акад. РАН Е.А. Федосов

## Редколлегия

Д-ра техн. наук Ф.Т. Алескеров, В.Н. Афанасьев, Н.Н. Бахтадзе, канд. техн. наук Л.П. Боровских (зам. гл. редактора), д-ра техн. наук В.Н. Бурков, В.А. Виттих, д-р техн. наук В.М. Вишневский, д-р экон. наук М.И. Гераськин, д-р техн. наук А.А. Дорофеюк, д-р экон. наук В.В. Клочков, д-ра техн. наук С.А. Краснова, О.П. Кузнецов, В.В. Кульба, А.П. Курдюков, д-ра физ.-мат. наук А.Г. Кушнер, А.А. Лазарев, д-р техн. наук В.Г. Лебедев, д-р психол. наук В.Е. Лепский, д-р техн. наук А.С. Мандель, д-р биол. наук А.И. Михальский, чл.-корр. РАН Д.А. Новиков (гл. редактор), д-ра техн. наук Б.В. Павлов, Ф.Ф. Пащенко (зам. гл. редактора), д-р физ.-мат. наук Л.Б. Рапорт, д-ра техн. наук Е.Я. Рубинович, В.Ю. Рутковский, д-р физ.-мат. наук М.В. Хлебников, д-р техн. наук А.Д. Цвиркун, д-р физ.-мат. наук П.Ю. Чеботарёв, д-р техн. наук И.Б. Ядыкин

## Руководители региональных редакционных советов

Владивосток – д-р техн. наук О.В. Абрамов (ИАПУ ДВО РАН)  
Волгоград – д-р физ.-мат. наук А.А. Воронин (ВГУ)  
Воронеж – д-р техн. наук С.А. Баркалов (ВГАСУ)  
Курск – д-р техн. наук С.Г. Емельянов (ЮЗГУ)  
Липецк – д-р техн. наук А.К. Погодаев (ЛГТУ)  
Пермь – д-р техн. наук В.Ю. Столбов (ПНИПУ)  
Ростов-на-Дону – д-р техн. наук Г.А. Угольницкий (ЮФУ)  
Самара – д-р техн. наук В.Г. Засканов (СГАУ)  
Саратов – д-р техн. наук В.А. Твердохлебов (ИПТМУ РАН)  
Уфа – д-р техн. наук Б.Г. Ильясов (УГАТУ)



**CONTROL SCIENCES**

**Научно-технический  
журнал**

6 номеров в год

ISSN 1819-3161

Издается с 2003 года

**УЧРЕДИТЕЛЬ**

Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки  
Институт проблем управления  
им. В.А. Трапезникова РАН

Главный редактор  
чл.-корр. РАН

Д.А. Новиков

Заместители главного  
редактора

Л.П. Боровских, Ф.Ф. Пашенко

Редактор

Т.А. Гладкова

Выпускающий редактор

Л.В. Петракова

Издатель

ООО «Сенсидат-Плюс»

Адрес редакции

117997, ГСП-7, Москва,  
ул. Профсоюзная, д. 65, к. 410.

Тел./факс (495) 334-92-00

E-mail: pu@ipu.ru

Интернет: http://pu.mtas.ru

Оригинал-макет и электронная  
версия подготовлены  
ИП Прохоров О. В.

Фото на четвертой странице обложки  
Е.Г. Александрова

Отпечатано в ООО «Авансд солишнз»

Заказ № PB416

Подписано в печать  
14.07.2016 г.

Журнал зарегистрирован  
в Министерстве Российской  
Федерации по делам печати,  
телерадиовещания и средств  
массовых коммуникаций

Свидетельство о регистрации  
ПИ № ФС 77-49203 от 30 марта 2012 г.

Журнал входит в RSCI на платформе  
Web of Science и Перечень  
рецензируемых научных изданий ВАК

Подписные индексы:

**80508** и **81708** в каталоге Роспечати;

**38006** в объединенном каталоге  
«Пресса России»

Цена свободная

© Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки  
Институт проблем управления  
им. В.А. Трапезникова РАН

# ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

## 4.2016

### СОДЕРЖАНИЕ

#### Системный анализ

Мячин А.Л. Анализ паттернов: диффузионно-инвариантная паттерн-кластеризация . . . . . 2

#### Анализ и синтез систем управления

Краснова С.А., Антипов А.С. Иерархический синтез сигмоидальных обобщенных моментов манипулятора в условиях неопределенности . . . 10

Нырклов А.П., А.А. Жиленьков А.А., Черный С.Г. Модели мониторинга и управления процессами стабилизации обменных колебаний мощности в автономных электроэнергетических системах . . . . . 22

#### Управление в социально-экономических системах

Каздагли М.Н. Моделирование поведения трейдеров на фондовом рынке с целью обнаружения агрессивных стратегий трейдинга . . . . . 29

Стежкин А.А. Применение матриц миграций в задачах оценки и управления кредитным риском банков в рамках подхода на основе внутренних рейтингов заемщиков . . . . . 37

Трояновский В.М., Запевалина А.А., Румянцева Е.Л., Сердюк О.А. Определение вероятностных оценок для резервов времени как одна из проблем планирования и управления . . . . . 45

Гребенюк Г.Г., Никишов С.М. Блокирование энерго- и ресурсоснабжения целевых объектов в сетевых инфраструктурах . . . . . 52

#### Информационные технологии в управлении

Затуливетер Ю.С., Фищенко Е.А. Проблемы программируемости, безопасности и надежности распределенных вычислений и сетецентрического управления. Ч. 2. Подход к общему решению . . . . 58

#### Хроника

Станислав Николаевич Васильев (к 70-летию со дня рождения) . . . . . 70

Восьмая международная конференция «Управление развитием крупномасштабных систем» MLSD'2015 . . . . . 72

\* \* \*

Contents and abstracts . . . . . 80

# АНАЛИЗ ПАТТЕРНОВ: ДИФфуЗИОННО-ИНВАРИАНТНАЯ ПАТТЕРН-КЛАСТЕРИЗАЦИЯ<sup>1</sup>

А.Л. Мячин

Предложена модификация метода анализа паттернов, позволяющая выделять в отдельные кластеры объекты, обладающие не только схожей структурой, но и близостью значений определяющих их параметров. Приведены описание метода и его алгоритмическая реализация.

**Ключевые слова:** паттерн, кластерный анализ, диффузионно-инвариантная паттерн-кластеризация.

## ВВЕДЕНИЕ

Анализ паттернов является одним из современных и эффективных методов обработки больших объемов информации. «Анализ паттернов — область анализа данных, связанная с поиском взаимосвязей исследуемых объектов, построением их классификации и исследованием развития объектов во времени» [1].

Из современных работ, демонстрирующих многообразие сфер его применения, укажем на статьи, посвященных макроэкономике [2], банковской сфере [3, 4], науке, образованию и инновационной деятельности [5, 6], политологии [7].

Существенная особенность такого анализа заключается в наглядности результатов, основанной на визуальном представлении паттернов с помощью параллельных координат [8]. Это позволяет геометрически отобразить схожесть структуры данных в рамках выделяемых кластеров. Кластер-анализ — направление анализа данных, развивающее методы формирования и интерпретации групп однородных наблюдений [9]. В ряде публикаций

предлагаются методы кластер-анализа, использующие специфику параллельных координат. Например, для этой цели предлагается найти сначала наиболее информативное упорядочение параллельных осей признаков, а затем уже группировать объекты по сходству их представления ломаными линиями на этих осях [10]. В работе [6] автором предложен метод кластер-анализа, основанный на выявлении таких групп объектов, что соответствующие им ломаные имеют одинаковые паттерны при любом упорядочении параллельных осей. В настоящей работе предлагается дальнейшее развитие метода порядково-инвариантной паттерн-кластеризации [11], предназначенного для ситуаций, в которых имеет значение не только «параллельность» ломаных, но и их близость друг к другу. Эту модификацию метода порядково-инвариантной паттерн-кластеризации мы называем «диффузионно-инвариантной паттерн-кластеризацией». В ее основе лежит идея поиска объектов, настолько близких как по структуре, так и значениям своих параметров, что взаимный обмен значениями не сказывается на их схожести.

## 1. ПОРЯДКОВО-ИНВАРИАНТНЫЕ КЛАСТЕРЫ

Имеется множество  $X$ , состоящее из  $k$  объектов, т. е.  $|X| = k$ . Объекты  $x_i \in X$  описываются векторами  $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{im})$ , где  $x_{ij}$  — значение  $j$ -го параметра на  $i$ -м объекте,  $i = 1, 2, \dots, k; j = 1, 2, \dots, m$ . Ставится задача разбиения множества  $X$  на кластеры схожих между собой объектов.

<sup>1</sup> Статья подготовлена в результате проведения исследования в рамках Программы фундаментальных исследований Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ) и с использованием средств субсидии в рамках государственной поддержки ведущих университетов Российской Федерации «5-100», а также при поддержке Лаборатории теории выбора и анализа решений Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН и Международной лаборатории анализа и выбора решений (НИУ ВШЭ).





При решении этой задачи с помощью метода анализа паттернов объекты  $x_i \in X$  отображаются в  $m$ -мерной системе параллельных координат [8], состоящей из  $m$  вертикальных равномерно распределенных осей, каждая из которых служит для отображения значений одного из параметров. Для каждого объекта отмеченные на осях значения параметров соединяются отрезками прямой. Таким образом, объекты  $x_i \in X$  представляются в виде ломанных линий, т. е. кусочно-линейных функций, с вершинами на параллельных осях. Далее анализируется схожесть паттернов ломанных, соответствующих различным объектам [6].

Для иллюстрации приведем данные активов гипотетических банков, представленных в табл. 1.

В данном примере множество  $X$  состоит из шести объектов: Банк 1, Банк 2, ..., Банк 6, активы которых представлены трехмерными векторами  $x_1 = (35, 10, 25)$ ,  $x_2 = (40, 15, 30)$ ,  $x_3 = (15, 65, 20)$ ,  $x_4 = (70, 45, 60)$ ,  $x_5 = (75, 50, 65)$  и  $x_6 = (10, 60, 15)$ . В соответствии с данными банковских активов, построим соответствующие им кусочно-линейные функции, соответствующие естественному упорядочению активов: А, В, С (рис. 1).

Согласно порядково-инвариантной паттерн-кластеризации, банки 1, 2, 4, 5 оказываются в одном и том же кластере, так как соответствующие им ломаные имеют один и тот же паттерн, при котором значение актива В меньше двух других. Паттерны банков 3 и 6 направлены противоположно, так что они образуют второй кластер (рис. 2).

## 2. ДИФFUЗИОННО-ИНВАРИАНТНАЯ ПАТТЕРН-КЛАСТЕРИЗАЦИЯ

Рассмотрим порядково-инвариантный кластер 1, объекты которого представлены на рис. 2. Все четыре объекта имеют схожую структуру активов: доминирующее положение (в числовом выражении) занимает «Актив А», следующим по значению является «Актив С», и наименьшим значением обладает «Актив В». Такое сходство общей структуры параметров демонстрирует одну из сильных

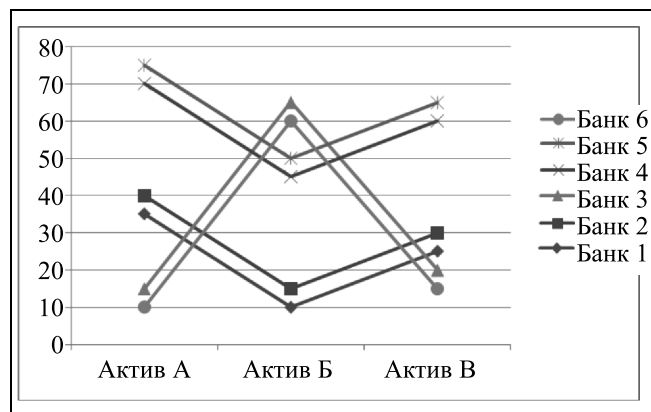


Рис. 1. Кусочно-линейные функции банковских активов

сторон метода порядково-инвариантной паттерн-кластеризации, обуславливающую достаточно широкий спектр его приложений, для которых это качество существенно как свидетельствующее об определенной «функциональной» близости выделенных объектов.

Вместе с тем из рис. 2 видно, что при схожей структуре активы четвертого и пятого объектов существенно выше первых двух. Поэтому представляется естественным разделить данный кластер на две группы объектов, связанных не только схожей структурой активов, но и близостью их значений<sup>2</sup>.

Реализацию этой идеи можно осуществить привлечением метрических соотношений, как это сделано, например, в работе [12]. Однако в настоящей работе продолжена линия применения неметрического подхода порядково-инвариантной паттерн-кластеризации.

Для этого предлагается использовать широко распространенное в технических системах понятие «функциональной взаимозаменяемости» [13], которая определяется как «связь в определенных пределах между функциональными параметрами деталей и узлов (блоков) и их экономическими оптимальными эксплуатационными показателями».

Применительно к решаемой задаче, под функциональной взаимозаменяемостью будем понимать способность объектов оставаться в рамках выделенного кластера при взаимном обмене значениями соответствующих параметров.

Продемонстрируем работу предлагаемого метода на примере данных кластера  $v_1 = \{x_1, x_2, x_4, x_5\}$ .

<sup>2</sup> Подобная ситуация отмечается, например, в работе [5] при исследовании показателей инновационной активности отдельных регионов Российской Федерации. В частности, в данной работе демонстрируется, что ряд регионов описываются паттернами, имеющих схожий характер, но с существенно различными значениями показателей.

Таблица 1

Данные активов гипотетических банков

| Банк   | Актив А | Актив В | Актив С |
|--------|---------|---------|---------|
| Банк 1 | 35      | 10      | 25      |
| Банк 2 | 40      | 15      | 30      |
| Банк 3 | 15      | 65      | 20      |
| Банк 4 | 70      | 45      | 60      |
| Банк 5 | 75      | 50      | 65      |
| Банк 6 | 10      | 60      | 15      |

С этой целью рассмотрим изменение характера ломаных при взаимном обмене отдельными активами А, В и С между первым и вторым банками (рис. 3).

Рис. 3 демонстрирует не изменившийся характер соотношений активов всех четырех банков: доминирующее положение «Актива А», за которым следуют «Актив С» и «Актив В».

Аналогичная ситуация наблюдается при взаимном обмене активами А, В и С между четвертым и

пятым банками. Результаты этих обменов отображены на рис. 4. В этом случае также наблюдается тот же характер соотношений активов всех четырех банков.

Однако ситуация существенно меняется при обмене активами между первым и четвертым банками. Структура активов в них становится совершенно различной (рис. 5). Аналогичные изменения наблюдаются и при обмене активами между вторым и четвертым банками, равно как и при

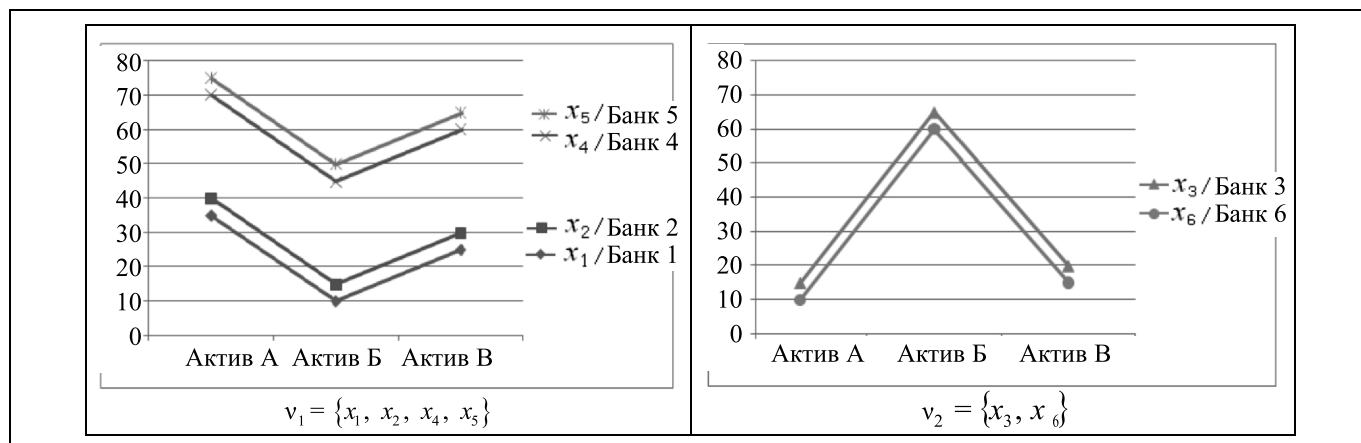


Рис. 2. Результат разбиения исходного множества  $\{x_1, x_2, x_4, x_5, x_6\}$  на кластеры одинаковых паттернов  $v_1 = \{x_1, x_2, x_4, x_5\}$  и  $v_2 = \{x_3, x_6\}$

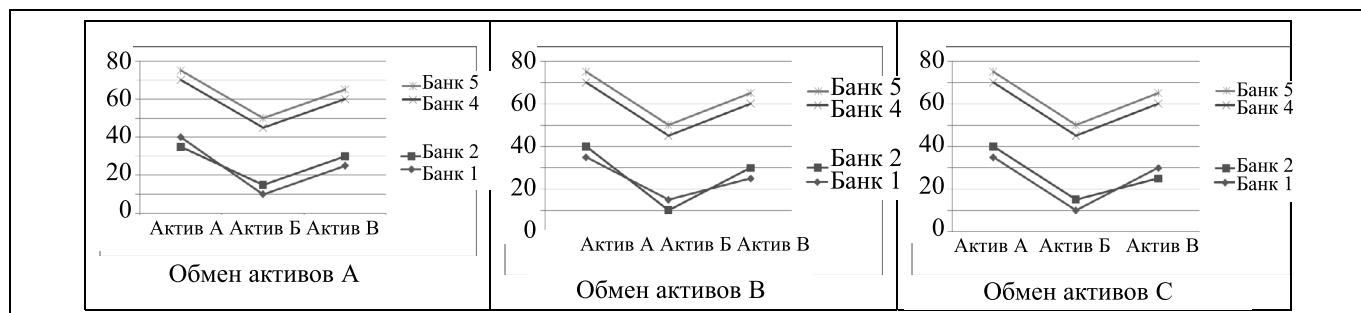


Рис. 3. Кусочно-линейные функции при обмене активами между банками 1 и 2

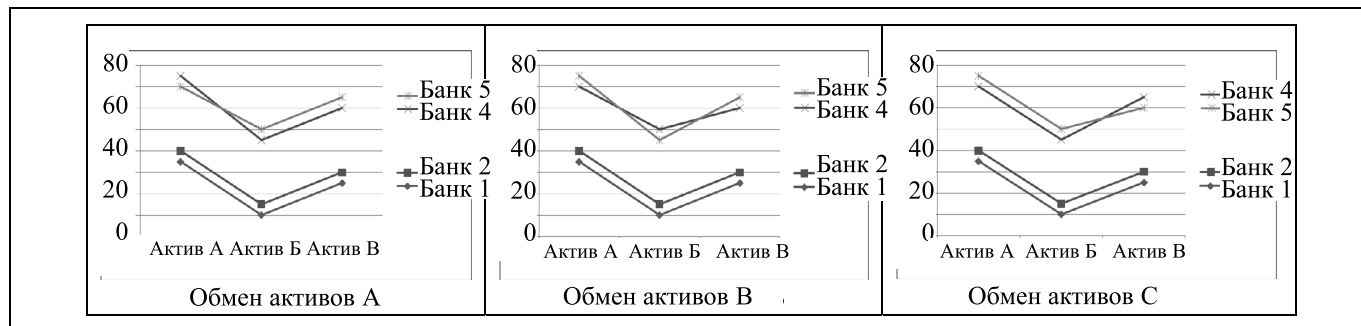


Рис. 4. Кусочно-линейные функции при обмене активами между банками 4 и 5

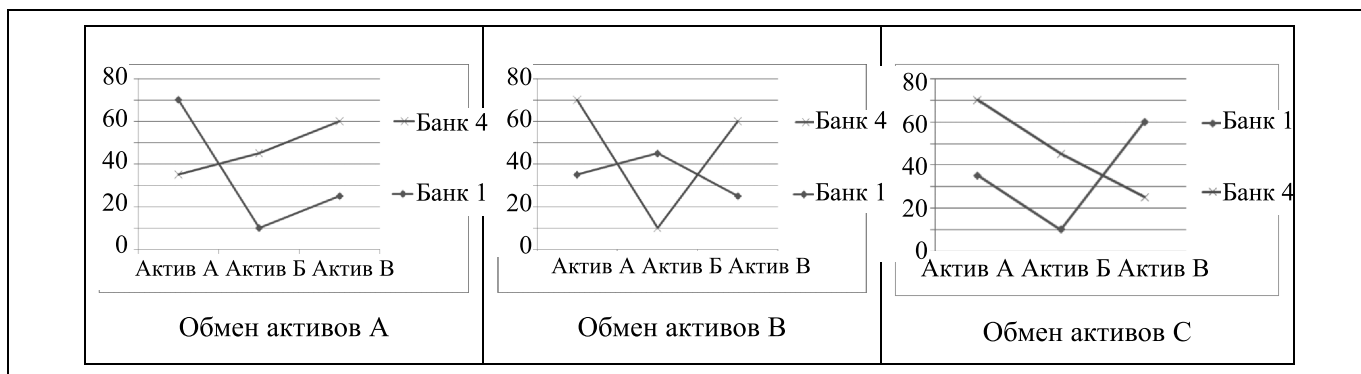
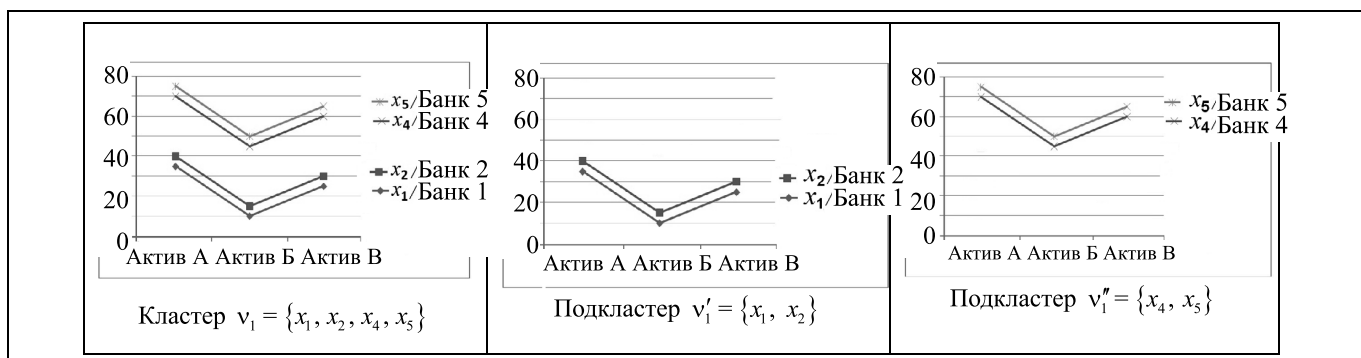


Рис. 5. Кусочно-линейные функции при обмене активами между банками 1 и 4

Рис. 6. В кластере  $v_1 = \{x_1, x_2, x_4, x_5\}$  выделяются два подкластера:  $v'_1 = \{x_1, x_2\}$  и  $v''_1 = \{x_4, x_5\}$ 

обменах первого или второго банков с пятым банком.

Таким образом, в кластере  $v_1 = \{x_1, x_2, x_4, x_5\}$  выделяются два подкластера  $v'_1 = \{x_1, x_2\}$  и  $v''_1 = \{x_4, x_5\}$ . Банки, входящие в каждый из них, обладают сходной структурой своих активов, соответствующие значения которых настолько близки, что взаимный обмен ими не приводит к изменению общей структуры активов в каждом отдельном банке (рис. 6).

### 3. АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

Вид ломаной объекта  $x_i \in X$  в системе параллельных координат предлагается описывать кодовой последовательностью символов  $r_i = \{r_i^1, r_i^2, \dots, r_i^j, \dots, r_i^{m-1}\}$ , где  $r_i^j$  определяется формулами:

$$r_i^j = 1 \text{ при } x_{ij} < x_{ij+1}, \quad (1)$$

$$r_i^j = 0 \text{ при } x_{ij} = x_{ij+1}, \quad (2)$$

$$r_i^j = 2 \text{ при } x_{ij} > x_{ij+1}. \quad (3)$$

Совпадение кодовых последовательностей различных объектов означает одинаковый ход кусочно-линейных функций, представляющих эти объекты в системе параллельных координат.

Учитывая дискретность и ограниченность множества формируемых значений  $r_i^j$ , возможна трактовка кодовой последовательности  $r_i$  как позиционного кода  $(r_i^1, r_i^2, \dots, r_i^j, \dots, r_i^{m-1})$  некоторого числа. Это дает возможность заменить операцию посимвольного сравнения кодовых последовательностей на операцию сравнения чисел. В частности, в целях наглядности и практической реализации описываемого метода использован десятичный позиционный код. В этом случае кодовая последовательность  $r_i$  трактуется как десятичное число  $q_i$ :

$$q_i = \sum_{j=1}^{m-1} 10^{j-1} r_i^{m-j}. \quad (4)$$

Применяя соотношения, задаваемые формулами (1)–(3), формируются кодовые последовательности, описывающие ломаные, которые соответствуют объектам исходного множества  $X$  при

данном упорядочении параметров. Для их сравнения воспользуемся соответствующим представлением в форме десятичных чисел, помещая объекты с совпадающими кодовыми последовательностями в единый кластер. В табл. 2, приведены кодовые представления данных банковских активов в системе параллельных координат и результаты кластерного объединения одинаковых кодовых последовательностей.

Как видно из этой таблицы, исходные данные  $X = \{x_1, x_2, x_4, x_5, x_6\}$  распределены в два кластера: кластер  $v_1 = \{x_1, x_2, x_4, x_5\}$ , объекты которого описываются кодовой последовательностью «21», и кластер  $v_2 = \{x_3, x_6\}$ , объектов с кодовой последовательностью «12». Результаты приведенного разбиения графически отображены на рис. 2.

В общем случае полученные коды дорабатываются путем добавления новых разрядов, отображающих результаты перестановки оси первого пара-

метра с осью каждого из последующих параметров. Каждый такой троичный разряд отражает характер направления отрезка прямой между переставленной осью и той, которая оказывается непосредственно следующей за ней. Затем добавляются разряды, соответствующие перестановкам второй оси с каждой из последующих, затем — третьей, и так далее. В результате получается кодировка объектов, отражающая характер соответствующих ломаных при всевозможных перестановках параметров и соответствующих им осей. Равные коды отвечают классам окончательного порядково-инвариантного разбиения [11].

Далее выделяются подкластеры на основе критерия функциональной взаимозаменяемости параметров объектов.

Для этого внутри каждого из выделенных порядково-инвариантных кластеров рассматриваются все пары объектов  $x_a$  и  $x_b$ , характеризующиеся векторами  $x_a = (x_{a1}, x_{a2}, \dots, x_{am})$  и  $x_b = (x_{b1}, x_{b2}, \dots, x_{bm})$  соответственно. Для каждой пары проверяется функциональная взаимозаменяемость их параметров.

С этой целью для каждого параметра  $j = 1, 2, \dots, m$  производим обмен их значений в векторах  $x_a$  и  $x_b$ . Например, для  $j = 1$  получаем новые векторы  $x_a^* = (x_{b1}, x_{a2}, \dots, x_{am})$  и  $x_b^* = (x_{a1}, x_{b2}, \dots, x_{bm})$ . В соответствии с формулами (1) — (3) составляются позиционные коды для вновь образованных объектов (с учетом измененных значений параметров), и по формуле (4) — их десятичное представление:  $q_a^*$  и  $q_b^*$ . Принцип разделения остается тот же: если  $q_a^* \neq q_b^*$ , то объекты  $x_a$  и  $x_b$  должны находиться в разных подкластерах, так как значения какого-то параметра оказались не функционально взаимозаменяемы. Таким способом проверяются все параметры для данных двух объектов; они помещаются в один и тот же подкластер, только если их значения функционально взаимозаменяемы по всем параметрам. Поскольку равенство чисел обладает свойством транзитивности, то очевидно, что для еще непроверенных объектов нет необходимости их сравнения со всеми объектами, попавшими в один и тот же подкластер, достаточно только одного.

Сформированные таким образом подкластеры, называемые нами диффузионно-инвариантными, состоят из объектов, у которых не только схожие паттерны, но и близкие значения по каждому параметру.

Для примера рассмотрим разделение порядково-инвариантного кластера  $v_1 = \{x_1, x_2, x_4, x_5\}$  на диффузионно-инвариантные подкластеры. Данный кластер объединяет четыре банка. В табл. 3

Таблица 2

#### Результаты кластеризации

| Банк   | Актив А | Актив В | Актив С | Код | Кластер |
|--------|---------|---------|---------|-----|---------|
| Банк 1 | 35      | 10      | 25      | 21  | $v_1$   |
| Банк 2 | 40      | 15      | 30      | 21  | $v_1$   |
| Банк 3 | 15      | 65      | 20      | 12  | $v_2$   |
| Банк 4 | 70      | 45      | 60      | 21  | $v_1$   |
| Банк 5 | 75      | 50      | 65      | 21  | $v_1$   |
| Банк 6 | 10      | 60      | 15      | 12  | $v_2$   |

Таблица 3

#### Обмен активами первого и второго банков

| Состояние активов | Банк   | Актив А   | Актив В   | Актив С   | Код |
|-------------------|--------|-----------|-----------|-----------|-----|
| Исходное          | Банк 1 | 35        | 10        | 25        | 21  |
|                   | Банк 2 | 40        | 15        | 30        | 21  |
| Обмен активами А  | Банк 1 | <b>40</b> | 10        | 25        | 21  |
|                   | Банк 2 | <b>35</b> | 15        | 30        | 21  |
| Обмен активами В  | Банк 1 | 35        | <b>15</b> | 25        | 21  |
|                   | Банк 2 | 40        | <b>10</b> | 30        | 21  |
| Обмен активами С  | Банк 1 | 35        | 10        | <b>30</b> | 21  |
|                   | Банк 2 | 40        | 15        | <b>25</b> | 21  |

**Примечание.** Полужирным шрифтом выделены обмененные активы.

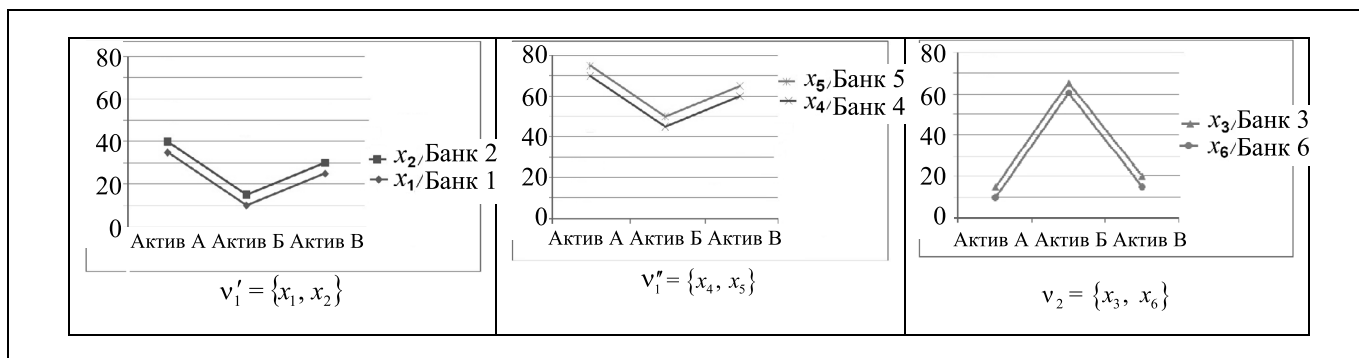


Рис. 7. Диффузионно-инвариантные кластеры  $v'_1 = \{x_1, x_2\}$ ,  $v''_1 = \{x_4, x_5\}$  и  $v_2 = \{x_3, x_6\}$

приведены результаты проверки взаимозаменяемости активов первого и второго банка: первые две строки отражают исходные значения активов; за ними следуют две строки, отражающие состояние банковских активов при обмене активами А; затем две строки, отражающие результат обмена активами В; и заключительные две строки — результат обмена активами С. Для каждой строки (исходной и преобразованной в результате обмена) формируется соответствующая ей кодовая последовательность (представленная в последнем столбце таблицы).

Как видно из этой таблицы, обмен активами первого и второго банков не приводит к изменению кодовой последовательности. Поэтому эти банки могут быть объединены в рамках одного подкластера.

Аналогичная ситуация наблюдается при обмене активов четвертого и пятого банков. Эти банки также могут быть объединены в рамках одного подкластера.

Однако ситуация кардинально меняется при попытке обмена активами первого банка с активами четвертого банка, что наглядно демонстрирует табл. 4.

Как видно из этой таблицы, при обмене банковскими активами, формируемые кодовые последовательности становятся различными, что означает невозможность объединения первого и четвертого банков в рамках одного подкластера. Этот результат наглядно отражает рис. 5.

Таким образом, в кластере  $v_1 = \{x_1, x_2, x_4, x_5\}$  выделяются два подкластера  $v'_1 = \{x_1, x_2\}$  и  $v''_1 = \{x_4, x_5\}$ .

Применение этой же процедуры к кластеру  $v_2 = \{x_3, x_6\}$  показывает, что объекты этого кластера обладают свойством функциональной взаимозаменяемости активов, так что данный порядково-инвариантный кластер является и диффузионно-инвариантным.

Таким образом, итоговый результат заключается в разделении исходного множества на три диффузионно-инвариантных кластера  $v'_1 = \{x_1, x_2\}$ ,  $v''_1 = \{x_4, x_5\}$  и  $v_2 = \{x_3, x_6\}$ , объединяющих банки, обладающие сходными структурами и значениями своих активов, что обеспечивает возможность их обмена без нарушения общей структуры активов банка (рис. 7).

Отметим, что описанный метод диффузионно-инвариантной паттерн-кластеризации основывается на понятии функциональной взаимозаменяемости применительно к параметрам объектов и прямо не использует оценку расстояния между ними. Однако более детальное рассмотрение показывает, что он имеет определенную связь с кластеризацией, использующей евклидову метрику. Эту связь отражает

**Утверждение.** Пусть два объекта  $x_1 = (x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1m})$  и  $x_2 = (x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2m})$  принадлежат одному кластеру  $v$ , построенному с использованием евклидо-

Таблица 4

Обмен активами первого и четвертого банков

| Состояние активов | Банк   | Актив А   | Актив В   | Актив С   | Код |
|-------------------|--------|-----------|-----------|-----------|-----|
| Исходное          | Банк 1 | 35        | 10        | 25        | 21  |
|                   | Банк 4 | 70        | 45        | 60        | 21  |
| Обмен активами А  | Банк 1 | <b>70</b> | 10        | 25        | 21  |
|                   | Банк 4 | <b>35</b> | 45        | 60        | 11  |
| Обмен активами В  | Банк 1 | 35        | <b>45</b> | 25        | 12  |
|                   | Банк 4 | 70        | <b>10</b> | 60        | 21  |
| Обмен активами С  | Банк 1 | 35        | 10        | <b>60</b> | 21  |
|                   | Банк 4 | 70        | 45        | <b>25</b> | 22  |

**Примечание.** Полужирным шрифтом выделены обмененные активы.



ва расстояния  $d_e(x_i, z) < R_V$  между объектами и центром кластера  $z = (z_1, z_2, \dots, z_m)$ , где  $R_V$  — радиус кластера. Образует новые объекты  $x_1^*$  и  $x_2^*$ , обменяв соответствующие значения одной из координат исходных объектов  $x_1$  и  $x_2$ .

Тогда:

1) евклидовы расстояния между исходными объектами  $d_e(x_1, x_2)$  и между вновь образованными объектами  $d_e(x_1^*, x_2^*)$  равны;

2) по меньшей мере, один из вновь образованных объектов принадлежит данному кластеру  $v$ .

Доказательство утверждения приведено в Приложении.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Несмотря на высокую эффективность диффузионно-инвариантной паттерн-кластеризации, отметим, что данный метод может разделять достаточно близкие по значениям параметров объекты в два различных кластера. Проведенный анализ подобных случаев показал, что это связано с высокой чувствительностью диффузионно-инвариантной паттерн-кластеризации к наличию очень близких значений параметров в рамках одного объекта. В этом случае даже небольшие флуктуации, связанные с процессом обмена параметров, могут приводить к неустойчивости результата, что обуславливает одно из направлений дальнейших исследований: повышение устойчивости диффузионно-инвариантной паттерн-кластеризации. Вероятно, этого можно добиться, если ввести порог погрешности, внутри которого значения параметров следует считать одинаковыми.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена модификация метода порядково-инвариантной паттерн-кластеризации, позволяющая учитывать близость как структуры, так и значений параметров исследуемых объектов. Его отличительная особенность состоит не только в выделении кусочно-линейных функций, схожих по форме их графиков, но и обладающих близкими значениями, что в отдельных случаях позволяет говорить об объединении в единый кластер функционально близких объектов.

Благодаря относительно невысокой вычислительной сложности, предложенный метод можно применять для анализа больших данных.

Автор выражает благодарность д-ру техн. наук, профессору Ф.Т. Алескерову и д-ру техн. наук, профессору Б.Г. Миркину за помощь в написании данной статьи.

#### ПРИЛОЖЕНИЕ

Доказательство утверждения. Справедливость первой части утверждения очевидна. Действительно, евклидово расстояние между исходными объектами

$$d_e(x_1, x_2) = \sqrt{(x_{11} - x_{21})^2 + \sum_{i=2}^m (x_{1i} - x_{2i})^2}.$$

Расстояние между вновь образованными объектами

$$d_e(x_1^*, x_2^*) = \sqrt{(x_{21} - x_{11})^2 + \sum_{i=2}^m (x_{1i} - x_{2i})^2}.$$

Сравнивая полученные выражения, получим, что

$$d_e(x_1, x_2) = d_e(x_1^*, x_2^*).$$

Покажем теперь справедливость второй части утверждения. Принадлежность объектов  $x_1$  и  $x_2$  одному кластеру означает, что расстояние между каждым из них и центром кластера  $z$  удовлетворяет соотношениям

$$d_e(x_1, z) = \sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{1i} - z_i)^2} < R_V$$

и

$$d_e(x_2, z) = \sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{2i} - z_i)^2} < R_V,$$

где  $R_V$  — радиус кластера  $v$ .

Тогда

$$d_e^2(x_1, z) = \sum_{i=1}^m (x_{1i} - z_i)^2 < R_V^2$$

и

$$d_e^2(x_2, z) = \sum_{i=1}^m (x_{2i} - z_i)^2 < R_V^2.$$

Найдем расстояние от вновь образованных объектов до центра кластера:

$$d_e(x_1^*, z) = \sqrt{(x_{21} - z_1)^2 + \sum_{i=1}^m (x_{1i} - z_i)^2},$$

$$d_e(x_2^*, z) = \sqrt{(x_{11} - z_1)^2 + \sum_{i=1}^m (x_{2i} - z_i)^2}.$$

Возведя эти выражения в квадрат после элементарных преобразований получим:

$$\begin{aligned} d_e^2(x_1^*, z) &= (x_{21} - z_1)^2 + \sum_{i=2}^m (x_{1i} - z_i)^2 = \\ &= (x_{21} - z_1)^2 + \left( \sum_{i=1}^m (x_{1i} - z_i)^2 - (x_{11} - z_1)^2 \right) \Rightarrow d_e^2(x_1^*, z) = \\ &= (x_{21} - z_1)^2 + \left( \sum_{i=1}^m (x_{1i} - z_i)^2 - (x_{11} - z_1)^2 \right) < \\ &< (x_{21} - z_1)^2 + (R_V^2 - (x_{11} - z_1)^2), \end{aligned}$$



т. е.

$$d_e^2(x_1^*, z) < (x_{21} - z_1)^2 + R_V^2 - (x_{11} - z_1)^2.$$

Аналогично получим:

$$d_e^2(x_2^*, z) < (x_{11} - z_1)^2 + R_V^2 - (x_{21} - z_1)^2.$$

Складывая эти два неравенства, получим:

$$d_e^2(x_1^*, z) + d_e^2(x_2^*, z) < 2R_V^2.$$

Поскольку слагаемые в левой части неотрицательны, то оба они одновременно не могут превышать величины  $R_V^2$ . По крайней мере, одно из них должно быть меньше  $R_V^2$ , т. е. либо

$$d_e^2(x_1^*, z) < R_V^2 \Rightarrow d_e(x_1^*, z) < R_V \Rightarrow x_1^* \in v,$$

либо

$$d_e^2(x_2^*, z) < R_V^2 \Rightarrow d_e(x_2^*, z) < R_V \Rightarrow x_2^* \in v,$$

либо эти неравенства верны для обоих объектов. В этом случае они оба принадлежат кластеру  $v$ :  $x_1^*, x_2^* \in v$ . Утверждение доказано.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ паттернов в статике и динамике. Часть 1: Обзор литературы и уточнение понятия / Ф.Т. Алескеров и др. // Бизнес-информатика. — 2013. — Т. 3. — С. 3—18.
2. Aleskerov F., Alper C.E. A clustering approach to some monetary facts: a long-run analysis of cross-country data // The Japanese Economic Review. — 2000. — Vol. 51, N 4. — P. 555—567.
3. Aleskerov F., Ersel H., Yolalan R. Multicriterial Ranking Approach for Evaluating Bank Branch Performance // International Journal of Information Technology and Decision Making. — 2004. — Vol. 3, N 2. — P. 321—335.
4. Алескеров Ф.Т., Солодков В.М., Челнокова Д.С. Динамический анализ паттернов поведения коммерческих банков России // Экономический журнал Высшей школы экономики. — 2006. — Т. 10, № 1. — С. 48—62.
5. Pattern Analysis in the Study of Science, Education and Innovative Activity in Russian Regions / Aleskerov F., et al. // Procedia Computer Science. — 2013. — Vol. 17. — P. 687—694.
6. Myachin A. Analysis of global data education and patent activity using new methods of pattern analysis // Procedia Computer Science. — 2014. — N 31. — P. 468—473.
7. Aleskerov F., Nurmi H. A method for finding patterns of party support and electoral change: An analysis of British general and Finnish municipal elections // Mathematical and Computer Modelling. — 2008. — P. 1225—1253.
8. Inselberg A. Parallel Coordinates: Visual Multidimensional Geometry and Its Applications. — N.-Y.: Springer, 2009.
9. Миркин Б.Г. Методы кластер-анализа для поддержки принятия решений: обзор / Препринт. Высшая школа экономики. Сер. WP7 «Математические методы анализа решений в экономике, бизнесе и политике». — 2011. — № 03. — 88 с.
10. Zhao X., Kaufman A. Structure revealing techniques based on parallel coordinates plot // The Visual Computer. — 2012. — Vol. 28, N 6—8. — С. 541—551.
11. Myachin A. New methods of pattern analysis in the study of Iris Anderson-Fisher Data // IEEE Proc. of 2016 6th Intern. Conf. on Computers Communications and Control (ISBN 978-1-5090-1735-5).
12. Dunia R., Edgar T.F., Nixon M. Process monitoring using principal components in parallel coordinates // AIChE Journal. — 2013. — Vol. 59, N 2. — С. 445—456.
13. Большая энциклопедия нефти и газа [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.ngpedia.ru/id430983p1.html> (дата обращения: 11.01.2016).

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.А. Дорофеевым.

Мячин Алексей Леонидович — мл. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН; стажер-исследователь, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва, [amyachin@hse.ru](mailto:amyachin@hse.ru).



## XVI международная молодежная конференция «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM—2016)»

Москва, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,  
17—19 октября 2016 г.

### Основные направления работы конференции

- Организация структур технических и программных средств проектирования и управления. Средства взаимодействия, структуры данных, международные стандарты
- Компьютерная графика и CAD/CAM/PDM-системы в учебных процессах (программы обучения по дисциплинам, методические материалы, тестирование). Средства виртуальной реальности в промышленных системах
- Интегрированные производственные системы и управление технологическими процессами. PDM-системы
- Проектирование в машиностроении и строительстве
- Проектирование в радиоэлектронике

Подробная информация о конференции находится на сайте <http://lab18.ipu.ru>.

Контакты: ✉ [conf18@spm.ipu.ru](mailto:conf18@spm.ipu.ru), ☎ (495) 334-93-50, ☎ (495) 334-91-29.

Председатель Оргкомитета — д-р техн. наук Алексей Вячеславович Толоч.

Ученый секретарь — канд. техн. наук Сергей Владимирович Смирнов.

# ИЕРАРХИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИГМОИДАЛЬНЫХ ОБОБЩЕННЫХ МОМЕНТОВ МАНИПУЛЯТОРА В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ<sup>1</sup>

С.А. Краснова, А.С. Антипов

Для системы управления положением рабочего органа манипулятора с электрическими исполнительными устройствами разработана декомпозиционная процедура синтеза обратной связи, обеспечивающей слежение за траекториями, заданными в системе координат рабочего органа. Показано, что использование в качестве локальных связей и корректирующих воздействий наблюдателя состояний  $S$ -образных гладких сигма-функций обеспечивает в системе слежения инвариантность с заданной точностью по отношению к имеющимся неопределенностям с учетом ограничений на переменные механической системы. Отмечено, что разработанный подход не требует решения обратных задач кинематики и динамики и снижает требования к объему априорной информации об объекте управления и внешних воздействиях.

**Ключевые слова:** манипулятор, слежение, инвариантность, ограничения на переменные состояния, сигма-функция, наблюдатель состояний.

## ВВЕДЕНИЕ

Рассматривается электромеханическая система, которая включает в себя динамическую модель манипулятора (механической подсистемы), функционирующего в условиях неопределенности и неполных измерений, и редуцированную модель электрических исполнительных устройств (ИУ). Ставится задача слежения за траекториями, заданными в системе координат рабочего органа манипулятора. Стандартные методы планирования и управления манипуляторами в пространстве обобщенных координат не находят непосредственного применения в данной задаче, так как требуют решения в реальном времени обратных задач кинематики и динамики, которые в редких случаях имеют аналитическое и однозначное решение [1].

В настоящей работе предложен прямой метод блочного синтеза механической системы, записанной относительно ошибок слежения, не требующий

решения обратных задач кинематики. В качестве фиктивных управлений в механической системе рассматриваются обобщенные моменты, развиваемые ИУ. Новизна заключается в использовании сигмоидальных обратных связей для решения и задач управления, и наблюдения в условиях неопределенности [2, 3]. Показано, что в контурах управления и наблюдения с помощью гладких и ограниченных воздействий обеспечиваются свойства, близкие к свойствам систем с разрывными управлениями, функционирующим в скользящем режиме: декомпозиция общего движения на разнотемповые составляющие,  $\varepsilon$ -инвариантность по отношению к возмущающим воздействиям.

Сформированные в механической подсистеме фиктивные управления служат для ИУ сигналами задающими воздействиями. Таким образом, при синтезе следящей системы реализуется принцип декомпозиции, а при проектировании электромеханической системы появляется возможность выбора различных комплектных ИУ, способных обеспечить выполнение манипулятором различных работ в условиях неопределенности.

<sup>1</sup> Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-08-01543А).





## 1. МОДЕЛЬ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается математическая модель электромеханического объекта управления вида

$$\begin{aligned}\dot{q}_1 &= q_2, \\ \dot{q}_2 &= H^{-1}(q_1)[v - C(q_1, q_2)q_2 - G(q_1) + \eta(t)], \quad (1) \\ \dot{v} &= -Av - Dq_2 + Bu, \quad (2)\end{aligned}$$

где (1) — модель механической подсистемы — манипулятора, в котором звенья образуют кинематические пары 5-го класса и являются абсолютно жесткими телами;  $q_1 \in Q_1 \subset R^n$  — вектор обобщенных координат,  $q_2 \in Q_2 \subset R^n$  — вектор обобщенных скоростей;  $H_{n \times n}(q_1) > 0$  — нелинейная положительно определенная матрица инерции,  $\det H^{-1}(q_1) \neq 0$ ;  $C_{n \times n}(q_1, q_2)$  — матрица центробежных и кориолисовых сил;  $G_{n \times 1}(q_1)$  — вектор гравитационных сил;  $\eta(t) \in R^n$  — часть обобщенных сил, трактуемых как внешние возмущения;  $v \in R^n$  — вектор обобщенных моментов, развиваемых ИУ. Компоненты вектора  $v = \text{col}(v_1, \dots, v_n)$  непрерывны и ограничены вместе со своими производными:

$$\begin{aligned}|v_i(t)| &\leq \bar{v}_{0i} = \text{const}, \quad |\dot{v}_i(t)| \leq \bar{v}_{1i} = \text{const} \\ \forall t \geq 0, \quad i &= \overline{1, n}.\end{aligned} \quad (3)$$

Подсистемой (2) описывается учитываемая динамика ИУ — двигателей постоянного тока с жестким типом сочленений;  $A$ ,  $D$  и  $B$  — диагональные матрицы с положительными постоянными коэффициентами передачи, в частности  $B = \text{diag}(b_i)$ ,  $b_i = \text{const} > 0$   $i = \overline{1, n}$ ;  $u \in R^n$  — вектор напряжений якорей электроприводов, которые полагаются разрывными управляющими воздействиями с ограниченной амплитудой  $|u_i| \leq k_{3i}$ ,  $i = \overline{1, n}$ .

Многозвенная конструкция манипулятора заканчивается сменным рабочим органом или схватом, удерживающим груз. Координаты вектора пространственной ориентации схвата  $y_1 \in Y_1 \subset R^m$ , где  $m = 1 \div 6 \leq n$ , однозначно выражаются через обобщенные координаты,  $y_1 = h(q_1(t))$  — известная вектор-функция, ее элементы и их производные ограничены:

$$\begin{aligned}|y_{1i}^{(j)}(t)| &\leq Y_{ji} = \text{const} > 0 \quad \forall t \geq 0, \\ i &= \overline{1, m}, \quad j = \overline{0, 3}.\end{aligned} \quad (4)$$

Здесь и далее во вводимых неравенствах оценочные значения считаются известными из предметной области — конструктивных ограничений и соображений безопасности.

В данной работе рассматриваются манипуляторы с неизбыточным числом степеней свободы  $m = n$  в предположении, что матрица частных производных  $J(q_1)_{n \times n} = (\partial h / \partial q_1)$  всюду, за исключением конечного числа особых точек, имеет полный ранг:  $\text{rank} J_{n \times n}(q_1) = n \quad \forall q_1 \in \bar{Q}_1 \subset Q_1$ . Ставится задача слежения для выходных переменных  $y_1 = h(q_1) \in R^n$  электромеханической системы (1), (2) за допустимыми траекториями  $g(t) \in R^n$ , заданными в системе координат рабочего пространства схвата  $g \in Y_1$ , в предположениях:

— аналитический вид задающих воздействий не известен, имеются только их текущие значения, сигналы  $g = \text{col}(g_1, \dots, g_n)$  полагаются ограниченными функциями времени с ограниченными производными:  $|g_i^{(j)}(t)| \leq Y_{ji} \quad \forall t \geq 0, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{0, 3}$ ;

— прямым измерениям доступны обобщенные координаты  $q_1(t)$  и токи якорей электроприводов, пересчитанные в электрические моменты  $v(t)$ ;

— масса схвата с грузом полагается неизвестной, ограниченной кусочно-гладкой функцией времени с ограниченной производной, что обуславливает существенную параметрическую неопределенность матриц  $H$ ,  $C$  и  $G$  механической подсистемы (1);

— внешние возмущения  $\eta(t) = \text{col}(\eta_1(t), \dots, \eta_n(t))$  полагаются неизвестными, ограниченными, кусочно-гладкими функциями времени с ограниченными производными:

$$|\eta_i^{(j)}(t)| \leq N_{ji} = \text{const} \quad \forall t \geq 0, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = 0, 1.$$

Внешние возмущения являются несогласованными [4]: они действуют на второе уравнение системы (1) и их нельзя непосредственно подавить или компенсировать с помощью истинного управления  $u$ , что приводит к постановке задачи слежения с заданной точностью. Цель управления состоит в обеспечении стабилизации ошибки слежения  $e_1 = y_1 - g \in R^n$ :

$$|e_{1i}(t)| \leq \delta_1 \quad \forall t \geq T, \quad i = \overline{1, n}. \quad (5)$$

Заметим, что в электромеханической системе с конкретными ИУ (2) минимально возможные значения  $\delta_1^*$  и  $T^*$  в выражении (5) обусловлены имеющимися ресурсами управления  $b_i k_{3i} > 0, \quad i = \overline{1, n}$ . При проектировании электромеханической систе-

мы, предназначенной для выполнения различных работ в условиях неопределенности, ставится задача выбора ИУ определенной мощности, способных обеспечить заданную точность слежения  $\delta_1$  (5) с учетом наихудших возмущений. В данной работе решается именно эта проблема, которая разделяется на две последовательно решаемых подзадачи:

— в механической подсистеме решается задача слежения за заданными траекториями выходных переменных (5) путем синтеза обобщенных моментов  $v = \text{col}(v_1, \dots, v_n)$ ;

— в ИУ (2) решается задача слежения за сформированными обобщенными моментами  $v^* \in R^n$ , т. е. задача стабилизации ошибки слежения  $v - v^* \in R^n$  путем синтеза истинного разрывного управления  $u = \text{col}(u_1, \dots, u_n)$ ,  $u_i = k_{3i} \text{sign}(v_i - v_i^*)$ ,  $i = \overline{1, n}$ . Выбор амплитуд переключений  $b_i k_{3i} > 0$  обуславливает выбор подходящих ИУ. Заметим, что в условиях неполных измерений ставится также задача оценивания с помощью наблюдателя состояний неизмеряемых сигналов, необходимых для формирования задающих воздействий  $v^*(t)$  для ИУ.

Таким образом, в системе (1), (2) обобщенные моменты  $v$  выполняют двойную функцию, что накладывает ряд ограничений на выбор локальной связи. В механической подсистеме (1) они играют роль фиктивных управлений и должны выбираться из класса непрерывных ограниченных функций, способных обеспечить точность (5). Эти сигналы для электрической подсистемы (2) служат задающими воздействиями  $v^*(t)$ , их отработка обеспечивается с помощью истинного управления  $u$ , следовательно, и производные этих сигналов должны быть ограниченными до  $k$ -го порядка включительно,  $k$  — относительная степень учитываемой динамической модели ИУ. В данном случае (2)  $k = 1$ , отсюда следует требование (3).

В замкнутой системе реализуется принцип декомпозиции и появляется возможность выбора различных комплектных ИУ, способных отработать задающие воздействия, сформированные в механической подсистеме с учетом требований (3). Решение именно этой проблемы не вызывает трудностей, так как модель исполнительных устройств (2) является элементарной. В то же время, принимая во внимание существенную неопределенность механической подсистемы (1), решение предварительных задач — синтез обобщенных моментов, обеспечивающих точность (5) с учетом требований (3), и формирование задающих сигналов для ИУ, — требует привлечения и разработки специальных подходов, которые представлены в § 2.

## 2. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СЛЕЖЕНИЯ В МЕХАНИЧЕСКОЙ ПОДСИСТЕМЕ

### 2.1. Представление модели манипулятора относительно ошибок слежения

К синтезу системы управления пространственной ориентацией рабочего органа возможно два подхода. Первый состоит в том, что с помощью обратных функций  $q_1(y_1)$  формируются задающие воздействия для обобщенных координат и на основе модели (1) реализуются известные методы синтеза, например, представленные в работах [5—9]. Однако обратная задача о положении имеет однозначное и аналитическое решение только для ограниченного класса простых манипуляторов [1]. Поэтому большую значимость приобретает второй, так называемый прямой метод решения [4, 10, 11], который реализуется в данной работе. Суть прямого метода заключается в том, что синтез выполняется на основе системы дифференциальных уравнений, записанной непосредственно относительно регулируемых переменных  $y_1 = h(q_1(t))$  и их производных.

С помощью диффеоморфной замены локальных переменных приведем механическую подсистему (1) к указанному виду:

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= J(q_1)q_2 = y_2, \quad \dot{y}_2 = J'(q_1, q_2)q_2 + J(q_1)\dot{q}_2 = \\ &= A_2(q_1, q_2, t) + B_2(q_1)v, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $J_{n \times n} = (\partial h / \partial q_1) = (J_{ij})$ ,  $J'_{n \times n} = (J'_{ij})$ ,  $J'_{ij} = (\partial J_{ij} / \partial q_1)q_2$ ; матрица  $B_2 = J(q_1)H^{-1}(q_1)$  является произведением невырожденных матриц, следовательно,  $\det B_{2(n \times n)}(q_1) \neq 0 \forall q_1 \in \bar{Q}$ ; ее элементы и элементы вектор-функции  $A_2 = J'(q_1, q_2)q_2 - B_2(q_1)[C(q_1, q_2)q_2 + G(q_1) - \eta(t)]$  содержат неизвестные, ограниченные составляющие.

Система (6) имеет блочно-канонический вид, что позволяет реализовать блочный принцип управления [2, 9—12]. Запишем первое уравнение системы (6) относительно ошибок слежения  $e_1 = y_1 - g \in R^n$ :  $\dot{e}_1 = y_2 - \dot{g}$ . Согласно идеологии блочного подхода, здесь вектор  $y_2$  трактуется как фиктивное управление и выбирается в виде  $y_2^* = \dot{g} - K_1 e_1$ , где  $K_1 = \text{diag}(k_{1i})$ ,  $k_{1i} = \text{const} > 0$ ,  $i = \overline{1, n}$ . Для обеспечения сформированной локальной связи нужно решить задачу стабилизации невязки между реальным и выбранным фиктивным управлением  $e_2 = y_2 - \dot{g} + K_1 e_1$ . После ука-



занных невырожденных замен переменных в силу системы (6) получим

$$\dot{e}_1 = -K_1 e_1 + e_2, \quad (7)$$

$$\dot{e}_2 = \varphi(t) + B_2(q_1)v, \quad (8)$$

где элементы вектор-функции  $\varphi(t) = A_2(q_1, q_2, t) - \ddot{g}(t) - K_1^2 e_1(t) + K_1 e_2(t)$  и их производные в силу априорных предположений ограничены:  $|\varphi_i^{(j)}(t)| \leq F_{ji} = \text{const } \forall t \geq 0, i = \overline{1, n}, j = 0, 1$ .

Линейная локальная связь  $y_2 = \dot{g} - K_1 e_1$  принята с целью обеспечить в подсистеме (7) экспоненциальную сходимость ошибок слежения в заданную окрестность нуля (5). Здесь и далее для формализации достаточных условий сходимости применяется второй метод Ляпунова, в котором также реализуется принцип декомпозиции. Так, для системы (7), (8) вводится квадратичная форма в виде суммы квадратичных форм

$$V = V_1 + V_2 = \frac{1}{2} e_1^T e_1 + \frac{1}{2} e_2^T e_2, \\ V_j = \sum_{i=1}^n V_{ji} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (e_{ji})^2, \quad j = 1, 2. \quad (9)$$

Для производной первого слагаемого квадратичной формы (9) справедлива оценка:  $\dot{V}_1 = e_1^T \dot{e}_1 = e_1^T (e_2 - K_1 e_1) \leq \sum_{i=1}^n |e_{1i}| (|e_{2i}| - k_{1i} |e_{1i}|)$ . Неравенство

$\dot{V}_1 < 0$  обеспечивается вне области  $|e_{1i}| \leq |e_{2i}|/k_{1i} \leq \delta_{1i}$ ,  $i = \overline{1, n}$  при выполнении условий  $k_{1i} > |e_{2i}|/\delta_{1i}$ , откуда при фиксированных значениях  $k_{1i}$  определяется точность

$$|e_{2i}(t)| \leq k_{1i} \delta_{1i} = \delta_{2i} = \text{const } \forall t \geq T, \quad i = \overline{1, n}, \quad (10)$$

которую требуется обеспечить при стабилизации переменных подсистемы (8). Коэффициенты  $k_{1i} > 0$  назначаются, исходя из заданных темпов затухания собственных движений ошибок слежения  $e_{1i}(t)$

(5), а именно  $|e_{1i}(0)| e^{-k_{1i} T} < \delta_{1i}$ , в которых учтены конструктивные ограничения (4) на переменные состояния механической системы  $|e_{1i}(t)| \leq 2Y_{0i}$ ,  $|\dot{e}_{1i}(t)| \leq 2Y_{1i} \forall t \geq 0$ :

$$\frac{1}{T} \ln \frac{|e_{1i}(0)|}{\delta_{1i}} < k_{1i} < \frac{Y_{1i}}{Y_{0i}}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (11)$$

Задача синтеза фиктивного управления  $v \in R^n$  в подсистеме (8), обеспечивающего точность (10), нетривиальна: входные каналы действия  $v$  пред-

ставлены матрицей  $B_2 = J(q_1)H^{-1}(q_1)$ , которая в отличие от матрицы  $H^{-1}(q_1) > 0$  не является знакоопределенной и содержит существенную параметрическую неопределенность, обусловленную неизвестной массой груза. Из-за невозможности сформировать комбинированное управление, будем искать закон фиктивного управления в виде  $v^*(e_2)$ . Класс допустимых локальных связей — непрерывные, ограниченные функции с ограниченными производными (3), с помощью которых можно обеспечить  $\varepsilon$ -инвариантность к имеющимся неопределенностям. Этим требованиям удовлетворяет  $S$ -образная гладкая сигма-функция. В отличие от обычно используемой линейной обратной связи с большими коэффициентами, необходимыми для подавления возмущений, сигма-функция всюду ограничена, что позволяет учесть ограничения на обобщенные моменты на стадии синтеза. В Приложении приведены базовые сведения о сигмоидальном управлении как допределной реализации разрывного управления, на основе которых далее получены основные результаты данной работы. В п. 2.2 представлена иерархическая процедура синтеза сигмоидальных обобщенных моментов, обеспечивающих заданную точность слежения (5) в условиях неопределенности матрицы перед фиктивным управлением. В п. 2.3 с помощью укороченного наблюдателя с сигмоидальными корректирующими воздействиями решена задача оценивания неизмеряемых переменных.

## 2.2. Иерархическая процедура синтеза сигмоидальных обобщенных моментов в условиях неопределенности входных каналов

Опишем процедуру синтеза сигмоидальных локальных связей  $v^*(e_2)$  в подсистеме (8), удовлетворяющих требованиям (3) и обеспечивающих точность (10) в условиях параметрической неопределенности матрицы  $B_2 = (b_{ij})$ . Рассматривается общий случай, когда матрица  $B_2$  невырожденная, не имеет преобладающей диагонали, аналитический вид ее элементов известен, их текущие значения неизвестны, но ограничены:

$$\bar{b}_{ijj} \leq |b_{ij}(q_1, t)| \leq \bar{b}_{ij} \quad \forall q_1 \in \bar{Q}_1 \subset Q_1, \quad \forall t \geq 0, \\ i, j = \overline{1, n}. \quad (12)$$

Будем обозначать миноры матрицы  $B_2$  различных порядков путем непосредственного перечисления сначала номеров строк, а потом номеров столбцов, на пересечении которых стоят образующие их элементы, например,  $\Delta_{1,1} = b_{11}$ ,  $\Delta_{12,12} = b_{11}b_{22} - b_{12}b_{21}$ ,  $\Delta_{13,12} = b_{11}b_{32} - b_{12}b_{31}$  и т. д. Для простоты изложения будем полагать, что все

главные диагональные миноры матрицы  $B_2$  не обращаются в нуль в рассматриваемой области и их знаки известны, т. е. в упрощенных обозначениях  $\Delta_{1,1} := \Delta_1 \neq 0$ ,  $\Delta_{12,12} := \Delta_2 \neq 0$ , ...,  $\Delta_{12\dots n, 12\dots n} := \Delta_n = \det B_2 \neq 0$  и

$$\text{sign} \Delta_i(q_1) = \text{const} \quad \forall q_1 \in \bar{Q}_1 \subset Q_1, \quad i = \overline{1, n}, \quad (13)$$

при этом в системе (8) порядковые номера управляемых переменных  $e_{2i}$  и управляющих ими переменных  $v_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ) совпадают. Заметим, что сопоставление управляемых и управляющих переменных будет иным, если окаймляющие миноры от первого до  $(n-1)$ -го порядка другой цепочки не обращаются в нуль. Так как матрица  $B_2$  полного ранга, такая цепочка миноров существует, но может быть разной в разных участках области  $\bar{Q}_1$ , что потребует логического переключения алгоритма управления в зависимости от разбиения области  $\bar{Q}_1$  (см. § 4).

Для подсистемы (8) с учетом обозначений (13) введем закон сигмоидального управления

$$v_i^* = -m_{2i} \text{sign} \tilde{b}_{ii} \sigma(k_{2i} e_{2i}), \quad m_{2i}, k_{2i} = \text{const} > 0, \\ i = \overline{1, n}, \quad (14)$$

$$\text{где } \sigma(k_{2i} e_{2i}) = \frac{2}{1 + \exp(-k_{2i} e_{2i})} - 1, \quad \tilde{b}_{11} = b_{11} = \Delta_1,$$

$\tilde{b}_{ii} = \Delta_i / \Delta_{i-1} \neq 0, i = \overline{2, n}$ . В силу условия (10), выражений (П.2) и (П.4) — см. Приложение — сразу составим неравенства для выбора коэффициентов наклона

$$|e_{2i}| \leq 3/k_{2i} \leq k_{1i} \delta_1 = \delta_{2i} \Rightarrow k_{2i} \leq 3/(k_{1i} \delta_1), \\ i = \overline{1, n}, \quad (15)$$

а для нахождения амплитуд сигмоидальных управлений (14), обеспечивающих сходимость переменных состояния в заданные окрестности нуля (15), воспользуемся идеологией метода иерархии управлений [10, 13], основанной на иерархии сходимости компонент вектора  $e_2$  в области (15), которая, например, совпадает с их порядковыми номерами:

$$|e_{21}| \leq \delta_{21} \quad \forall t > t_{21} > 0 \Rightarrow |e_{22}| \leq \delta_{22} \quad \forall t > t_{22} > t_{21} \Rightarrow \dots \\ \dots \Rightarrow |e_{2n}| \leq \delta_{2n} \quad \forall t > t_{2n} > t_{2, n-1}. \quad (16)$$

Идея заключается в том, что для замкнутой подсистемы (8), (14) последовательно, сверху вниз составляются неравенства типа (П.3) для выбора значений  $m_{2i}$ , при которых за конечное время последовательно обеспечивается стабилизация переменных состояния с заданной точностью (16). Как показано в Приложении, при этом уравнения ста-

тики  $\dot{e}_{2i} = 0$ ,  $\ddot{e}_{2i} = 0$  выполняются с некоторой точностью:  $|\dot{e}_{2i}| \leq \beta_{1i}$ ,  $|\ddot{e}_{2i}| \leq \beta_{2i} \quad \forall t \geq t_{2i}, i = \overline{1, n}$ . Тот факт, что верхние оценки областей сходимости производных не зависят непосредственно от параметров  $m_{2i}$ ,  $k_{2i}$  (см. (П.5), (П.7)), позволяет после анализа каждого  $i$ -го уравнения выразить из него  $v_i$  и подставить в нижние уравнения подсистемы (8) с номерами  $i+1, i+2, \dots, n$ . Таким образом, управления  $v_i, i = \overline{1, n-1}$  последовательно исключаются из подсистемы (8), а для матрицы  $B_2$  в режиме off-line будет получен аналитически верхнетреугольный вид.

Формализуем указанный алгоритм. Как известно [14], приведение матрицы  $B_2$  методом Гаусса к верхнетреугольному виду при выполнении условий (13) равносильно ее умножению слева на преобразующую матрицу  $T_{n \times n}$ ,  $\det T \neq 0$ , которая является произведением нижнетреугольных матриц с единицами на главной диагонали:  $T_{n \times n} = T_{n-1} T_{n-2} \dots T_2 T_1$ ,  $\det T_i \neq 0$ .

Пусть  $T_{ij}$  —  $j$ -й  $n$ -мерный столбец матрицы  $T_i = (T_{i1} T_{i2} \dots T_{in}) \in R^{n \times n}, i = \overline{1, n-1}$ , во всех матрицах все столбцы  $T_{ij}$  при  $i \neq j$  единичные, т. е. в них  $j$ -й элемент равен единице, остальные равны нулю;  $T_{ii} = \text{col}(a_{1i}, a_{2i}, \dots, a_{ni})$ , где  $a_{ki} = 0$  при  $1 \leq k < i$ ;  $a_{kk} = 1$ , при  $i < k \leq n$  имеем:  $a_{ki} = -\Delta_{12\dots i-1, k; 12\dots i-1, i} / \Delta_i$ , в частности,

$$a_{k1} = -\Delta_{k,1} / \Delta_1 \Rightarrow T_{11} = \\ = \text{col}(1, -b_{21}/b_{11}, -b_{31}/b_{11}, \dots, -b_{n1}/b_{11}); \\ a_{k2} = -\Delta_{1k,12} / \Delta_2 \Rightarrow T_{22} = \\ = \text{col}(0, 1, -\Delta_{13,12} / \Delta_2, -\Delta_{14,12} / \Delta_2, \dots, -\Delta_{1n,12} / \Delta_2), \dots; \\ T_{n-1, n-1} = \\ = \text{col}(0, 0, \dots, 0, 1, -\Delta_{12\dots n-2, n; 12\dots n-2, n-1} / \Delta_{n-1}).$$

Соответственно, матрица  $T$  также является нижнетреугольной с единицами на главной диагонали, ее элементы  $T = (\tilde{a}_{ij})$  определяются рекуррентно:

$$\tilde{a}_{ij} = 0 \quad \forall i > j, \quad \tilde{a}_{ii} = 1, \quad \tilde{a}_{ij} = \sum_{k=i-1}^j a_{ik} \tilde{a}_{kj} \\ \forall i > j, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, n},$$

например  $\tilde{a}_{i, i-1} = a_{i, i-1}, i = \overline{2, n}$ ;  $\tilde{a}_{i, i-2} = a_{i, i-1} \times \tilde{a}_{i-1, i-2} + a_{i, i-2}, i = \overline{3, n}$ .

Умножив обе части уравнения (8) на матрицу  $T$ , получим:

$$T \dot{e}_2 = T \Phi + T B_2 v^* \Rightarrow \dot{e}_2 = \Psi + \Upsilon + \tilde{B}_2 v^*, \quad (17)$$





где  $\psi(t) = T\varphi$ ;  $\gamma = -\tilde{T}\dot{e}_2$ ,  $\tilde{T} = T - E_n$ ,  $E_n$  — единичная матрица, т. е.  $\gamma = \text{col}(0, \gamma_2, \dots, \gamma_n)$ ,  $\gamma_i = -\sum_{j=1}^{i-1} \tilde{a}_{ij} \dot{e}_{2j}$ ;  $\tilde{B}_2 = TB_2 = (\tilde{b}_{ij})$  — верхнетреугольная матрица, первая строка которой совпадает с первой строкой матрицы  $B_2$ ;  $\tilde{b}_{ij} = 0 \quad \forall i > j$ ;  $\tilde{b}_{ii} = \Delta_i/\Delta_{i-1} \neq 0$  (13); при  $2 \leq i < j$  имеем  $\tilde{b}_{ij} = \Delta_{12\dots i-1, i, 12\dots j-1, j}/\Delta_{i-1}$ . В силу ограничений (12) вычислим нижние оценки диагональных и верхние оценки остальных ненулевых элементов верхнетреугольной матрицы  $\tilde{B}_2$ :

$$\forall q_1 \in \bar{Q}_1 \subset Q_1, \forall t \geq 0: \tilde{b}_{ii} \leq |\tilde{b}_{ii}(q_1, t)|, \quad i = \overline{1, n},$$

$$|\tilde{b}_{ii}(q_1, t)| \leq \bar{\tilde{b}}_{ii}, \quad 2 \leq i < j.$$

Последовательно, сверху вниз составим аналитические неравенства для выбора амплитуд сигмоидальных управлений (14) на основе системы (17). При этом нижняя оценка  $m_{2i}$ ,  $i = \overline{1, n-1}$  зависит от  $m_{2j}$ ,  $j = \overline{i+1, n}$ ; на  $i$ -м шаге ( $i = \overline{2, n}$ ) функция  $\gamma_i$  и ее производная считаются ограниченными аналогично выражениям (П.5) и (П.6) с учетом неравенств (15). Достаточные условия сходимости переменных в последовательности (16) получим из оценок производных второго слагаемого квадратичной формы (9):

$$\begin{aligned} \dot{V}_{21} &= e_{21} \dot{e}_{21} = \\ &= e_{21} \left( \varphi_1 + \sum_{j=2}^n b_{1j} v_j^* - b_{11} m_{21} \text{sign} b_{11} \sigma(k_{21} e_{21}) \right) \leq \\ &\leq |e_{21}| \left( |\varphi_1| + \sum_{j=2}^n \bar{b}_{1j} m_{2j} - 0,9 \bar{b}_{11} m_{21} \right) < 0 \Rightarrow \\ &\Rightarrow m_{21} > 1,1 \left( |\varphi_1| + \sum_{j=2}^n \bar{b}_{1j} m_{2j} \right) / \bar{b}_{11}; \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_{2i} &= e_{2i} \dot{e}_{2i} = e_{2i} \left( \varphi_i + \gamma_i + \sum_{j=i+1}^n \tilde{b}_{2j} v_j^* - \right. \\ &\quad \left. - \tilde{b}_{ii} m_{2i} \text{sign} \tilde{b}_{ii} \sigma(k_{2i} e_{2i}) \right) \leq \\ &\leq |e_{2i}| \left( |\varphi_i| + |\gamma_i| + \sum_{j=i+1}^n \bar{\tilde{b}}_{2j} m_{2j} - 0,9 \bar{\tilde{b}}_{ii} m_{2i} \right) < 0 \Rightarrow \\ &\Rightarrow m_{2i} > 1,1 \left( |\varphi_i| + |\gamma_i| + \sum_{j=i+1}^n \bar{\tilde{b}}_{2j} m_{2j} \right) / \bar{\tilde{b}}_{ii}, \\ &\quad i = \overline{2, n-1}. \end{aligned}$$

После непосредственного выбора численного значения  $m_{2n}$  на основе неравенства

$$\begin{aligned} \dot{V}_{2n} &= e_{2n} \dot{e}_{2n} = e_{2n} (\varphi_n + \gamma_n + \\ &+ \tilde{b}_{nn} m_{2n} \text{sign} \tilde{b}_{nn} \sigma(k_{2n} e_{2n})) \leq |e_{2n}| (|\varphi_n| + |\gamma_n| - \\ &- 0,9 \bar{\tilde{b}}_{nn} m_{2n}) < 0 \Rightarrow m_{2n} > 1,1 (|\varphi_n| + |\gamma_n|) / \bar{\tilde{b}}_{nn} \end{aligned} \quad (19)$$

обратным ходом, снизу вверх последовательно выбираются значения  $m_{2i}$ ,  $i = \overline{n-1, 1}$ . При выборе параметров сигмоидального управления в виде (15), (18), (19) квадратичная форма (9) является функцией Ляпунова для замкнутой системы (7), (8), (14), что гарантирует решение поставленных задач (10) и, следовательно, (5).

Для сигмоидальных фиктивных управлений (14) ограничения (3), которые служат основой для выбора ИУ, определяются в силу оценок (П.1) и формулы (8):

$$\begin{aligned} |v_i^*(t)| &\leq m_{2i} = \bar{v}_{0i}, \quad |v_i^*(t)| \leq \left| \frac{\partial v_i^*(e_2)}{\partial e_{2i}} \right| |\dot{e}_{2i}| \leq \\ &\leq 0,5 m_{2i} k_{2i} \left( F_{0i} + \sum_{j=1}^n \bar{\tilde{b}}_{ij} m_{2j} \right) = \bar{v}_{1i} \\ &\forall t \geq 0, \quad i = \overline{1, n}. \end{aligned} \quad (20)$$

### 2.3. Синтез укороченного наблюдателя состояний с сигмоидальными корректирующими воздействиями

Для решения задачи слежения в ИУ требуется сформировать задающий сигнал  $v^*(e_2(t))$  (14). Вычисление в реальном времени сигнала  $e_1(t) = y_2 + K_1 e_1 - \dot{g} = J(q_1) q_2 + K_1 (y_1 - g) - \dot{g}$  требует слишком много информации: сигнал  $e_1(t) = h(q_1(t)) - g(t)$  можно вычислить по измеряемым сигналам  $g(t)$  и  $q_1(t)$ , но возникает проблема измерений или оценки  $q_2(t)$  и  $\dot{g}(t)$ . Покажем, что можно снизить требования к объему априорной информации и существенно упростить структуру регулятора, если непосредственно оценивать сигнал  $e_2(t)$  с помощью укороченного наблюдателя состояний, построенного на основе подсистемы (7) в виде

$$\dot{z} = -K_1 z + v, \quad (21)$$

где  $z \in R^n$  — вектор состояния,  $v \in R^n$  — вектор корректирующих воздействий наблюдателя. Задача наблюдения сводится к задаче стабилизации системы, записанной относительно ошибки наблю-

дения  $\varepsilon = e_1 - z$ ,  $\varepsilon \in R^n$ , которая в силу (7) и (21) имеет вид

$$\dot{\varepsilon} = -K_1\varepsilon + e_2 - v. \quad (22)$$

Как показано в Приложении, выбором параметров  $m_i$ ,  $k_i = \text{const} > 0$ ,  $i = \overline{1, n}$  сигмоидальных корректирующих воздействий

$$v = M\sigma(K\varepsilon), \quad M = \text{diag}(m_i), \quad K = \text{diag}(k_i), \\ \sigma(K\varepsilon) = \text{col}(\sigma(k_1\varepsilon_1), \dots, \sigma(k_n\varepsilon_n)) \quad (23)$$

в замкнутой системе (22), (23) за заданное время  $t > t_0 > 0$  с заданной точностью можно обеспечить стабилизацию не только ошибок наблюдения, но и их производных

$$|\varepsilon_i(t)| \leq \alpha_i, \quad |\dot{\varepsilon}_i| \leq (k_{1i} + 1)\alpha_i \Rightarrow |e_{2i} - v_i| \leq \alpha_i \ll \delta_{2i}, \\ i = \overline{1, n}, \quad (24)$$

тогда оценки неизмеряемых сигналов  $e_2(t)$  дадут непосредственно сигмоидальные корректирующие воздействия  $v(t) \approx e_2(t) \forall t > t_0$ .

Анализ квадратичной формы  $V = \frac{1}{2}\varepsilon^T\varepsilon + \frac{1}{2}\dot{\varepsilon}^T\dot{\varepsilon}$  выполним на основе системы  $\dot{\varepsilon} = -K_1\varepsilon + e_2 - M\sigma(K\varepsilon)$ ,  $\ddot{\varepsilon} = -\left(K_1 + M\frac{\partial\sigma(K\varepsilon)}{\partial\varepsilon}\right)\dot{\varepsilon} + \varphi(t) + B_2(q_1)v$ , полученной в силу (22), (23) и (8). Для производных квадратичной формы с учетом оценок (П.1) и выражений (П.2) имеем:

$$\varepsilon^T\dot{\varepsilon} \leq \sum_{i=1}^n |\varepsilon_i|(-k_{1i}|\varepsilon_i| + |e_{2i}| - 0,9m_i) < 0$$

вне окрестности  $|\varepsilon_i(t)| \leq 3/k_i \leq \alpha_i$  при  $m_i > 1,1|e_{2i}|$ , где  $|e_{2i}(t)| \leq 2Y_{2i} + 2k_{1i}Y_{1i} \forall t \geq 0$ ,  $\forall i = \overline{1, n}$ ;

$$\dot{\varepsilon}^T\ddot{\varepsilon} \leq \sum_{i=1}^n |\dot{\varepsilon}_i| \left( |\varphi_i| + \sum_{j=1}^n \bar{b}_{ij}m_{2j} - (k_{1i} + 0,1k_im_i)|\dot{\varepsilon}_i| \right) < 0$$

вне окрестности  $|\dot{\varepsilon}_i| \leq (k_{1i} + 1)\alpha_i$  при  $k_i > k_i^* = 10 \left( |\varphi_i| + \sum_{j=1}^n \bar{b}_{ij}m_{2j} \right) / (m_i(k_{1i} + 1)\alpha_i) - 10k_{1i}/m_i$ ,  $\forall i = \overline{1, n}$ . Требования (24) будут выполнены при следующем выборе параметров (23):

$$m_i > 2,2(Y_{2i} + k_{1i}Y_{1i}), \quad k_i > \max\{3/\alpha_i, k_i^*\}, \quad i = \overline{1, n}.$$

### 3. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СЛЕЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОДСИСТЕМЕ

На втором этапе с помощью истинного, разрывного управления  $u$  требуется обеспечить стабилизацию ошибки слежения  $e_3 = v - v^* \in R^n$  — невязки между истинным  $v(t)$  и сформированным  $v^*(e_2(t))$  (14) фиктивным управлением. В силу (2) дифференциальное уравнение относительно ошибки слежения имеет вид

$$\dot{e}_3 = -Ae_3 + f(t) + Bu,$$

где  $f(t) = -Av^*(t) - Dq_2(t) - \dot{v}^*(t)v$ ,  $A = \text{diag}(a_i)$ ,  $B = \text{diag}(b_i)$ ,  $D = \text{diag}(d_i)$ ,  $a_i, b_i, d_i = \text{const} > 0$ , элементы вектор-функции  $f = \text{col}(f_1, \dots, f_n)$  в силу  $q_2 \in Q_2 \subset R^n$  и (20) ограничены. Базовый закон разрывного управления с постоянной амплитудой

$$u = -K_3\text{sign}e_3, \quad (25)$$

где  $K_3 = \text{diag}(k_{3i})$ ,  $k_{3i} = \text{const} > 0$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $\text{sign}e_3 = \text{col}(\text{sign}e_{31}, \dots, \text{sign}e_{3n})$ , приводит к замкнутой подсистеме  $\dot{e}_3 = -Ae_3 + f(t) - BK_3\text{sign}e_3$ . При выполнении достаточных условий  $e_3^T\dot{e}_3 < 0$  [13] на многообразии  $e_3 = 0$  за конечное время возникнет скользящий режим. Неравенства для выбора амплитуды разрывного управления имеют вид

$$b_ik_{3i} > |f_i(t)|, \quad |f_i(t)| \leq a_i\bar{v}_{0i} + d_i|q_{2i}| + \bar{v}_{1i} \quad \forall t \geq 0, \\ i = \overline{1, n} \quad (26)$$

и служат основой для выбора ИУ, способных отработать задающие воздействия (14), (20).

В замкнутой системе управления с наблюдателем (21), (23) базовый закон разрывного управления (25) реализуется в виде  $u = -K_3\text{sign}(v(t) - v^*(v))$ .

Использование разрывного управления и организация в замкнутой системе скользящих режимов служит эффективным инструментом декомпозиции, обеспечения инвариантности к внешним возмущениям и робастности к параметрическим и функциональным неопределенностям, принадлежащим пространству управления [13]. Синтез разрывных управлений вполне естественен в электрических ИУ, выполненных на базе безынерционных силовых элементов, которые функционируют исключительно в ключевом режиме. Однако эти алгоритмы нельзя задействовать для формирования локальных обратных связей из-за наличия ограничений на фазовые переменные. Именно этот факт обусловил введение в качестве альтернативы функции знака  $S$ -образной, гладкой сигма-функ-



ции, использование которой позволило обеспечить непрерывность и ограниченность сигналов, а также сохранить преимущества систем с разрывными управлениями в допредельной ситуации.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Разработанные алгоритмы применены для решения задачи управления движением конечной точки трехзвенного манипулятора типа UMS-2 в цилиндрической системе координат  $y_1 = \text{col}(x, y, z) \in R^3$ . Обобщенные координаты такого манипулятора  $q_1 = \text{col}(q_{11}, q_{12}, q_{13})$  совершают вращательные, вертикальные линейные и горизонтальные линейные движения соответственно. Матрицы механической подсистемы (1) имеют вид [15]:

$$H_{3 \times 3} = \text{diag}(H_i) > 0,$$

$$H_1 = (m'_3 + m_3)q_{13}^2 + m'_3 l_{q_{13}} + m'_3 \frac{l^2}{3} + I_1 + I_2,$$

$$H_2 = m_2 + m'_3 + m_3, \quad H_3 = m'_3 + m_3; \quad (27)$$

$$Cq_2 = \text{col}(C_1, C_2, C_3),$$

$$C_1 = 2 \left[ (m'_3 + m_3)q_{13} - m'_3 \frac{l}{2} \right] q_{23} q_{21}, \quad C_2 = 0,$$

$$C_3 = \left[ m'_3 \frac{l}{2} - (m'_3 + m_3)q_{13} \right] q_{21}^2;$$

$$G = \text{col}(G_1, G_2, G_3), \quad G_1 = 0,$$

$$G_2 = (m_2 + m'_3 + m_3)g, \quad G_3 = 0,$$

где  $I_1 = 0,03 \text{ [кг} \cdot \text{м}^2]$  — приведенный момент инерции частей манипулятора, участвующих во вращательном движении;  $m_2 = 6,5 \text{ [кг]}$  — приведенная масса частей, участвующих в поступательном вертикальном движении;  $I_2 = 0,06 \text{ [кг} \cdot \text{м}^2]$  — момент инерции этих частей, приведенный к вертикальной оси;  $m'_3 = 5,5 \text{ [кг]}$  — масса руки, которая представлена однородным стержнем длиной  $l = 0,9 \text{ [м]}$ ;  $m_3(t) = [0,1 \div 3] \text{ [кг]}$  — точечная масса схвата с грузом;  $g = 9,8 \text{ [м/с}^2]$  — ускорение свободного падения. Конструктивные ограничения  $Q_1: 0,3 \leq q_{12}(t) \leq 1,9$ ,  $0,1 \leq q_{13}(t) \leq 1,8 \text{ [м]}$ ;  $Q_2: |q_{21}(t)| \leq 1 \text{ [рад/с]}$ ;  $|q_{22}(t)| \leq 1$ ,  $|q_{23}(t)| \leq 1 \text{ [м/с]}$ . При моделировании масса схвата с грузом  $m_3$  и внешние возмущения  $\eta = \text{col}(\eta_1, \eta_2, \eta_3)$  полагались кусочно-гладкими периодическими функциями времени  $t \geq 0 \text{ [с]}$  с указанными главными периодами:

$$m_3 = 2 \cos \frac{t}{2}, \quad 0 \leq t < 3; \quad \eta_1 = \begin{cases} 0, & 0 \leq t \leq 2; \\ 0,2, & 2 < t < 4; \end{cases}$$

$$\eta_2(t) = 0; \quad \eta_3(t) = 0,1t - 0,2, \quad 0 \leq t < 3.$$

Требовалось обеспечить движение конечной точки манипулятора по пространственной траектории, заданной параметрически в системе координат схвата

$$x: g_1 = (0,2 \cos 0,4t + 0,5) \cos 0,4t;$$

$$y: g_2 = (0,2 \cos 0,4t + 0,5) \sin 0,4t;$$

$$z: g_3 = 0,4 \sin 0,4t + 1.$$

Выходные переменные системы (1), (27) являются функциями обобщенных координат

$$y_1 = \text{col}(x, y, z): x = q_{13} \cos q_{11}, y = q_{13} \sin q_{11}, z = q_{12},$$

в представлении системы (29) в виде (7), (8) матрицы  $J = (\partial y_i / \partial q_j)$  и  $B_2$  имеют вид:

$$J = \begin{pmatrix} -q_{13} \sin q_{11} & 0 & \cos q_{11} \\ q_{13} \cos q_{11} & 0 & \sin q_{11} \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix},$$

$$B_2 = JH^{-1} = \begin{pmatrix} -q_{13} \sin q_{11} H_1^{-1} & 0 & \cos q_{11} H_3^{-1} \\ q_{13} \cos q_{11} H_1^{-1} & 0 & \sin q_{11} H_3^{-1} \\ 0 & H_2^{-1} & 0 \end{pmatrix}, \quad (28)$$

$$\det J = q_{13} \neq 0, \quad 0,08 \leq H_1^{-1} \leq 0,47,$$

$$0,07 \leq H_2^{-1} \leq 0,08, \quad 0,12 \leq H_3^{-1} \leq 0,18.$$

В силу структуры матрицы  $B_2$  (28) в подсистеме (8) переменная  $e_{23}$  независимо управляется с помощью фиктивного управления

$$v_2^* = -m_{22} \sigma(k_{23} e_{23}), \quad m_{22} > 1, 1/\Phi_3 \bar{H}_2, \\ k_{23} \geq 3/(k_{13} \delta_1). \quad (29)$$

Для управления переменными  $e_{21}$  и  $e_{22}$  применяем метод иерархии (16). Условия типа (13) не выполняются  $\forall q_{11}$ , поэтому разобьем главный период  $0 \leq q_{11}(t) \leq 2\pi$  на 4 интервала знакопостоянства элементов  $\Delta_1 = b_{11}$  и  $\Delta_{1,3} = b_{13}$ ,  $\Delta_2 = \Delta_{12,13} = -q_{13} H_1^{-1} H_3^{-1} < 0$ , где сопоставление управляемых  $e_{21}$ ,  $e_{22}$  и управляющих  $v_1$ ,  $v_3$  переменных будет разным, а именно:

$$1) \quad q_{11} \in [0; \pi/4], (7\pi/4; 2\pi]: v_1^* = -m_{21} \sigma(k_{22} e_{22}),$$

$$v_3^* = -m_{23} \sigma(k_{21} e_{21}); \quad (30)$$

$$2) \quad q_{11} \in (\pi/4; 3\pi/4]: v_1^* = +m_{21} \sigma(k_{21} e_{21}),$$

$$v_3^* = -m_{23} \sigma(k_{22} e_{22});$$



3)  $q_{11} \in (3\pi/4; 5\pi/4]$ :  $v_1^* = +m_{21}\sigma(k_{22}e_{22})$ ,  $v_3^* = +m_{23}\sigma(k_{21}e_{21})$ ;

4)  $q_{11} \in (5\pi/4; 7\pi/4]$ :  $v_1^* = -m_{21}\sigma(k_{21}e_{21})$ ,  $v_3^* = +m_{23}\sigma(k_{22}e_{22})$ ;  $k_{2j} \leq 3/(k_{1j}\delta_1)$ ,  $j = 1, 3$ .

Во 2-м и 4-м интервалах  $\text{sign} b_{11} = \text{const}$ , за основу принимается главная диагональ, в процессе преобразования матрицы  $B_2$  обнуляется элемент  $\tilde{b}_{21}$ . Аналогично условиям сходимости (18) имеем:

$$\begin{aligned} m_{21(2,4)} &> 1,1(|\varphi_1| + \bar{b}_{13} m_{23(2,4)})/\bar{b}_{11}; \\ m_{23(2,4)} &> 1,1(\bar{b}_{11}|\varphi_2| + \bar{b}_{21}(|\dot{e}_{21}| + |\varphi_1|))/\bar{\Delta}_{12,13}. \end{aligned} \quad (31)$$

В 1-м и 3-м интервалах  $\text{sign} b_{13} = \text{const}$ , за основу принимается побочная диагональ, в процессе преобразования матрицы  $B_2$  обнуляется элемент  $\tilde{b}_{23}$ :

$$\begin{aligned} m_{23(1,3)} &> 1,1(|\varphi_1| + \bar{b}_{11} m_{21(1,3)})/\bar{b}_{13}; \\ m_{21(1,3)} &> 1,1(\bar{b}_{13}|\varphi_2| + \bar{b}_{23}(|\dot{e}_{21}| + |\varphi_1|))/\bar{\Delta}_{12,13}. \end{aligned} \quad (32)$$

Для математической модели (7), (8), составленной для манипулятора (27), (28) с сигмоидальными фиктивными управлениями (29), (30), ставилась задача синтеза разрывного управления (25) и

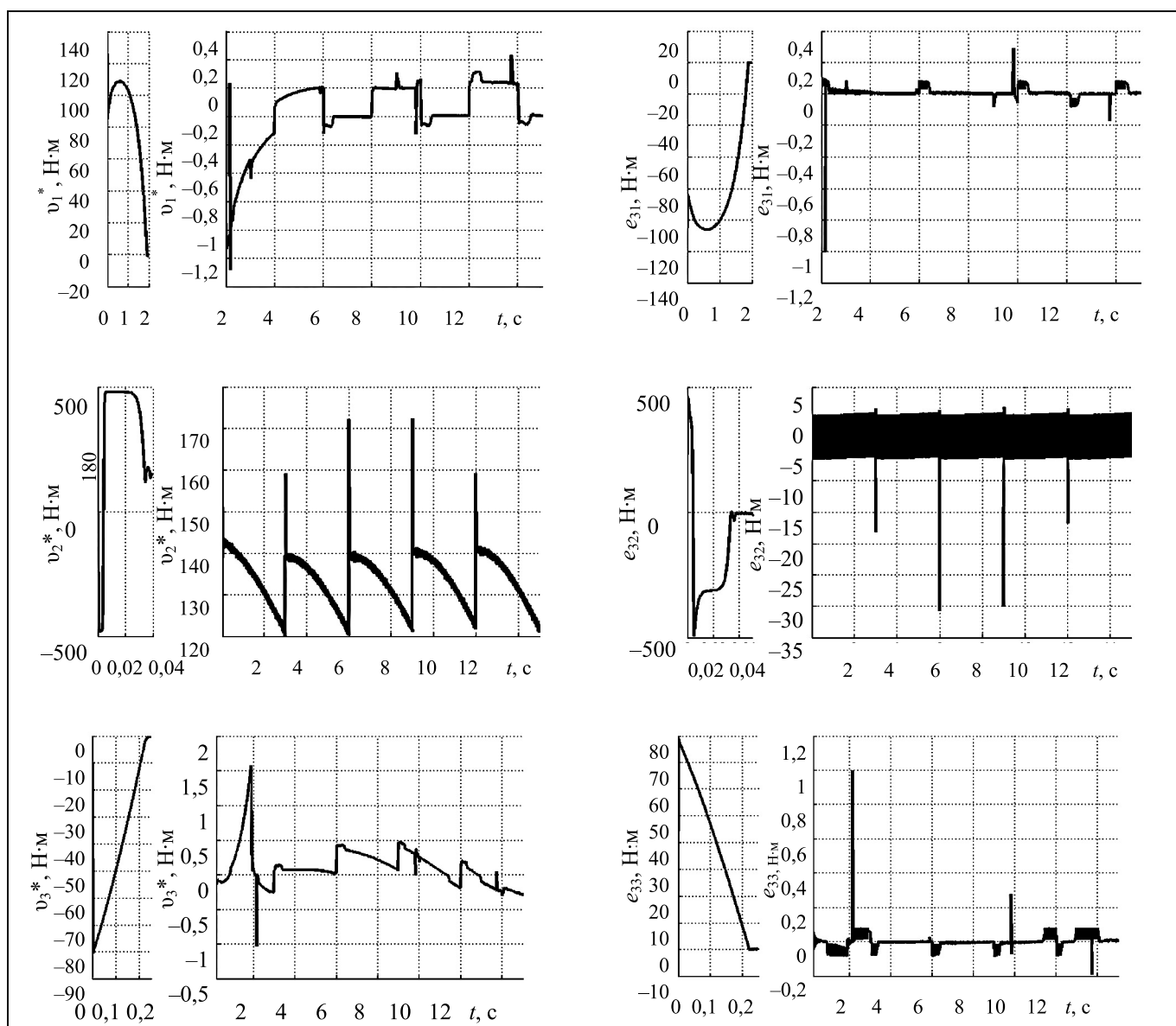


Рис. 1. Графики задающих воздействий  $v_i^*(t)$  и ошибок слежения  $e_{3i}(t) = v_i(t) - v_i^*(t)$ ,  $i = 1, 2, 3$ , в электрической подсистеме

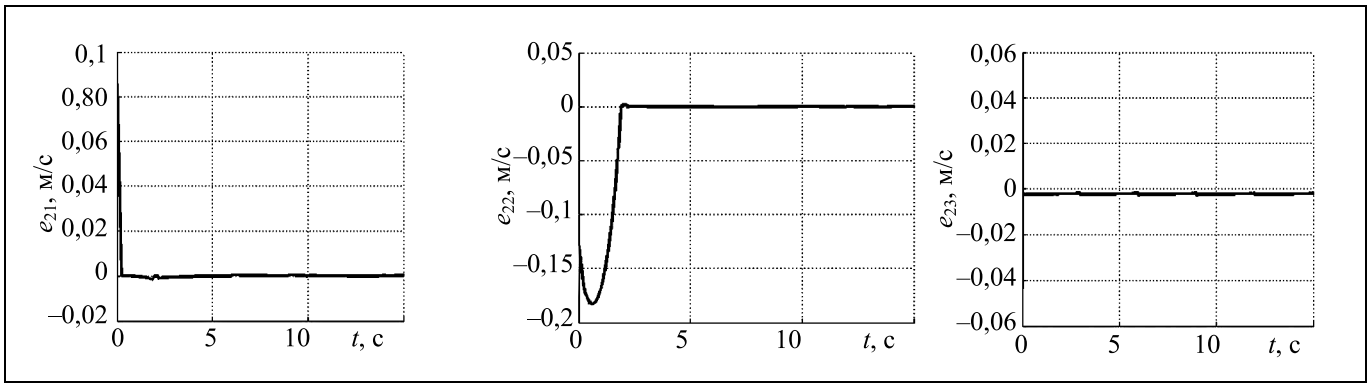


Рис. 2. Графики невязок  $e_{2i}(t) = y_{2i} - \dot{g}_i + k_{1i}e_{1i}$ ,  $i = 1, 2, 3$

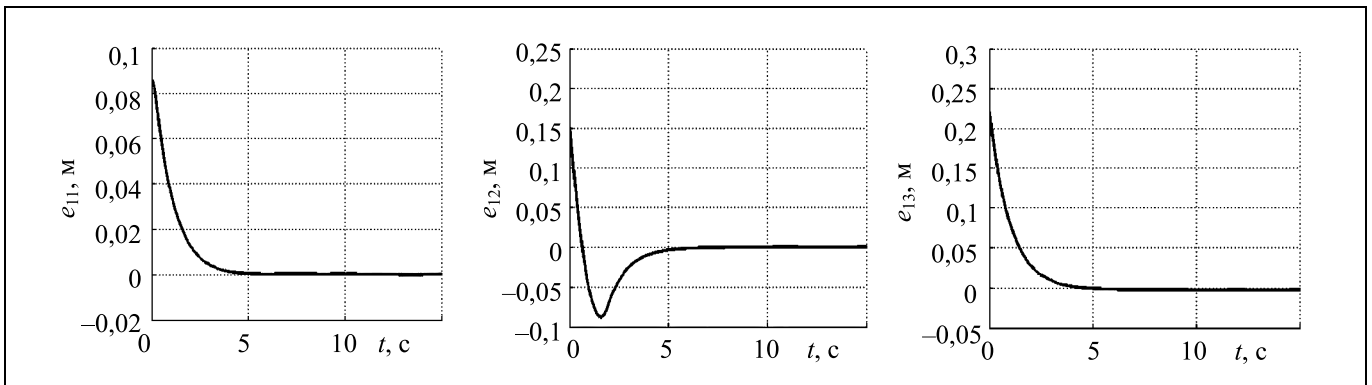


Рис. 3. Графики ошибок слежения  $e_{1i}(t) = y_{1i}(t) - g_i(t)$ ,  $i = 1, 2, 3$ , в механической подсистеме

выбора ИУ (2), обеспечивающих решение задачи слежения (5), где

$$|e_{1i}(t)| \leq 0,05 \text{ [м]} \quad \forall t \geq 3 \text{ [с]}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (33)$$

После подстановки параметров манипулятора в неравенства (11), (15), (29), (31) и (32) были приняты коэффициенты локальных связей  $k_{1i} = 1$ ,  $i = \overline{1, 3}$ ,  $k_{21} = k_{22} = 10$ ,  $k_{23} = 250$ ,  $m_{21(2,4)} = m_{23(1,3)} = 180$ ,  $m_{23(2,4)} = m_{21(1,3)} = 120$ ,  $m_{22} = 880$ , на основе которых с учетом ограничений (20), (26) были выбраны ИУ (2) с параметрами

$$A = \text{diag}(430, 430, 430), \quad D = \text{diag}(2, 8, 2),$$

$$B = \text{diag}(42, 3000, 58), \quad k_{3i} = 24 \text{ [В]}.$$

Замкнутая система (1), (2), (27) с разрывным управлением (25) и наблюдателем (21) моделировалась в среде Matlab-Simulink. Выбор параметров сигмоидальных корректирующих воздействий (23)  $M = \text{diag}(6, 37, 4)$ ,  $k_i = 1000$ ,  $i = 1, 2, 3$ , обеспечил оценки  $|e_{2i}(t) - v_i(t)| \leq 0,00014 \quad \forall t > t_0 = 0,002 \text{ [с]}$ , на

их основе и логики переключений (29), (30) сформированы фиктивные сигмоидальные управления  $v^*(v(t))$ . Данные сигналы для всех степеней подвижности, а также графики ошибок слежения  $e_{3i}(t) = v_i(t) - v_i^*(t)$ ,  $i = 1, 2, 3$  в ИУ показаны на рис. 1. Из-за достаточно больших амплитуд переключений разрывных управлений  $b_1 k_{31} = 1008$ ,  $b_2 k_{32} = 72\,000$ ,  $b_3 k_{33} = 1392$  наблюдается так называемый реальный скользящий режим, который возникает за конечное время в пограничном слое, ширина которого прямо пропорциональна амплитуде переключений:  $|e_{31}(t)| \leq 0,1$ ,  $|e_{32}(t)| \leq 5$ ,  $|e_{33}(t)| \leq 0,1 \text{ [Нм]}$ . Существенно, что достаточно значимые ошибки слежения в ИУ не оказывают влияния на точность слежения в механической подсистеме (33), так как при синтезе обобщенных моментов ставилась задача обеспечения  $\varepsilon$ -инвариантности к имеющимся неопределенностям.

На рис. 2 и 3 представлены графики переменных подсистем (8) и (7) соответственно — невязок  $e_{2i}(t)$  и ошибок слежения  $e_{1i}(t) = y_{1i}(t) - g_i(t)$ ,

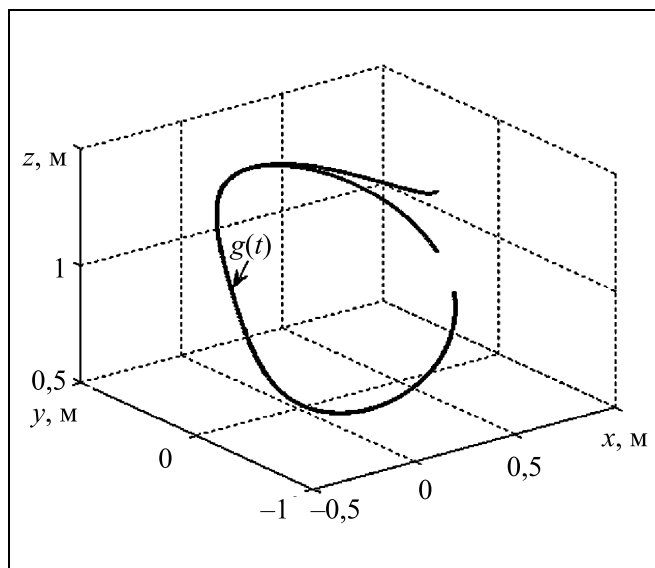


Рис. 4. Заданная  $g(t)$  и реальная  $y_1(y)$  пространственные траектории конечной точки манипулятора

$i = 1, 2, 3$ . Как видим, поставленная цель управления (33) обеспечивается. Тот факт, что неравенства (11), (15), (18), (19) для выбора коэффициентов локальных связей получены из достаточных (избыточных) условий, обеспечивает в установившемся режиме существенно более высокую по сравнению с поставленной целью (33) точность слежения:  $|e_{11}(t)| \leq 1,7 \cdot 10^{-4}$ ,  $|e_{12}(t)| \leq 1,47 \cdot 10^{-4}$ ,  $|e_{13}(t)| \leq 0,0022$  [м]. На рис. 4 показаны заданная пространственная траектория и траектория конечной точки манипулятора. Результаты моделирования подтверждают эффективность разработанного подхода.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной результат данной работы — иерархическая процедура синтеза фиктивных сигмоидальных управлений в условиях неполной информации о входных каналах (см. п. 2.2), представляется перспективным и может быть распространен на общий случай параметрически неопределенных квазилинейных систем, сохраняющих структурные свойства управляемости при допустимой вариации параметров, и приводимых к блочному виду [16]. В отличие от обычно используемых линейных управлений с большими коэффициентами, приводящих к перерегулированию в начале переходного процесса, синтез сигмоидальных локальных связей обеспечивает  $\varepsilon$ -инвариантность по от-

ношению к неопределенностям при соблюдении в процессе управления ограничений на фазовые переменные и их производные.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Рассмотрим нелинейную гладкую ограниченную сигма-функцию  $\sigma(kx) = 2/(1 + e^{-kx}) - 1$ ,  $k = \text{const} > 0$ , которая является допредельной реализацией функции знака  $y = \text{sign} x$  в смысле:  $\sigma(-kx) = -\sigma(kx)$ ,  $\sigma(kx) \underset{x \rightarrow 0}{\sim} kx/2$ ,  $\sigma(kx) \underset{k \rightarrow +\infty}{\sim} \text{sign} x$ . Первая производная сигма-функции — положительная ограниченная четная функция  $\sigma'(kx) = k(1 - \sigma^2(kx))/2$ ; вторая производная — ограниченная нечетная функция  $\sigma''(kx) = -k\sigma'(kx)\sigma(kx)$ . Для сигма-функции и ее первой производной в указанных интервалах справедливы оценки:

$$\sigma(k\Delta) < |\sigma(kx)| < 1, \quad 0 < \sigma'(kx) < \sigma'(k\Delta) \quad \forall |x| > \Delta > 0;$$

$$\sigma(k\Delta)|x|/\Delta \leq |\sigma(kx)| \leq \sigma(k\Delta),$$

$$0 < \sigma'(k\Delta) \leq \sigma'(0) = k/2 \quad \forall |x| \leq \Delta. \quad (\text{П.1})$$

Из оценок (П.1) следует, что при  $|x| > \Delta$  сигма-функция близка к постоянной функции, а при  $|x| \leq \Delta$  — к линейной. В качестве границы указанного разделения сигма-функции при  $x \geq 0$  рекомендуется принять точку  $k\Delta = c$ , где  $\pm c \approx \pm 3$  — абсциссы вершин сигма-функции, в которых ее кривизна достигает максимума [2, 3], при этом

$$\sigma(\pm 3) \approx \pm 0,9, \quad \sigma'(\pm 3) \approx 0,1k, \quad k\Delta \approx 3. \quad (\text{П.2})$$

Рассмотрим возмущенную систему первого порядка  $\dot{x} = f(t) - u$ , где  $x \in R$  — переменная состояния,  $u = M\sigma(kx)$  — сигмоидальное управление с параметрами  $M$ ,  $k = \text{const} > 0$ ,  $f(t)$  — неизвестная, ограниченная функция времени  $|f(t)| \leq F = \text{const} > 0 \quad \forall t \geq 0$ . Найдем нижнюю оценку для выбора амплитуды сигмоидального управления с учетом выражений (П.1) и (П.2) из достаточных условий  $x\dot{x} < 0$ . Это неравенство выполняется вне окрестности  $|x| \leq \Delta$ , если  $x\dot{x} = x(f - M\sigma(kx)) \leq |x|(F - 0,9M) < 0 \Rightarrow M > 1,1F$ . При выборе ограниченной амплитуды

$$M > 1,1(|x(0)|/t_0 + F) \quad (\text{П.3})$$

за конечное время  $t_0 \geq 0$  обеспечивается попадание переменной состояния в некоторую окрестность нуля  $|x(t)| \leq \Delta$ , которая в силу (П.2) определяется выбором второго параметра:

$$|x(t)| \leq 3/k \leq \Delta \Rightarrow k \leq 3/\Delta \quad \forall t \geq t_0. \quad (\text{П.4})$$

При микропроцессорной реализации данного алгоритма на выбор  $k$  накладывается ограничение сверху  $k \leq 1/\text{macheps}$ , обусловленное разрядностью процессора.

Покажем, что если первая и вторая производные внешнего возмущения ограничены  $|f^{(j)}(t)| \leq F_j = \text{const} > 0 \quad \forall t \geq 0, j = 1, 2$ , то при  $t > t_0$  первая и вторая производные переменной состояния в замкнутой системе с сигмоид-



дальним управлением также будут ограничены. Для их оценки составим вспомогательные уравнения

$$\begin{aligned}\ddot{x} &= \dot{f} - M\sigma'(kx)\dot{x}, \\ \ddot{x} &= \ddot{f} - M\sigma'(kx)\ddot{x} - M\sigma''(kx)\dot{x}^2 = \\ &= \ddot{f} - M\sigma'(kx)\ddot{x} + Mk\sigma'(kx)\sigma(kx)\dot{x}^2\end{aligned}$$

и рассмотрим квадратичную форму  $V = V_1 + V_2 = \frac{1}{2}\dot{x}^2 + \frac{1}{2}\ddot{x}^2$ . В силу (П.1) и (П.2) неравенство  $\dot{V}_1 < 0$  выполняется вне окрестности  $|\dot{x}| \leq \beta_1$ , если

$$\begin{aligned}\dot{V}_1 = \dot{x}\ddot{x} &= \dot{x}(\dot{f} - M\sigma'(kx)\dot{x}) \leq |\dot{x}|(F_1 - 0,1kM|\dot{x}|) < 0 \Rightarrow \\ &\Rightarrow k > 10F_1/(M\beta_1).\end{aligned}$$

При уже выбранных параметрах  $M$  (П.3) и  $k$  (П.4) имеет место оценка

$$|\dot{x}| \leq 10F_1/(Mk) \leq \beta_1 \leq 3,3\Delta F_1/M \leq 3\Delta F_1/F \quad \forall t > t_0. \quad (\text{П.5})$$

Обратим внимание, что при выборе параметров сигмоидального управления в виде (П.3) и

$$k > \max\{3/\Delta; 10F_1/(M\beta_1)\}$$

за конечное время с заданной точностью обеспечивается стабилизация не только переменной состояния  $|x(t)| \leq 3/k \leq \Delta$  (П.4), но и ее производной  $|\dot{x}(t)| \leq \beta_1$  (П.5). Тогда при  $\forall t > t_0$  уравнение статики реализуется с заданной точностью  $|\dot{x}(t)| = |f(t) - u(t)| \leq \beta_1$ , а управляющий сигнал непосредственно дает оценку внешнего возмущения  $u(t) = f(t) \pm \beta_1$ . Этот подход может быть применен для оценки неизвестных сигналов с заданной точностью без ввода их динамической модели при построении наблюдателя состояний с сигмоидальными корректирующими воздействиями.

Для производной второго слагаемого  $V_2$  квадратичной формы справедлива оценка  $\dot{V}_2 = \ddot{x}(\ddot{f} - M\sigma'(kx)(\ddot{x} - k\sigma(kx)\dot{x}^2)) \leq |\ddot{x}|(F_2 - 0,1Mk(|\ddot{x}| - k|\dot{x}|^2))$ . Неравенство  $\dot{V}_2 < 0$  при выбранных  $M$  (П.3) и  $k$  (П.4) обеспечивается вне области, в которую сходится вторая производная:

$$|\ddot{x}(t)| \leq 10F_2/(Mk) + k\beta_1^2 \leq \beta_2 \leq \Delta(3F_2/F + 27F_1^2/F^2) \quad \forall t > t_0. \quad (\text{П.6})$$

## ЛИТЕРАТУРА

1. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Основы управления манипуляционными роботами: Учебник для вузов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. — 480 с.
2. Краснова С.А., Мысик Н.С. Каскадный синтез наблюдателя состояния с нелинейными корректирующими воздействи-

ями // Автоматика и телемеханика. — 2014. — № 2. — С. 106—128.

3. Краснова С.А., Уткин А.В. Сигма-функция в задачах синтеза наблюдателей состояний и возмущений // Проблемы управления. — 2015. — № 5. — С. 27—36.
4. Краснова С.А., Уткин А.В. Анализ и синтез минимально-фазовых нелинейных SISO-систем при действии внешних несогласованных возмущений // Проблемы управления. — 2014. — № 6. — С. 22—30.
5. Черноусько Ф.Л., Ананьевский И.М., Решмин С.А. Методы управления нелинейными механическими системами. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. — 328 с.
6. Матюхин В.И. Управление механическими системами. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. — 320 с.
7. Пятницкий Е.С. Синтез иерархических систем управления механическими и электромеханическими объектами на принципе декомпозиции // Автоматика и телемеханика. — 1989. — № 1. — С. 87—99; № 2. — С. 71—86.
8. Ананьевский И.М. Управление механическими системами с неопределенными параметрами посредством малых сил // Прикладная математика и механика. — 2010. — Т. 77, вып. 1. — С. 161—178.
9. Краснова С.А., Уткин В.А., Уткин А.В. Блочный синтез управления механическими системами в условиях неопределенности // Мехатроника, Автоматизация, Управление. — 2009. — № 6. — С. 41—54.
10. Краснова С.А., Уткин В.А., Уткин А.В., Нгуен Тхань Тиен. Прямой метод синтеза системы управления рабочим органом манипулятора при неполных измерениях // Проблемы управления. — 2008. — № 1. — С. 10—18.
11. Кочетков С.А., Уткин В.А. Метод декомпозиции в задачах управления мобильными роботами // Автоматика и телемеханика. — 2011. — № 10. — С. 87—103.
12. Краснова С.А. Каскадный синтез системы управления манипулятором с учетом динамики электроприводов // Автоматика и телемеханика. — 2001. — № 11. — С. 51—72.
13. Уткин В.И. Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления. — М.: Наука, 1981. — 368 с.
14. Воеводин В.В., Кузнецов Ю.А. Матрицы и вычисления. — М.: Наука, 1984. — 318 с.
15. Вукобратович М., Стокич Д., Кирчански Н. Неадаптивное и адаптивное управление манипуляционными роботами. — М.: Мир, 1989. — 376 с.
16. Краснова С.А., Сиротина Т.Г., Уткин В.А. Структурный подход к робастному управлению // Автоматика и телемеханика. — 2011. — № 8. — С. 65—95.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Л.Б. Рапопортом.

**Краснова Светлана Анатольевна** — д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва; профессор, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, ✉ krasnova@ipu.ru,

**Антипов Алексей Семенович** — студент, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, ✉ scholess18@mail.ru.

# МОДЕЛИ МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ СТАБИЛИЗАЦИИ ПОТОКОВ МОЩНОСТИ В АВТОНОМНЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

А.П. Нырков, А.А. Жиленков, С.Г. Черный

Рассмотрена задача обеспечения устойчивой параллельной работы двух и более газодизель-генераторов в составе автономной электроэнергетической системы морских буровых платформ и объектов водного транспорта. Проанализированы условия и особенности работы системы. Даны рекомендации по выбору оптимальных значений параметров регулятора числа оборотов газодизеля. Разработаны модели, позволяющие решить широкий круг задач управления в автономной энергетике и обеспечения необходимых показателей качества электроэнергии.

**Ключевые слова:** показатель качества, электроэнергетическая система, газодизель-генераторный агрегат, буровая платформа, водный транспорт.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все более возрастает интерес к возможности применения газодизельных двигателей в автономных электроэнергетических системах (АЭЭС) морских буровых платформ (БП) и объектов водного транспорта в качестве приводных двигателей синхронных генераторов — основных источников энергии. Интерес этот вызван рядом преимуществ применения газодизель-генераторных агрегатов (ГДГА) [1—4]:

- на БП в качестве топлива можно использовать добываемый попутно с нефтью нефтяной газ, что снижает себестоимость эксплуатации БП;

- возможность работы главных источников энергии АЭЭС на дизельном и на газодизельном топливе, что увеличивает надежность АЭЭС;

- улучшение экологических показателей, так как продукты сгорания газодизельного топлива менее (до 80 %) токсичны по сравнению с выхлопами эксплуатируемых в настоящее время дизель-генераторных агрегатов; в выхлопных газах ГДГА нет твердых составляющих — сажи и частиц диоксида серы;

- снижение износа деталей двигателя ГДГА, поскольку из-за отсутствия в продуктах сгорания оксидов серы и сажи на деталях не образуется на-

гар, масло не загрязняется и срок службы двигателя возрастает в 1,5—2 раза.

В многогенераторных АЭЭС ГДГА не получили распространения, поскольку газодизельные двигатели чувствительны к нагрузке, и их типовые системы автоматического регулирования подачи топлива не обеспечивают идентичности динамических характеристик ГДГА, работающих параллельно. В настоящее время в газодизелях используются механические и электронные системы автоматического регулирования подачи топлива.

Механические системы автоматического регулирования подачи топлива отличаются рядом существенных недостатков: большое число передаточных звеньев и различного рода люфтов не позволяют достаточно точно регулировать подачу газов; плохое качество регулирования в переходных режимах; невозможность автоматического контроля аварийных ситуаций; параллельной работы ГДГА. Поэтому применение механических систем регулирования ГДГА возможно только при индивидуальной работе на нагрузку, т. е. в АЭЭС малой мощности.

Электронные системы регулирования теоретически позволяют в той или иной степени избавиться от указанных недостатков и обеспечить возмож-





ность параллельной работы ГДГА в многогенераторных АЭЭС [1].

В связи с этим возникает задача построения эффективных систем контроля за обменными колебаниями мощности и пропорционального выравнивания нагрузки на ГДГА. Необходимо детальные исследования как собственных колебаний мощности каждого агрегата, так и обменных ее колебаний при совместной работе нескольких ГДГА. Подобные исследования на реальных объектах весьма дорогостоящи и могут приводиться лишь на заключительном этапе построения. Поэтому важной задачей становится разработка адекватных моделей исследуемых объектов.

## 1. ПРОБЛЕМА УСТОЙЧИВОСТИ ГДГА

Современные АЭЭС объектов водного транспорта и морских БП представляют собой сложные электротехнические комплексы источников и потребителей электроэнергии, работающих в различных и изменяющихся во времени режимах. Каждый потребитель характеризуется нагрузкой, которая не зависит от режимов работы других электропотребителей. Построить общую диаграмму нагрузок АЭЭС, учитывая нагрузку каждого потребителя, практически невозможно. Кроме того, необходимо учитывать специфику работы электропривода рассматриваемого объекта. Например, для АЭЭС буровой установки наиболее тяжелыми являются режимы спуско-подъемных операций и режим бурения, который характеризуется резкими изменениями нагрузок на валу главного привода, связанными с переменными литологическими условиями бурения и прочими трудно детерминруемыми факторами. Таким образом, нагрузка на источники электроэнергии АЭЭС в процессе эксплуатации характеризуется как резкопеременная [1].

Обобщая, рассматриваемые АЭЭС можно охарактеризовать следующими особенностями:

- коммутация нагрузок в автономной сети носит импульсный характер со случайным распределением величин и длительностей; коммутируемые нагрузки могут достигать сотен киловатт;
- при произвольном наложении всех нагрузок секций главного распределительного щита межкоммутационные интервалы могут составлять от нескольких секунд до нескольких минут;
- периодичность коммутации нагрузок близка к постоянным времени ГДГА;
- при наличии колебательных свойств генерирующих агрегатов коммутация нагрузок способствует «раскачиванию» последних и появлению ко-

лебаний амплитуд напряжений и активной мощности между генераторными агрегатами, которые приводят к появлению колебаний частоты;

— коммутационные процессы подключения-отключения нагрузок носят случайный характер и приводят к случайным колебаниям амплитуд напряжений и отклонений частоты сети. В свою очередь, отклонения частоты сети могут использоваться для оценки процессов коммутации нагрузок в автономной сети.

Эти особенности были обнаружены авторами в результате полевых экспериментов на одной из БП, эксплуатируемых на Азово-Черноморском шельфе [5–9], и анализа данных, записанных при помощи программного обеспечения, поставляемого с оборудованием компании ABB.

На рис. 1 (см. третью страницу обложки) приведены данные записи основных параметров электроэнергии при работе главной лебедки во время спуско-подъемных операций. Видно, что колебания частоты и напряжения сети испытывают длительные существенные отклонения от номинальных значений. Во время измерений в работе находились два дизель-генераторных агрегата с номинальной частотой вырабатываемого тока 60 Гц и номинальным напряжением 600 В.

Были зарегистрированы повышения напряжения, достигавшие значений 820 В. Частота вырабатываемой дизель-генераторными агрегатами электроэнергии испытывала колебания от 50 до 70 Гц при набросе и сбросе нагрузки.

Анализ работы АЭЭС позволил установить, что коммутационные процессы, обусловленные подключением и отключением нагрузок, приводят к колебаниям напряжений и частоты сети, спектр которых находится в том же частотном диапазоне, что и спектр колебаний оборотов известных ГДГА [2–4], что способствует возникновению обменных колебаний мощности между параллельно работающими генераторами. Экспериментально были получены значения коэффициентов настройки регулятора оборотов газодизель-генератора, которые при заданной мощности обеспечивают наилучший переходный процесс. Анализ показал, что регулятор следует настраивать не при номинальной мощности газодизель-генератора, а при минимальной. Было также показано, что возрастание нагрузки будет приводить к возрастанию запаса устойчивости.

Теоретически, при помощи определенного комплекса аппаратно-программных средств управления параметрами регулятора оборотов ГДГА можно оптимизировать динамические режимы регулирования во всем диапазоне нагрузок и согласно расчетам [2] в 15–20 раз снизить дисперсию колебаний оборотов вала газодизеля. Исследования



показали, что оптимизация параметров регулятора ГДГА при его одиночной работе позволяет повысить стабильность оборотов газодизеля до стабильности оборотов дизельного двигателя, что открывает возможности обеспечения параллельной работы ГДГА при условии эффективного контроля активной мощности каждого из генераторов.

Для проведения детальных исследований процессов, протекающих при совместной работе нескольких ГДГА, необходима разработка адекватной модели ГДГА и его регулятора с учетом ключевых особенностей газодизельного двигателя.

## 2. МОДЕЛЬ ГАЗОДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБМЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ МЕЖДУ ГДГА

В пакете «Matlab-Simulink» имеются встроенные модели как приводных двигателей, так и синхронных генераторов с достаточно широкой номенклатурной изменяемых параметров. Однако они не позволяют учитывать такие конструктивные особенности, как наличие турбонагнетателя, оказывающего существенное влияние на динамику агрегата, наличие стабилизирующих обратных связей по частоте вращения вала двигателя и др. Поэтому библиотечные модели не подходят для решения поставленных задач. Прежде чем создавать Matlab-модель, соответствующую задачам исследований, необходимо определиться с характером и параметрами собственных колебаний частоты вращения вала ГДГА.

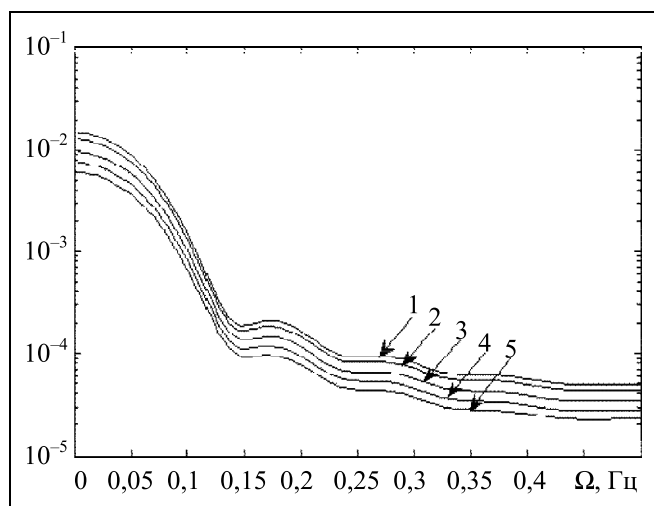


Рис. 2. Кривые спектральной плотности колебаний частоты вращения вала газодизеля для диапазона нагрузок от номинальной (кривая 5) до холодного хода (кривая 1) с шагом 20 % от нагрузки

Исследования колебаний частоты выходного напряжения реальных объектов, выполненные авторами, показали, что в целом они носят случайный характер, причем эти колебания во всем диапазоне нагрузок представляют собой нестационарный случайный процесс с изменяющимися математическим ожиданием и дисперсией. Для постоянной нагрузки этот процесс можно рассматривать как гауссовский. На рис. 2 представлены обобщенные кривые спектральной плотности колебаний частоты вращения вала газодизеля ГДВГ-1А-500 для диапазона нагрузок от номинальной (кривая 5) до холодного хода (кривая 1) с шагом 20 % нагрузки. Из вида этих кривых вытекает, что основная энергия спектра колебаний находится в интервале (0,005—0,1) Гц, что позволяет в дальнейшем внести существенные упрощения в общую структуру динамической модели ГДГА.

Динамическая модель ГДГА (рис. 3) строилась с условием достижения адекватности моделирования динамических режимов сброса/наброса нагрузки модели и реального объекта. Сброс и наброс нагрузки с одновременным контролем частоты выходного напряжения генератора — это фактически единственный эксперимент, который можно провести на реальном объекте, получив в результате достоверные результаты.

Адекватность модели проверялась во всем диапазоне генерируемой мощности с шагом 20 %, учитывая, что газодизель является нелинейным объектом с изменяющимся коэффициентом усиления по управляющему воздействию, а его турбонагнетатель проявляет себя в динамических режимах наброса лишь в диапазоне нагрузок не ниже 0,6—0,7 от номинальной [9—11].

Параметры ПИД-регулятора известны в процессе проведения экспериментов. Он (см. рис. 3) представлен в виде трех параллельных звеньев — пропорционального, интегрирующего и дифференцирующего, объединенных по выходам через сумматор. Двигатель постоянного тока мощностью 100 Вт с широтно-импульсным регулятором напряжения представлен инерционным звеном  $W_y$ . Наличие зоны нечувствительности при повороте воздушной заслонки учтено введением звена с зоной нечувствительности (нелинейный элемент НЭ).

Сам двигатель, как элемент преобразования газозвушной смеси в момент на валу, представлен усилительным звеном  $DA_d$ . Элемент чистого запаздывания учитывает интервалы времени между вспышками газозвушной смеси в цилиндрах и рассчитывается исходя из числа оборотов дизеля и числа цилиндров.

Поскольку интенсивность выхлопных газов непосредственно связана с моментом на валу, разви-

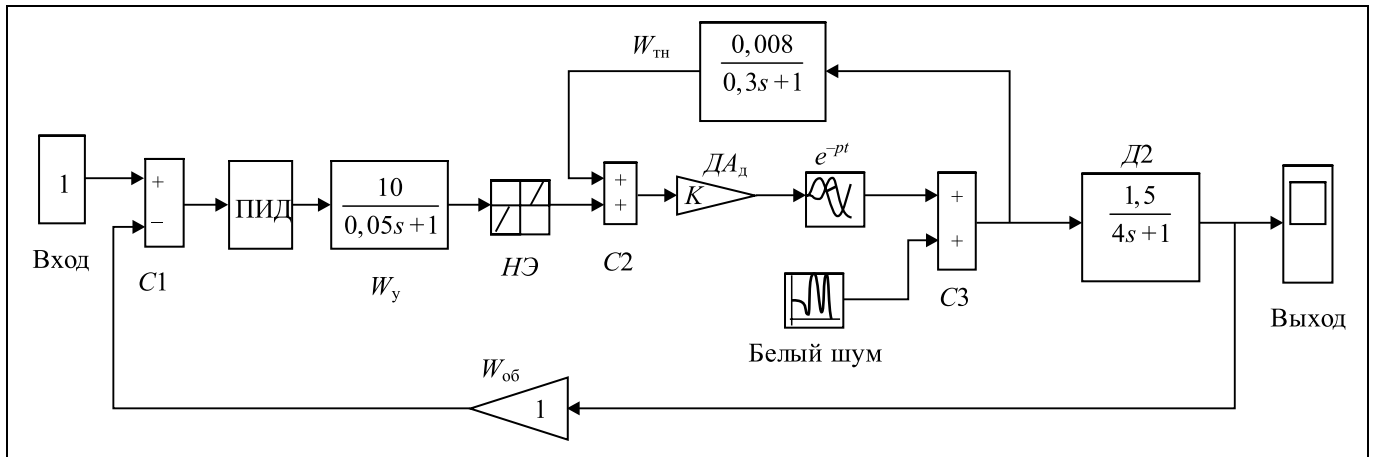


Рис. 3. Схема модели газодизеля

ваемым дизелем, а эффективность турбоагнетателя определяется именно интенсивностью потока выхлопных газов, то указанные два звена охватываются положительной обратной связью с инерционным звеном  $W_{тн}$ . Постоянная времени звена  $W_{тн}$  определяется маховыми массами и оборотами ротора турбины, а коэффициент передачи, зависящий от нагрузки, определяется экспериментально параметром переходного процесса. Для обследованных газодизелей в диапазоне до 60 % нагрузки для режима сброса этот коэффициент можно принять равным нулю.

Звено  $D_2$  осуществляющее преобразование момента на валу в частоту вращения вала двигателя учитывает его инерционные свойства. Постоянная времени  $T_d$  определяется моментом инерции маховых масс двигателя и ротора присоединенного генератора, эквивалентная постоянная времени двигателя  $T_g = T_d/D$  обратно пропорциональна приемистости  $D$  двигателя  $D$ . Коэффициент передачи этого звена также определяется как  $1/D$ . Для генераторной нагрузки он изменяется в пропорции  $P_n/P$  (здесь  $P$  и  $P_n$  — соответственно значения номинальной и текущей мощности, отдаваемые генератором в нагрузку) [12, 13].

Обеспечение случайного характера колебаний частоты вращения вала двигателя осуществляется следующим образом. Известно, что спектральная плотность  $S_{\text{вых}}(\omega)$  случайного сигнала на выходе линейного инерционного звена с коэффициентом передачи  $W_n(j\omega)$  определяется из выражения  $S_{\text{вых}}(\omega) = S(\omega)|W_n(j\omega)|^2$ , где  $S(\omega)$  — спектр входного сигнала. Эта формула обладает характерной особенностью — если в качестве исходного спектра используется белый шум, то спектр  $S_{\text{вых}}(\omega)$  одно-

значно определяется квадратом модуля коэффициента передачи линейного звена. Таким образом, изменяя коэффициент передачи, мы изменяем центральную частоту спектра случайных колебаний частоты вращения вала двигателя.

Для получения в выходном параметре двигателя аддитивной помехи, описывающей колебания частоты вращения его вала, предусмотрено добавление шумовой составляющей в выходной момент двигателя через сумматор  $C3$ . Такое представление аддитивной помехи более точно отражает ее физическую сущность, поскольку генерирование момента с шумовой составляющей вполне объяснимо, например, изменяющимся качеством топлива и др.

В дальнейшем учет наклона статической характеристики  $\Omega = f(M)$  можно обеспечить путем подключения к звену  $D2$  дополнительного звена, выходной сигнал которого определяется как [5, 7]  $\Omega = \Omega_0 - \Delta\Omega$ , где  $M$  — крутящий момент, развиваемый на валу двигателя,  $\Omega$  — текущее значение числа оборотов вала дизеля,  $\Omega_0$  — число оборотов в режиме холостого хода,  $\Delta\Omega$  — отклонение оборотов вала двигателя при нагрузке. Введение данного звена, представляющего собой сумматор, позволяет учесть статический разброс нагрузки параллельно работающим генераторам.

Учитывая низкочастотный характер колебаний, генератор может быть представлен мультипликатором, в котором решается задача получения активной составляющей генерируемой мощности:  $P = M\Omega$ .

Разработанная модель ГДГА позволяет решать задачи распределения активной мощности между генераторными агрегатами и проверять эффективность систем ее распределения.

### 3. УПРАВЛЕНИЕ МОДЕЛЬЮ ГДГА

В современных АЭС широко применяются автоматизированные системы управления, в частности, автоматические устройства управления генераторными агрегатами, включающие в себя устройства синхронизации и распределения мощности и др. В современных системах применяется, как правило, микропроцессорное управление. В пакете «Matlab-Simulink» возможности моделирования микропроцессорных устройств управления пока довольно скромны, если не использовать специализированные дорогостоящие пакеты дополнений под строго определенную номенклатуру чипов. Поэтому становится актуальной задача создания модели энергетической системы в «Matlab», которая могла бы управляться микропроцессорной системой, созданной в другой системе моделирования. При этом система управления, собственно, как и энергетическая система, могут быть как виртуальными, так и реальными, а сопряжение с компьютером выполняться по определенному интерфейсу [12–17].

Для моделирования микропроцессорной системы управления авторы воспользовались САПР «Proteus», которая позволяет достаточно точно моделировать и отлаживать сложные устройства, в которых может содержаться несколько микроконтроллеров одновременно, причем разных семейств.

Рассмотрим далее модель системы мониторинга и управления электростанцией, состоящей из одного газодизель-генераторного агрегата, которая позволяет пользователю в оперативном режиме получать информацию о состоянии электрической станции, объеме производимой на ней электроэнергии, максимальной мощности станции. Управление моделью выполняется через СОМ-порт. В ее состав входят блоки (рис. 4): модель газодизеля, системы возбуждения генератора, коммутаторы, нагрузки различной мощности (100, 140 и 210 кВА), блоки измерения сигналов, блоки для работы с СОМ-портом (на рисунке не показаны).

Структура блока «Газодизель-возбуждение» показана на рис. 5.

Входными сигналами блока «Газодизель-возбуждение» служат требуемая частота оборотов ( $w_{ref}$ ) (в относительных единицах) и фактическая частота оборотов ( $w$ ). На выходе формируется сигнал, соответствующий отдаваемой газодизелем мощности ( $P_m$ ). На систему возбуждения (блок «возбуждение») подаются опорное значение напряжения ( $V_{tref}$ ) и фактическое значение напря-

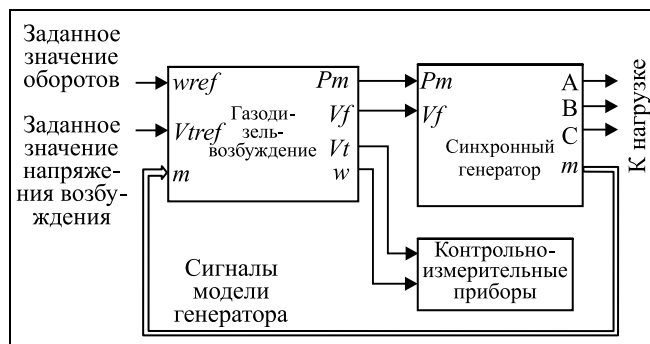


Рис. 4. Структурная схема модели электростанции с газодизель-генераторным агрегатом

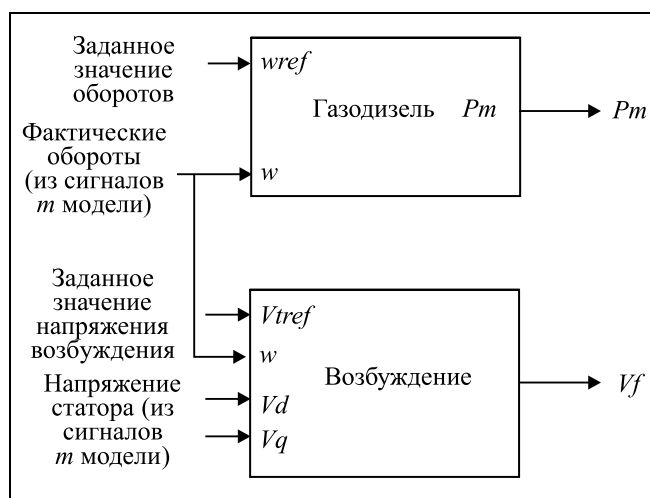


Рис. 5. Структура блока «Газодизель-возбуждение»

жения на статоре ( $v_{s\_dq}$ ). На выходе формируется сигнал  $V_f$ , который управляет возбуждением синхронного генератора. Блок «Газодизель» (см. рис. 5) описывается моделью, представленной на рис. 3.

Генератор в схеме (см. рис. 4) представлен моделью синхронной машины с демпферной обмоткой. Параметры машины задаются в системе относительных единиц. Для извлечения переменных машины из выходного вектора измеряемых переменных служит блок «Machines Measurement Demux».

Модель электростанции управляется микропроцессорной системой. На жидкокристаллическом алфавитно-цифровом индикаторе отображаются значения тока статора, оборотов газодизеля и мощности нагрузки.

Структура пакетов данных, принимаемых из «Matlab», значительно облегчает процедуру «распознавания», поскольку для этих целей можно воспользоваться библиотечной функцией scanf.

Как видно, пакет «Matlab/Simulink» позволяет создавать различные схемы, позволяющие моделировать практически любые процессы, происходящие при работе оборудования, что дает возможность отладить работу систем управления еще до внедрения их на практике. Перечень практических задач, которые можно решать на созданном программном комплексе, достаточно широк. В частности, имеется возможность моделирования параллельной работы нескольких генераторов, процесса синхронизации генераторов, распределения активной/реактивной мощности, аварийных ситуаций (короткого замыкания, обрыва фаз).

Некоторые результаты исследования переходного процесса активной мощности АЭЭС и частоты тока (в о. е. — относительных единицах) на выходе ГДГА при сбросе/набросе нагрузки на разработанных моделях микропроцессорной системы

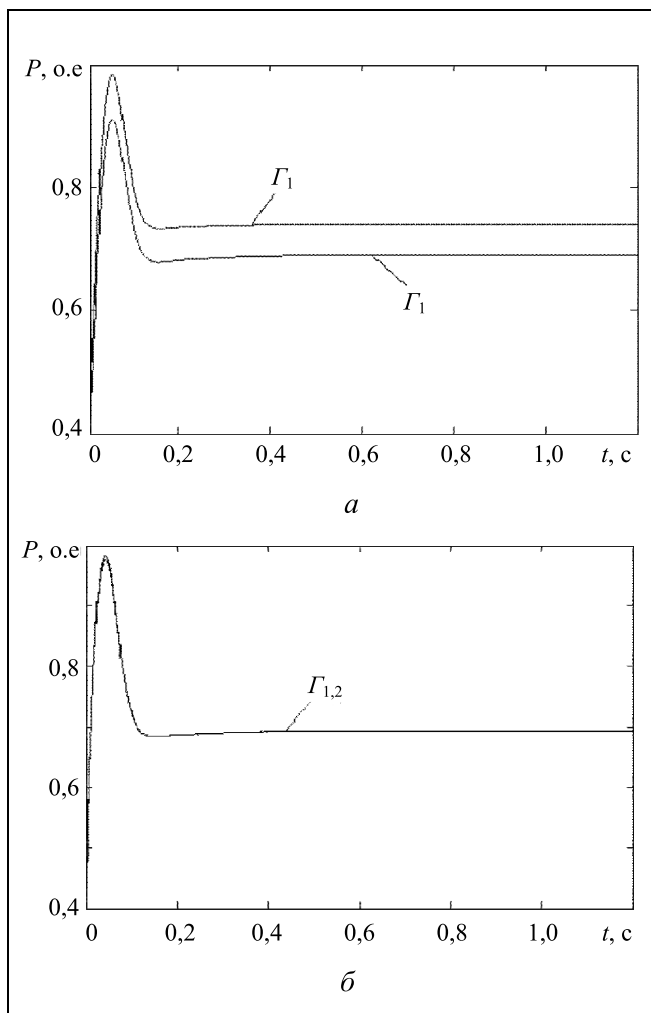


Рис. 6. Результаты моделирования распределения мощности ГДГА при набросе нагрузки: *a* — без коррекции, *б* — с коррекцией

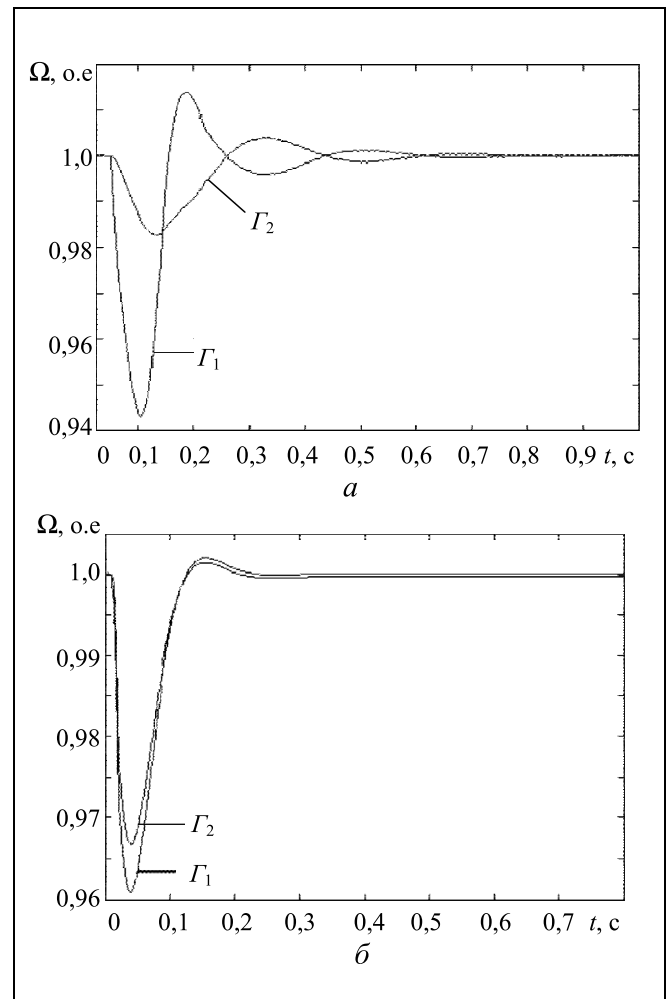


Рис. 7. Результаты моделирования при возмущающем воздействии по нагрузке ГДГА: *a* — с коррекцией только по угловому положению роторов; *б* — с коррекцией по моменту на валу и по угловому положению роторов

управления и АЭЭС с ГДГА приведены на рис. 6 и 7. На рис. 6, *a* показан переходный процесс активной мощности АЭЭС без коррекции со стороны модели микроконтроллерной системы управления, а на рис. 6, *б* — с коррекцией. Как видно, микроконтроллерная система позволяет качественно улучшить точность распределения активной мощности между параллельно работающими генераторными агрегатами  $G_1$  и  $G_2$ .

На рис. 7 приведены графики изменения скорости двух газодизелей, при наличии обратных связей по контролю углового положения роторов генераторов и моментов. Кривые, показанные на рис. 7, *a* получены при отсутствии контроля углового положения роторов, а показанные на рис. 7, *б* — при отсутствии обратных связей по моментам ГДГА.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные модели позволяют решать широкую гамму задач, касающихся как управления в автономной электроэнергетике, так и обеспечения необходимых показателей качества электроэнергии в автономных электроэнергетических системах — АЭЭС, где основными источниками электроэнергии служат работающие параллельно газодизель-генераторные агрегаты — ГДГА.

Предложенная динамическая модель ГДГА позволяет учитывать нелинейные свойства дизеля и особенности работы турбонагнетателя. Кроме того, модель позволяет перестраивать параметры регуляторов в зависимости от нагрузки на валу.

Созданная мультимодель АЭЭС позволяет объединить в себе как силовую электроэнергетику, так и микропроцессорные системы управления, что наряду с моделированием энергетических процессов позволяет моделировать и управление ими посредством цифровых систем. Такая методология позволяет создавать не только системы мониторинга, но и удаленного управления оборудованием.

Разработанная детальная модель АЭЭС с ГДГА позволяет определить наилучшие условия обеспечения параллельной работы агрегатов с распределением активной мощности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Chernyi S., Zhilenkov A. Analysis of complex structures of marine systems with attraction methods of neural systems // Metallurgical and Mining Industry. — 2015. — N 1. — P. 37–44.
2. Моцохейн Б.И. Электропривод зарубежных установок для морского бурения. Обзор зарубежной литературы. — М.: ВНИИОЭНГ, 1977. — 76 с.
3. Моцохейн Б.И. Электротехнические комплексы буровых установок. — М.: Недра, 1991. — 253 с.
4. Полонский В.И., Хайкин А.Б. Автоматизированные гребные электрические установки. — М.: Транспорт, 1976. — 432 с.
5. National Oilwell Varco [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.nov.com/ProductIndex.aspx> (дата обращения 31.05.2016).
6. Черный С.Г., Жиленков А.А. Оценка надежности функционирования морских буровых платформ // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. — 2015. — № 1. — С. 30–36.
7. Черный С.Г. Применение технологии экспертного оценивания в задачах развития сценариев на примере транспортно-энергетической отрасли // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. — 2014. — № 4 (26). — С. 139–150.
8. Моцохейн Б.И., Парфенов Б.М., Шпилевой В.М. Электропривод, электрооборудование и электроснабжение буровых установок. — Тюмень, 1999. — 263 с.
9. Пути повышения экономической эффективности операций на старых нефтяных месторождениях / М. Рейнике и др. // Нефть, газ и нефтехимия за рубежом. — 1989. — № 7.
10. Жиленков А.А., Черный С.Г. Повышение эффективности систем автоматического управления автономными буровыми установками за счет разработки методов обеспечения их совместимости и интеграции // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. — 2015. — № 4. — С. 9–18.
11. Микаэлян Э.А., Микаэлян Р.Э., Дорохин В.П. Перспектива применения газотурбинных агрегатов в нефтегазовой промышленности // Нефтяное хозяйство. — 1998. — № 6. — С. 49–52.
12. Zhilenkov A., Chernyi S. Investigation performance of marine equipment with specialized information technology // Energy Procedia. — 2015. — Vol. 100. — P. 1247–1252.
13. Can You Afford the Risk? The Case for Collaboration on Risk Mitigation for High-Specification Offshore Assets. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.osp.ru/os/2010/08/13005222/> (дата обращения 31.05.2016).
14. Черный С.Г. Анализ надежности энергетических систем морских буровых платформ в акватории черного моря // Нефтяное хозяйство. — 2016. — № 2. — С. 106–110.
15. Chernyi S., Dorovskoy V. Methodological foundation of effective deep-water mining in the Crimea // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. — 2014. — № 3. — С. 114–118.
16. CNW Research. Data showing the increasing consumer consideration of diesel and hybrid vehicles provided by CNW Research. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.cnwmarketingresearch.com/> (дата обращения 31.05.2016).
17. Greene D.L. How Consumers Value Fuel Economy: A Literature Review Assessment and Standards Division. / Office of Transportation and Air Quality, United States Environmental Protection Agency, Washington, D.C. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.epa.gov/oms/climate/regulations/420r10008.pdf> (дата обращения 31.05.2016).

Статья представлена к публикации членом редколлегии С.А. Красновой.

**Ныркв Анатолий Павлович** — д-р техн. наук, зав. кафедрой, Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург, [anpnrkow@mail.ru](mailto:anpnrkow@mail.ru),

**Жиленков Антон Александрович** — канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, [zhilenkovanton@gmail.com](mailto:zhilenkovanton@gmail.com),

**Черный Сергей Григорьевич** — канд. техн. наук, зав. кафедрой, Керченский государственный морской технологический университет; доцент, Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург, [sergiiblack@gmail.com](mailto:sergiiblack@gmail.com).



# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ТРЕЙДЕРОВ НА ФОНДОВОМ РЫНКЕ С ЦЕЛЬЮ ОБНАРУЖЕНИЯ АГРЕССИВНЫХ СТРАТЕГИЙ ТРЕЙДИНГА

М.Н. Каздагли

Рассмотрена задача построения модели, описывающей поведение совокупности трейдеров на фондовом рынке. Предполагается, что трейдеры могут вступать в сговор с целью искусственного манипулирования ценами на активы. Продемонстрирован алгоритм обнаружения целенаправленного манипулирования ценами. Дано сравнение предложенного алгоритма с другими способами детектирования согласованного воздействия брокеров на рынок. Получена качественная оценка рассмотренной модели на реальных биржевых данных.

**Ключевые слова:** рынок ценных бумаг, искусственное манипулирование ценами, скрытая марковская модель, анализ временных рядов.

## ВВЕДЕНИЕ

Глобальный экономический кризис 2008 года и последовавшая за ним рецессия привели к повышенному вниманию со стороны государственных регулирующих структур к поведению игроков на фондовых рынках. Механизм обнаружения агрессивных стратегий трейдинга, реализуемых сразу несколькими участниками рынка, является первым шагом к глобальному анализу рынка и предотвращению финансовых кризисов.

Наряду с пассивными технологиями трейдинга, брокеры все чаще стали применять активные методы воздействия на рынок. Для этого участники рынка вступают в сговор с целью искусственного манипулирования ценами на активы. Подобное поведение создает ошибочные иллюзии у остальных трейдеров относительно ситуации на рынке и провоцирует их на принятие неверных решений. Все это приводит к изменению равновесия на рынке, т. е. цена на активы сдвигается в направлении, заданном агрессивными игроками, и как только она достигает благоприятного для них значения, они не замедляют воспользоваться сложившейся ситуацией. Довольно трудно обнаружить подобное поведение трейдеров, потому что сразу несколько брокеров вовлечены в агрессивную игру, и инициированные ими ордера распределены во времени.

На рынке ценных бумаг транзакции можно рассматривать как совокупность нескольких потоков данных — ордера на покупку/продажу и исполненные сделки. В соответствии с моделью рынка, эти временные последовательности проявляют высокую степень корреляции. Зачастую данные только одного типа используются в моделях детектирования агрессивных стратегий трейдинга [1–4], и при этом, как правило, теряется значительная часть информации, которая могла бы свидетельствовать о наличии сговора среди участников рынка. Только одновременное рассмотрение всех трех наборов данных позволяет узнать истинные намерения трейдеров [5].

Традиционный подход [1–4] к анализу временных рядов объединяет коррелированные последовательности в одну многомерную последовательность, что является оправданным, только если индивидуальные последовательности эволюционируют синхронно. В нашем случае мы имеем дело с тремя *асинхронно* взаимодействующими процессами, вследствие этого моделирование подобных процессов с помощью согласованных моделей значительно превосходит по точности традиционный подход. Кроме этого, (адаптивные) согласованные модели устойчивы к резким изменениям внутренней структуры потоков данных. Например, трейдер, изменяя свою стратегию, неявно оказывает влияние на структуру потока ордеров.

В данной статье рассматриваются два подхода к моделированию поведения инвесторов на фондовом рынке: на основе согласованных скрытых марковских моделей (ССММ) [6], и на основе адаптивных согласованных скрытых марковских моделей (АССММ). Второй из них, в отличие от первого, позволяет динамически изменять параметры модели вследствие изменения поведения игроков на рынке.

В основе этих моделей лежит классическая скрытая марковская модель (СММ) [7–9]. Стандартная СММ оперирует только одной переменной, которая используется для описания скрытых состояний. Вследствие этого стандартная СММ неточно описывает системы, включающие в себя несколько коррелированных процессов, таких, как упомянутые ранее три потока транзакций разного типа на фондовой бирже. В отличие от скрытой марковской модели, ССММ представляет собой более гибкий инструмент для моделирования временных последовательностей. Она состоит более чем из одной модели СММ-типа; каждая из входящих в ее состав СММ используется для описания отдельного процесса. Согласованная СММ добавляет дополнительные связи к составляющим ее СММ, так что скрытое состояние любой СММ, входящей в состав ССММ, в момент времени  $t$  зависит от скрытых состояний остальных СММ в момент времени  $t - 1$ .

Рассматриваемые модели апробированы на реальных биржевых данных. Результаты демонстрируют, что по качеству моделирования ССММ и АССММ превосходят стандартные СММ [7–10], не учитывающие корреляцию данных.

## 1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Действия брокеров можно представить в виде трех временных рядов: ордера на покупку/продажу и исполненные сделки. Таким образом, задача моделирования поведения трейдеров заключается в учете скрытых взаимосвязей между этими последовательностями.

Предположим, имеется  $S$  последовательностей  $\Phi_1 = \{\phi_{11}, \phi_{12}, \dots, \phi_{1T}\}$ ,  $\Phi_2 = \{\phi_{21}, \phi_{22}, \dots, \phi_{2T}\}$  и  $\Phi_C = \{\phi_{C1}, \phi_{C2}, \dots, \phi_{CG}\}$ ,  $T$ ,  $F$  и  $G$  — число элементов в каждой из них. В общем случае с каждым элементом последовательности связан  $L$ -мерный вектор атрибутов, описывающий его внутреннее состояние,  $\phi_{ik}(p_{ik,1}, p_{ik,2}, \dots, p_{ik,L})$ ,  $p_{ik,1}, p_{ik,2}, \dots, p_{ik,L}$  — атрибуты объекта  $\phi_{ik}$ . Например, если мы имеем дело с ордером на продажу, то его атрибуты — это цена, объем, время подачи заявки.

Пусть атрибут  $p_{ik,T}$  с индексом  $T$  содержит временную метку элемента  $\phi_{ik}$ . Если  $\phi_{ik}$  — ордер на

продажу, то  $p_{ik,T}$  — время подачи заявки. Мы можем определить отношение согласованности между последовательностями  $\Phi_i$  и  $\Phi_j$  следующим образом:  $\exists k, l \text{ s. t. } k \leq |\Phi_i|, l \leq |\Phi_j|, (p_{ik,T} < p_{jl,T} \wedge \phi_{ik} \rightarrow \phi_{jl}) \vee (p_{jl,T} < p_{ik,T} \wedge \phi_{jl} \rightarrow \phi_{ik})$ . Данное определение означает, что одна из последовательностей содержит элемент, который влияет на некоторый элемент другой последовательности, обладающий более поздней временной меткой по сравнению с первым элементом. Если, например, две последовательности содержат ордера на покупку/продажу, то они согласованы, потому что размещение ордера на продажу ценных бумаг очевидно влияет сразу на один и более ордеров на покупку, размещаемых в последующие моменты времени.

Основное предположение, на которое опираются рассматриваемые в данной статье алгоритмы, — это трактовка согласованного поведения брокеров с целью агрессивного манипулирования ценами как *аномального*. Для аккуратного обнаружения аномалий требуется модель, способная точно описывать *нормальное* поведение трейдеров. Таким образом, *общую постановку задачи* моделирования согласованного поведения брокеров с целью обнаружения *агрессивных стратегий трейдинга* можно сформулировать следующим образом. Требуется разработать гибкую модель, способную эффективно учитывать отношение согласованности между коррелированными временными рядами, динамически обновлять свои параметры при изменении поведения трейдеров на рынке и точно обнаруживать аномалии.

Представленная модель, (А)ССММ, основана на теории согласованных марковских моделей [6]. Для качественного сравнения разрабатываемых моделей мы используем исторические биржевые данные, которые содержат подозрительные транзакции, обнаруженные биржевыми экспертами.

## 2. СКРЫТЫЕ МАРКОВСКИЕ МОДЕЛИ

Для моделирования взаимного влияния временных рядов мы воспользуемся согласованной СММ (ССММ) [6], которая состоит из трех СММ, описывающих потоки исполненных заявок и заявок на покупку/продажу соответственно.

Основные элементы СММ — это множество скрытых состояний  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$  и множество значений наблюдаемых переменных  $O = \{O_1, O_2, \dots, O_T\}$ . Для обозначения случайных и скрытых переменных мы используем прописные буквы, а для их реализаций — строчные. Таким образом, конкретное состояние в момент времени  $t$  обозначим  $s_t$ , а значение наблюдаемой переменной в момент времени  $t$  обозначим  $o_t$ . Вероятности пе-

переходов между скрытыми состояниями определяются матрицей  $X = \{x_{ij}\}$ , где  $x_{ij} = \Pr(S_j = s_{t+1} | S_i = s_t)$ . Распределение вероятности наблюдаемых переменных задается матрицей  $Y = \{y_j(k)\}$ ,  $y_j(k) = \Pr(O_k = o_k | S_j = s_j)$ . И, наконец, распределение априорных вероятностей обозначается как  $\pi = \{\pi_i\}$ , где  $\pi_i = \Pr(S_i = s_i)$ . Таким образом, СММ, обозначаемая для краткости как  $\lambda^{\text{СММ}}$ , может быть полностью охарактеризована с помощью матриц  $X$ ,  $Y$ ,  $\pi$ , т. е.  $\lambda^{\text{СММ}} = (X, Y, \pi)$ . Оценка параметров СММ — элементов матриц  $X$ ,  $Y$ ,  $\pi$  — может быть эффективно выполнена с помощью стандартного алгоритма Баума — Велша [8]:

$$\alpha_t(i) = \Pr(O_1 = o_1, O_2 = o_2, \dots, O_t = o_t, S_t = s_i | \lambda),$$

$$\beta_t(i) = \Pr(O_{t+1} = o_{t+1}, O_{t+2} = o_{t+2}, \dots, O_T = o_T | S_t = s_i, \lambda),$$

$$\bar{x}_{iy} = \sum_{t=1}^{T-1} \alpha_t(i) x_{ij}(o_{t+1}) \beta_{t+1}(j) / \sum_{t=1}^{T-1} \alpha_t(i) \beta_{t+1}(j),$$

$$\bar{y}_j(k) = \sum_{t=1}^T \alpha_t(j) \beta_t(j) / \sum_{t=1}^T \alpha_t(j) \beta_t(j),$$

$$\bar{\pi}_i = \alpha_1(i) \beta_1(i) / \sum_{j=1}^N \alpha_1(j) \beta_1(j).$$

Первые два уравнения определяют вероятность получения заданной последовательности  $o_1, o_2, \dots, o_t$  для состояния  $s_i$  в момент времени  $t$  и вероятность конечной заданной последовательности  $o_{t+1}, o_{t+2}, \dots, o_T$  при условии, что СММ эволюционирует из исходного состояния  $s_i$  в момент времени  $t$ . Остальные уравнения позволяют оценить параметры СММ  $\lambda^{\text{СММ}} = (X, Y, \pi)$ .

После того, как оценка параметров модели выполнена, она может быть использована для вычисления вероятности того, что наблюдаемая последовательность  $o_1, o_2, \dots, o_T$  сгенерирована именно этой моделью:

$$\Pr(O | \lambda^{\text{СММ}}) = \sum_{i=1}^N \alpha_T(i).$$

В отличие от стандартной СММ, согласованная СММ объединяет несколько ССМ, добавляя связи между скрытыми состояниями отдельных ССМ моделей. На рис. 1 показана ССММ, состоящая из трех связанных ССМ, каждая из которых моделирует поток заявок на покупку/продажу и исполненных ордеров. В виде овалов изображены скрытые состояния марковских моделей, прямоугольники символизируют наблюдаемые величины

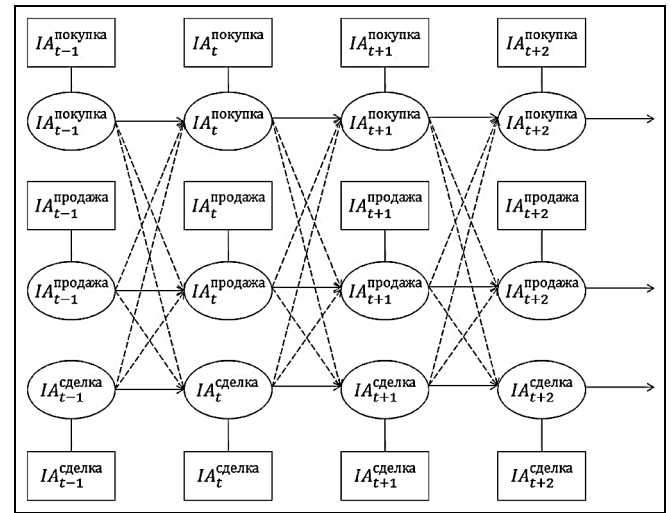


Рис. 1. Согласованная скрытая марковская модель

ны. Связи между скрытыми состояниями отдельных ССМ изображены штриховыми линиями.

С формальной точки зрения, дополнительные связи между парой стандартных СММ описываются матрицей, элементы которой характеризуют уровень взаимного влияния скрытых переменных друг на друга. Иными словами, если мы рассматриваем две согласованные СММ,  $\lambda$  и  $\lambda'$ , то матрица  $Z = \{z_{ij}\}$  определяется как  $z_{ij} = \Pr(s'_{t+1} = S'_j | s_t = S_i)$ , где  $S'_j$  и  $S_i$  — скрытые состояния моделей  $\lambda'$  и  $\lambda$  в моменты времени  $t+1$  и  $t$  соответственно. Ввиду сказанного, ССММ полностью описывается набором из четырех параметров  $\lambda^{\text{ССММ}} = (X, Y, Z, \pi)$ . По аналогии с алгоритмом Баума — Велша, для оценки элементов матрицы  $Z$  применяется итеративный алгоритм [6], основанный на методах динамического программирования.

Один из ключевых моментов в построении любой СММ состоит в выборе скрытых состояний. Поскольку результат исполнения ордера на покупку/продажу может быть либо *положительным/отрицательным*, либо *нулевым* в зависимости от того, насколько выгодна сделка для иницилирующей ее стороны, то потоки ордеров на покупку/продажу могут быть смоделированы с помощью СММ с данными тремя скрытыми состояниями:

$$S^{\text{продажа/покупка}} = \{\text{положительный, нулевой, отрицательный}\}.$$

Последовательность исполненных сделок представлена в виде СММ с двумя скрытыми состояниями, первое из которых соответствует восходящему тренду на рынке, а второе — нисходящему:

$$S^{\text{сделка}} = \{\text{восходящий, нисходящий}\}.$$

### 3. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ВХОДНЫХ ДАННЫХ

Для построения эффективных моделей, способных в нужной степени обобщать экспериментальные данные, последние подвергаются предварительной обработке — усреднению и дискретизации. Все рассматриваемые СММ обладают дискретной природой, т. е. наблюдаемые переменные дискретны. Каждую транзакцию в потоке входных данных можно описать с помощью следующей контекстно-свободной грамматики:

$$A = \{a, p, v\},$$

$$a = \{\text{продажа}|\text{покупка}|\text{сделка}\},$$

$$p = \{\text{цена: численные данные}\},$$

$$v = \{\text{объем: численные данные}\},$$

где  $A$  (*activity*) — информация о конкретном ордере/сделке, переменные  $a$ ,  $b$  и  $v$  определяют тип транзакции, цену и объем соответственно.

Входные данные необходимо подвергнуть интервальному усреднению внутри скользящего временного окна размером  $w$ , содержащем  $n$  элементов, чтобы уменьшить дисперсию и выявить тренд:

$$IA = \{AS, \bar{p}, \bar{v}, w\},$$

$$AS = \{A_1, A_2, \dots, A_n\},$$

$$\bar{p} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p(i),$$

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v(i),$$

где оценка  $IA$  (*interval activity*) описывает усредненные параметры транзакций на интервале фиксированного размера  $w$ ,  $AS$  (*sequence of activities*) — совокупность всех транзакций, инициированных внутри временного интервала  $w$ . Параметры  $\bar{p}$  и  $\bar{v}$  представляют собой средние значения цен и объемов на интервале  $w$ ;  $n$  — число транзакций на интервале  $w$ .

Поскольку наши модели работают с дискретными значениями величин, мы дискретизируем интервальные оценки  $IA$  наблюдаемых величин с помощью  $k$ -means алгоритма [11], заменяя непрерывные величины центрами полученных кластеров. Например, если  $\alpha_i^{\text{цена}}$  — центр  $i$ -го кластера, построенного для параметра «цена», то все величины  $p$ , принадлежащие этому кластеру, можно заменить на  $\alpha_i^{\text{цена}}$ . Математически, переход от усредненных непрерывных параметров транзакций

$IA$  к их дискретным значениям  $IA^{\text{дискр}}$  описывается формулами:

$$p^{\text{дискр}} = \operatorname{argmin}_i |\bar{p} - \alpha_i^{\text{цена}}|,$$

$$v^{\text{дискр}} = \operatorname{argmin}_i |\bar{v} - \alpha_i^{\text{объем}}|,$$

$$w^{\text{дискр}} = \operatorname{argmin}_i |\bar{w} - \alpha_i^{\text{интервал}}|,$$

$$IA = \{AS, \bar{p}, \bar{v}, w\} \rightarrow IA^{\text{дискр}} = \{AS, p^{\text{дискр}}, v^{\text{дискр}}, w^{\text{дискр}}\}.$$

### 4. АДАПТИВНАЯ СОГЛАСОВАННАЯ МАРКОВСКАЯ МОДЕЛЬ

Поведение трейдеров на рынке ценных бумаг может меняться достаточно резко по различным причинам, например, вследствие изменения внешних условий или поступления дополнительной информации. Поэтому ССММ должна своевременно обнаруживать изменившееся поведение участников рынка и мгновенно подстраиваться к новым условиям. Вариант ССММ, обладающий подобными характеристиками, именуется адаптивной ССММ или АССММ.

Для того чтобы определить, нужно ли обновлять значения параметров АССММ, специальный компонент в нашей системе в режиме реального времени оценивает, насколько качественно ССММ обобщает поступающие данные. Подобный анализ выполняется с помощью статистического  $t$ -теста, который способен отвергнуть гипотезу о том, что тестовая последовательность и текущая последовательность сгенерированы одной и той же моделью. В качестве тестовой последовательности рассматривается последовательность данных, проанализированная посредством АСММ сразу после последнего обновления параметров. Обнаруженная существенная разница свидетельствует о необходимости модификации параметров АССММ, потому что АССММ в данном виде не способна качественно описывать изменившееся поведение участников рынка.

Данные  $DS_1$  из интервала  $[t_1, t_2]$  (рис. 2) используются как тестовые, они описываются моделью типа ССММ (обозначим ее АССММ-1). Вероятность того, что исходные данные сгенерированы моделью АССММ-1, используется в качестве опорной величины для оценки способности модели АССММ-1 описывать наблюдаемые переменные на следующем интервале, на интервале  $[t_3, t_4]$ . Если  $t$ -тест свидетельствует о малой вероятности, что данные из текущего интервала описываются текущей АССММ, то параметры модели обновляются.

В целях уменьшения времени и вычислительных ресурсов, необходимых для обновления пара-

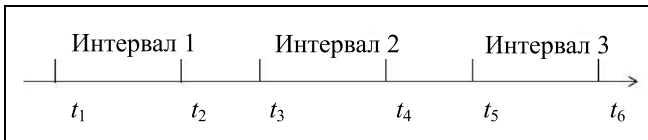


Рис. 2. Пример интервального обновления параметров модели типа АССММ

метров, применяется метод скользящего окна. Допустим, что модель АССММ-1 следует обновить, чтобы она смогла лучше описывать данные из интервала  $[t_3, t_4]$ . При вычислении новых значений параметров текущие значения параметров модели АССММ-1 используются в качестве исходных оценок, а сама модель обучается заново на данных из интервала  $[t_3, t_4]$ , таким образом мы получаем модель АССММ-2'. Окончательные оценки параметров модели АССММ-2 вычисляются как линейная комбинация параметров моделей АССММ-1 и АССММ-2'. Мы переобучаем модель только на последнем интервале, на котором она плохо работает, а не на всем наборе данных в отличие от классического подхода. Процесс обновления параметров представляется формулами

$$x_{ij} = (1 - w)x'_{ij} + wx''_{ij},$$

$$y_{ij} = (1 - w)y'_{ij} + wy''_{ij},$$

$$z_{ij} = (1 - w)z'_{ij} + wz''_{ij},$$

$$\pi_{ij} = (1 - w)\pi'_{ij} + w\pi''_{ij}.$$

Переменные, отмеченные одним штрихом, соответствуют старым значениям параметров (в нашем примере, параметрам модели АССММ-1), двумя штрихами — новым интервальным оценкам параметров (параметрам модели АССММ-2'), без штрихов — значениям параметров в обновленной модели (параметрам модели АССММ-2);  $w$  — весовой коэффициент.

## 5. АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ

Алгоритм состоит из двух логических частей: первоначальная обработка данных и применение АССММ для обнаружения сговора среди участников рынка.

На фондовом рынке ордера, размещаемые трейдерами, автоматически аннулируются в конце торгового дня, если они не исполнены. Сделки совершаются только с ордерами, полученными в течение текущего рабочего дня. Поэтому причинно-следственная связь между ордерами и сделками существует только в рамках одного рабочего дня. В связи с чем мы разбиваем каждый торговый день на несколько интервалов, и для каждого интервала

вычисляем интервальные активности в соответствии со следующим алгоритмом.

**Шаг 1.** Разбить торговый день на  $L$  интервалов равной длительности.

**Шаг 2.** Для каждого временного интервала вычислить активности  $IA^{\text{продажа}}$ ,  $IA^{\text{покупка}}$ ,  $IA^{\text{сделка}}$ .

**Шаг 3.** Дискретизировать интервальные активности:  $IA^{\text{продажа}}$ ,  $IA^{\text{покупка}}$ ,  $IA^{\text{сделка}} \rightarrow IA^{\text{дискр-продажа}}$ ,  $IA^{\text{дискр-покупка}}$ ,  $IA^{\text{дискр-сделка}}$ .

**Шаг 4.** Построить последовательность интервальных активностей, описывающих транзакции в течение одного торгового дня, т. е.  $IA^{\text{тип}} = IA_1^{\text{тип}}$ ,  $IA_2^{\text{тип}}$ , ...,  $IA_L^{\text{тип}}$ .

**Шаг 5.** Повторить шаги 1—4 для всех дней.

После первоначальной обработки данные используются для построения АССММ. Стратегии, вызывающие подозрение, детектируются с помощью оценки вероятности того, что проверяемые последовательности ордеров сгенерированы имеющейся в нашем распоряжении моделью. Если эта вероятность ниже порогового значения, то это служит признаком того, что данные могут быть отправлены на экспертизу для проведения более тщательного анализа. Приведенный ниже алгоритм детектирует подозрительные действия трейдеров.

**Шаг 1.** Разбить выходные данные приведенного выше алгоритма на два множества: данные, необходимые для обучения АССММ, и данные, необходимые для проверки качества построенной АССММ.

**Шаг 2.** Обучить АССММ на первом множестве.

**Шаг 3.** Вычислить статистические параметры полученной АССММ: ее среднее значение

$$\mu = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \Pr(Seq_i | \text{АССММ})$$

и дисперсию

$$\sigma = \left( \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \Pr(Seq_i | \text{АССММ}) - \mu \right)^{1/2},$$

где  $Seq_i$  —  $i$ -й набор входных данных,  $K$  — число наборов входных данных, используемых для обучения модели.

**Шаг 4.** Для каждой тестовой последовательности вычислить, насколько вероятно то, что она сгенерирована построенной АССММ, по формуле

$$D = \frac{1}{\sigma} (\mu - \Pr(Seq' | \text{АССММ})),$$

где  $Seq'$  — тестовая последовательность.

**Шаг 5.** Если  $D > \psi_0$ , где  $\psi_0$  — пороговое значение, то совокупность  $Seq'$  содержит подозрительную последовательность ордеров.



## 6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Описанный подход к моделированию биржевых данных был апробирован на реальных данных, собранных более чем за год. Они включают в себя информацию об обнаружении агрессивных стратегий, собранную системой биржевого мониторинга. Хотя эти данные не являются абсолютно точными, они используются в качестве референсных в наших экспериментах. Набор данных для обучения АССММ построен так, что он не включает в себя подозрительных операций, т. е. АССММ обучается только на нормальных данных. Одна треть данных использовалась для обучения, а остальные — для тестирования моделей типа (А)СММ.

Для сравнения различных вариантов скрытых марковских моделей мы воспользовались шестью моделями:

- СММ-ПР/СММ-ПО/СММ-СД — данные СММ моделируют последовательности заявок на продажу/покупку ценных бумаг и последовательность исполненных сделок соответственно; в этих моделях не используются понятия согласованности и адаптивности;
- СММ-ИН — интегрированная СММ; вероятность входной последовательности определяется как среднее значение вероятностей отдельных СММ-ПР/СММ-ПО/СММ-СД-моделей;
- ССММ;
- АССММ.

Для сравнения описанных моделей в качестве критериев мы воспользовались стандартными па-

раметрами [11], принятыми в теории машинного обучения:

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + FN + FP + TN};$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP};$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN};$$

$$Specificity = \frac{TN}{FP + TN},$$

где  $TP$  означает true positive,  $FP$  — false positive (ошибка первого рода),  $FN$  — false negative (ошибка второго рода),  $TN$  — true negative.

Кроме приведенных критериев модели сравнивались по показателю прибыльности ( $Return$ ), широко применяемому на фондовых рынках:

$$R = \ln \frac{p_t}{p_{t-1}},$$

где  $p_t$  и  $p_{t-1}$  — уровни цен, на которых были совершены сделки в моменты времени  $t$  и  $t-1$  соответственно. Дни, в течение которых были подозрительные сделки, имеют более высокое значение показателя прибыльности по сравнению с обычными днями. В соответствии с этим модель, которая лучше всего описывает поведение рынка, должна в первую очередь выявлять дни с наибольшим значением прибыльности.

Результаты тестирования шести моделей на реальных данных представлены на рис. 3–7. По горизонтальной оси отложено число  $P$  временных окон, в течение которых зарегистрированы подозрительные сделки, а по вертикальной — соответствующий показатель.

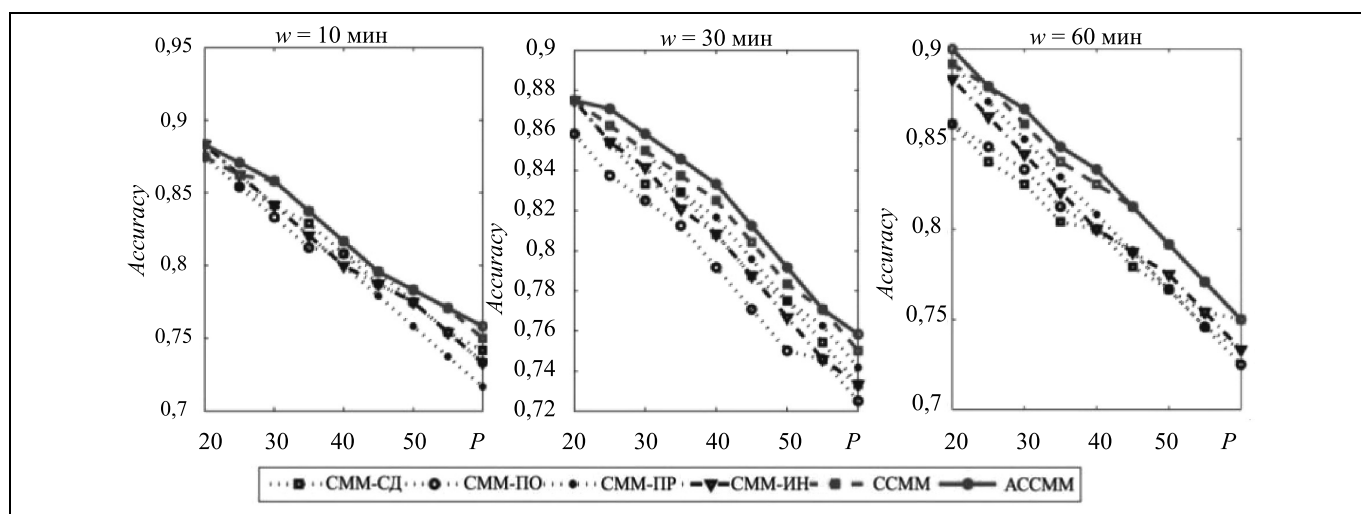
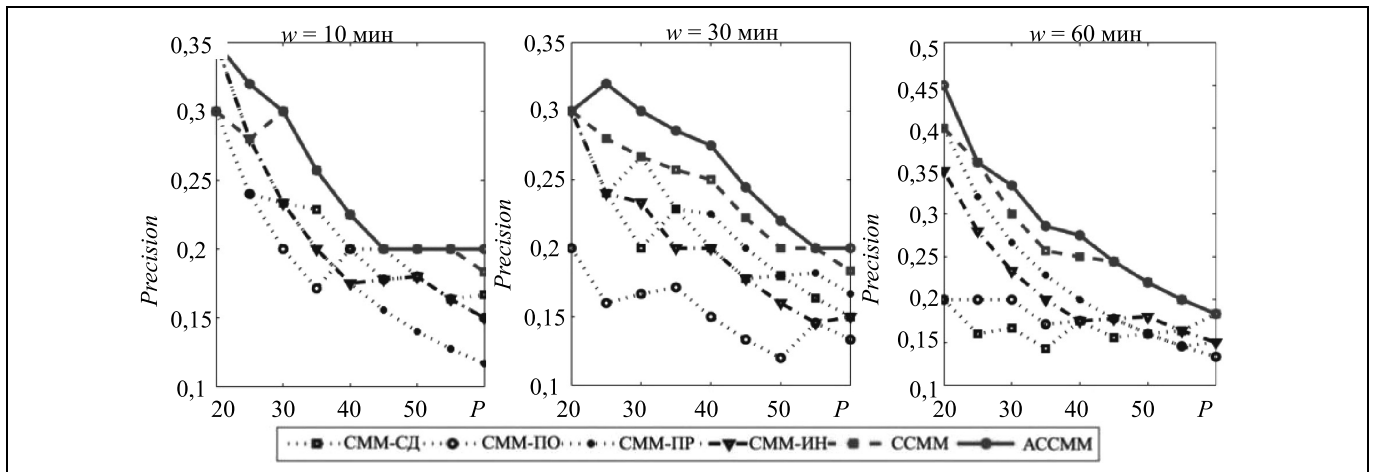
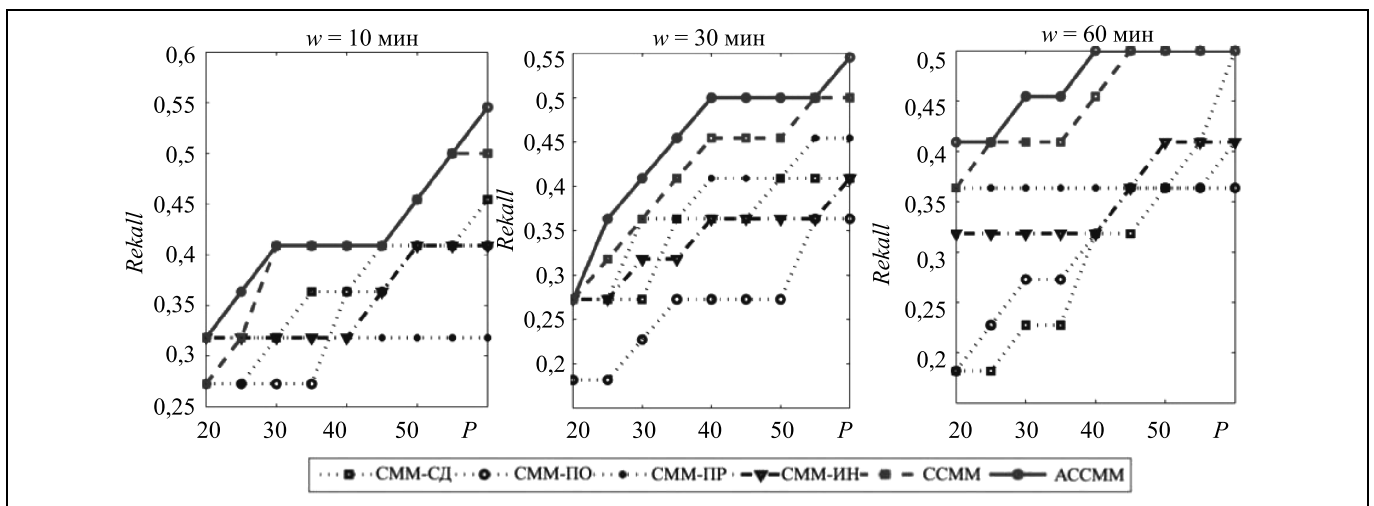
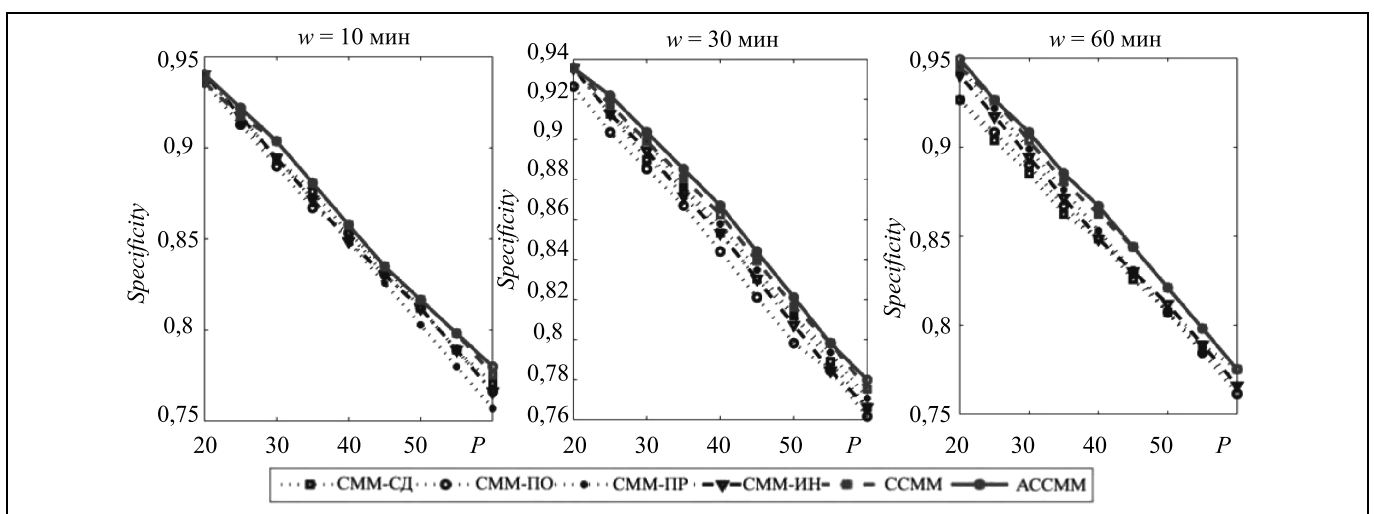
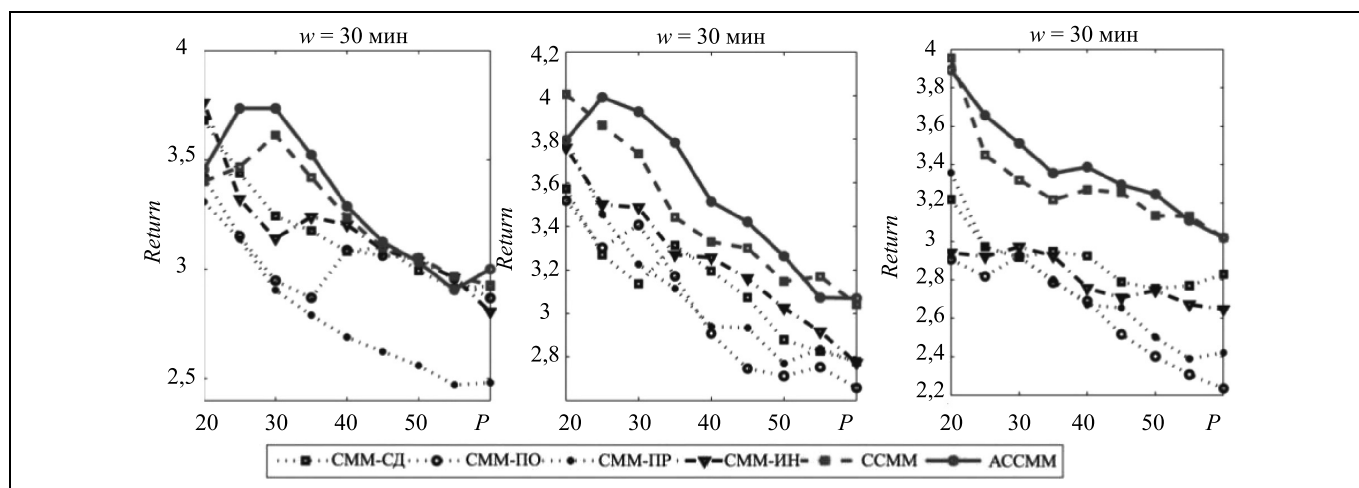


Рис. 3. Динамика параметра  $Accuracy$

Рис. 4. Динамика параметра *Precision*Рис. 5. Динамика параметра *Recall*Рис. 6. Динамика параметра *Specificity*


Рис. 7. Динамика параметра *Return*

Эксперименты выполнены при значениях длительности интервала: 10, 30 и 60 мин.

Наиболее точно входные данные моделирует АССММ. Однако отметим, что, хотя ССММ уступает АССММ, она все же превосходит по качеству моделирования стандартные СММ. Из этого следует, что учет взаимосвязей между отдельными СММ необходим для более точного описания поведения трейдеров.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Глобальный финансовый кризис 2008 года послужил стимулом к разработке автоматических методов обнаружения агрессивных стратегий на фондовом рынке, которые реализуются группой брокеров, преднамеренно вступивших в сговор. Подобные случаи привлекают внимание надзорных органов и могут послужить поводом к усилению контроля на рынке ценных бумаг [12, 13].

В данной статье продемонстрировано, что согласованное поведение брокеров с целью агрессивного манипулирования ценами аномально и точность его обнаружения зависит от точности моделирования нормального поведения трейдеров. По сравнению с существующими системами достигнуты лучшие показатели благодаря учету взаимосвязей между поведением отдельных трейдеров с помощью (адаптивных) согласованных скрытых марковских моделей. Рассмотренные методы применимы не только к фондовому рынку, но и к любым другим распределенным системам, отдельные части которых способны вступать в сложные взаимодействия друг с другом.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Zaki M. SPADE: An Efficient Algorithm for Mining Frequent Sequences // Journal Machine Learning. — 2001. — Vol. 42, iss. 1—2. — P. 31—60.
2. Srikant R., Agrawal R. Mining sequential patterns: Generalizations and performance improvements // The 5th International Conference on Extending Database Technology Proceedings. — London, 1996. — P. 3—17.
3. PrefixSpan: Mining sequential patterns efficiently by prefix-projected pattern growth / J. Pei, et al. // The 17th International Conference on Data Engineering Proceedings. — Heidelberg, Germany, 2001. — P. 215—226.
4. Sequential pattern mining using a bitmap representation / J. Ayres, et al. // The Eighth ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining Proceedings. — Edmonton, Canada, 2002. — P. 429—435.
5. Gwadera Z., Crestani F. Discovering significant patterns in multi-attribute sequences // The Eight IEEE International Conference on Data Mining Proceedings. — Pisa, 2008. — P. 827—832.
6. Brand M. Coupled hidden markov models for modeling interacting processes // Techn. Report. — URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.50.8099&rep=rep1&type=pdf> (дата обращения: 31.07.2014).
7. Gales M., Young S. The Application of Hidden Markov Models in Speech Recognition // Foundations and Trends in Signal Processing. — 2007. — Vol. 1, N 3. — P. 195—304.
8. Rabiner L. A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition // Proceedings of the IEEE. — Piscataway, 1989. — Vol. 77. — P. 257—286.
9. Dymarski P. Hidden Markov models, theory and applications. — URL: <http://www.intechopen.com/books/hidden-markov-models-theory-and-applications> (дата обращения: 20.04.2016).
10. Russell S., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. — London: Pearson Education Ltd., 2014. — 1132 p.
11. Bishop C. Pattern recognition and machine learning. — N.-Y.: Springer, 2009. — 738 p.
12. Каздагли М.Н. Выбор подходящих для высокочастотного трейдинга (ВЧТ) активов. — URL: [http://www.mlsl.info/confmlsd/MLSD\\_2012/Section2.php](http://www.mlsl.info/confmlsd/MLSD_2012/Section2.php) (дата обращения: 20.04.2016).
13. Каздагли М.Н. Перспективы использования методов оперативного принятия решений на торговых площадках. — URL: [http://www.mlsl.info/confmlsd/MLSD\\_2011/Section3.php](http://www.mlsl.info/confmlsd/MLSD_2011/Section3.php) (дата обращения: 20.04.2016).

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.С. Манделем.

Каздагли Михаил Нижмеддинович — науч. сотрудник, Техасский университет, г. Остин,   
✉ mkazdagli@gmail.com.



# ПРИМЕНЕНИЕ МАТРИЦ МИГРАЦИЙ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ И УПРАВЛЕНИЯ КРЕДИТНЫМ РИСКОМ БАНКОВ В РАМКАХ ПОДХОДА НА ОСНОВЕ ВНУТРЕННИХ РЕЙТИНГОВ ЗАЕМЩИКОВ

А.А. Стежкин

Отмечено, что в условиях нестабильности мировой экономики вопросы точности и надежности количественной оценки рисков и их управления приобретают особую актуальность. Подход на основе внутренних рейтингов к оценке кредитного риска позволяет осуществить его подробный анализ с высокой степенью точности. Построен инструмент на основе теории марковских цепей, позволяющий повысить качество оценки кредитного риска и, следовательно, качество систем управления им.

**Ключевые слова:** кредитный риск, подход внутренних рейтингов, матрицы миграций, марковские цепи, вероятность дефолта, экономический цикл, система управления рисками.

## ВВЕДЕНИЕ

Подход на основе внутренних рейтингов заемщиков (IRB-подход или ПВР в российской регулятивной практике) был предложен Базельским комитетом по банковскому надзору для кредитных организаций (в редакции стандартов Базель II — см. <http://www.bis.org/publ/bcbs107.htm>), чьи внутренние системы управления риском развиты в достаточной степени, чтобы использовать «продвинутое» математические модели и методы, в смысле возможностей алгоритмизации и автоматизации подходов, а также наличие высококвалифицированных математиков в составе штата сотрудников. Данный подход служит альтернативой гораздо более простому стандартизированному подходу. Однако ПВР не отменяет необходимости и важности фундаментального анализа финансового положения заемщика, а, напротив, скорее служит его «настройкой». В общих чертах ПВР представляет собой подход к оценке кредитных рисков банков на основе рейтингов заемщиков, которые устанавливают сами банки. Рейтинговая система представляет собой математическую модель, на входе которой — агрегированные коли-

чественные и качественные показатели заемщиков, а на выходе — определенный кредитный рейтинг с соответствующими вероятностью дефолта и нормой резервирования.

В 2014—2015 гг. Банк России детализировал и уточнил позицию по ПВР, издав Указание Банка России от 06.08.2015 № 3752-У «О порядке рассмотрения Банком России ходатайств банков о применении подхода на основе внутренних рейтингов к расчету кредитного риска», а также Положение Банка России от 06.08.2015 № 483-П «О порядке расчета величины кредитного риска на основе внутренних рейтингов», отдельно отмечая исключительную важность внутренних рейтинговых систем для эффективного управления рисками. Именно на основе информации об ожидаемом профиле риска банка, качестве его активов, потенциальных позитивных или негативных изменений в основных показателях деятельности и принимаются управленческие решения по реализации той или иной стратегии развития. В этом смысле ПВР служит отличным примером подхода к оценке риска, напрямую влияющем на такие аспекты систем риск-менеджмента банка, как досоздание резервов на возможные потери, переход на более продвинутое модели расчета ключевых индикато-

ров рынка, политика управления срочностью активов и пассивов.

Если рассматривать банк и совокупность его заемщиков как замкнутую систему, то можно утверждать, что количественные и качественные показатели заемщиков полностью определяют его платежеспособность, а, следовательно, и вероятность дефолта. Однако, поскольку упомянутая система в действительности не является замкнутой, то необходимо учесть внешние макроэкономические факторы. Так, очевидно, что вероятность дефолта заемщика возрастает в периоды экономических спадов, и, напротив, снижается в периоды экономических подъемов. Например, согласно некоторым исследованиям [1–3], ряд макроэкономических показателей, например, темп роста ВВП, коррелируют со значением вероятности дефолта.

В настоящей статье остановимся на проблеме учета влияния делового (экономического) цикла на финансовые показатели заемщиков банка, а значит, и на все основные показатели их в рамках ПВР, оказывающие значительное влияние на качество управления рисками. В соответствии с действующими подходами Банка России, содержащимися в упомянутых документах, кредитные организации в процессе оценки кредитного риска на основе внутренних моделей, как определенного этапа риск-менеджмента, должны учитывать всю имеющуюся информацию как о заемщике, так и о состоянии рынка и экономической ситуации. Согласно имеющимся примерам международной практики и опыта российских банков, ряд кредитных организаций не усматривают существенного влияния смены периодов экономического цикла на ключевые параметры рейтинговых систем. Другие банки, напротив, уделяют этому довольно большое внимание. Одновременно отметим, что в российской практике примеры учета изменений экономического цикла представлены исключительно в рамках предложенных Базелем II подходов.

## 1. РЕЙТИНГОВАЯ ФИЛОСОФИЯ В СООТВЕТСТВИИ С РЕКОМЕНДАЦИЯМИ БАЗЕЛЯ II

Существуют две так называемых рейтинговые философии (rating philosophy). Одна из них носит название «в момент времени» (point-in-time, PIT) и позволяет определить вероятность дефолта, как следует из термина, в конкретный момент времени, т. е., принимая во внимание ожидаемое изменение экономического цикла. Другая называется «в течение цикла» (through-the-cycle, TTC). Она предполагает измерение средней вероятности де-

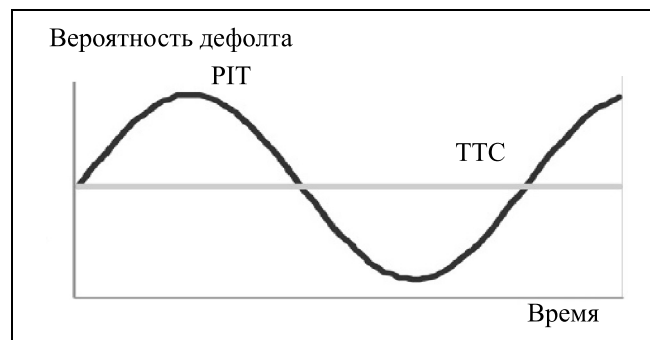


Рис. 1. Зависимость вероятности дефолта от времени в рамках рейтинговых философий PIT и TTC

фолта за весь экономический цикл, т. е. в ее основу заложены некоторые усредненные показатели экономики (рис. 1).

В рамках международной практики предпочтение зачастую отдается философии TTC, поскольку она позволяет обеспечивать стабильность требований к капиталу, что в свою очередь соответствует ожиданиям как регулятора (в части отсутствия резких колебаний величины достаточности капитала), так и акционеров (в части стабильного дохода).

Модели в рамках TTC, строятся, например, с помощью модели «переменного коэффициента» (Variable Scalar Approach), позволяющей трансформировать модель PIT в TTC, искусственно снижая вероятность дефолта в периоды потерь и, наоборот, повышая ее в периоды роста до некоторого значения, соответствующего средней вероятности дефолта, вычисленной за долгосрочный период.

Опишем формально, как работает эта модель.

**Шаг 1.** Определяем среднюю вероятность дефолта по портфелю за долгосрочный период (положим, она составляла 0,05).

**Шаг 2.** Определяем среднюю вероятность дефолта с использованием текущей рейтинговой модели PIT (положим, она составила 0,025).

**Шаг 3.** Определяем искомый коэффициент путем деления исторической вероятности дефолта (за долгосрочный период) на вероятность дефолта согласно модели (в нашем случае получим:  $0,05/0,025 = 2$ ).

**Шаг 4.** Корректируем результаты рейтинговой модели PIT на полученный коэффициент. Ясно, что средняя вероятность дефолта по полученной скорректированной модели будет соответствовать вероятности дефолта по портфелю за долгосрочный период (т. е. как в модели TTC).





## 2. МАТРИЦЫ МИГРАЦИЙ

Введем понятие матрицы миграций (матрицы переходных вероятностей). Матрицей миграций за период времени  $[t, t + \Delta t]$  назовем матрицу

$$Q(\Delta t) \equiv Q(t, t + \Delta t) = \begin{pmatrix} q_{11}(\Delta t) & \dots & q_{1n}(\Delta t) \\ \dots & \dots & \dots \\ q_{n1}(\Delta t) & \dots & q_{nn}(\Delta t) \end{pmatrix},$$

где ее элементы

$$q_{ij}(\Delta t) \equiv P[R(t + \Delta t) = j | R(t) = i] \geq 0, \quad \forall i, j \in S,$$

представляют собой вероятность за промежуток времени  $\Delta t$  поменять рейтинг с  $i$  (в момент времени  $t$ ) на  $j$  (в момент времени  $t + \Delta t$ ),  $S = \{1, 2, \dots, n\}$  — множество рейтинговых оценок. Рейтингу 1 соответствует наивысший рейтинг, рейтингу  $n$  — дефолт.

Видно, что  $n$ -й столбец матрицы миграций состоит из вероятностей дефолта для всех рейтинговых шкал.

В основе процесса рейтинговых миграций лежат два предположения:

- процесс является марковским [4] — вероятность перехода в некое будущее состояние  $j$  зависит только от текущего состояния и не зависит от того, какой рейтинг был ранее, формально это выглядит так:

$$\begin{aligned} P[R(t + \Delta t) = j | R(t), R(t - 1), R(t - 2) \dots] = \\ = P[R(t + \Delta t) = j | R(t)], \quad \forall j \in S; \end{aligned}$$

- однородность по времени — вероятности перехода зависят только от конкретного промежутка времени  $\Delta t$ , т. е. имеем семейство матриц перехода

$$Q(\Delta t) \equiv Q(t, t + \Delta t) = Q(t - k, t - k + \Delta t) \quad \forall k.$$

Напомним, что в теории случайных процессов марковской цепью называется последовательность с конечным (дискретное время) или счетным (непрерывное время) числом событий, таких, что при условии фиксированного настоящего будущие значения процесса не зависят от прошлого.

В дискретном времени обозначим за  $N_i(t)$  число заемщиков с рейтингом  $i$  в момент времени  $t$ , а за  $N_{ij}(t, t + 1)$  — число заемщиков, чей рейтинг сменился с  $i$  на  $j$  на момент времени  $t + 1$ .

Тогда частота миграции [5]

$$\hat{q}_{ij}(t, t + 1) = \frac{N_{ij}(t, t + 1)}{N_i(t)}, \quad t = 1, 2, \dots, T.$$

С учетом однородности марковской цепи по времени получим оценку максимального правдоподобия для частоты миграции (вероятности перехода) на горизонте в год:

$$\begin{aligned} \hat{q}_{ij} &\equiv \hat{q}_{ij}(1) = \sum_{t=1}^T w_i(t) \hat{q}_{ij}(t, t + 1) = \\ &= \sum_{t=1}^T N_{ij}(t)(t, t + 1) / \sum_{t=1}^T N_{ij}(t) = N_{ij} / N_i. \end{aligned}$$

Здесь  $w_i(t) = N_i(t) / \sum_{t=1}^T N_i(t)$  — веса за соответствующий период  $t$ . Таким образом, частота миграции может быть определена через отношение

полного числа заемщиков, рейтинг которых изменился с  $i$  на  $j$ , к полному числу заемщиков с рейтингом  $i$  в конкретном моменте времени.

В случае непрерывного времени введем понятие матрицы интенсивности переходов (или производящей матрицы). Таковой будем называть матрицу

$$\Lambda_t \equiv \{\lambda_{ij}(t)\}_{ij \in S},$$

в которой каждый недиагональный элемент  $\lambda_{ij}(t)$ ,  $i \neq j$  представляет собой функцию зависимости интенсивности перехода (изменения рейтинга) от времени; диагональные элементы задаются как  $\lambda_{ii}(t) \equiv \lambda_i(t) = -\sum_{i \neq j} \lambda_{ij}(t)$ ; таким образом, сумма элементов каждой строки матрицы  $\Lambda_t$  равна нулю.

Вероятность миграции рейтинга за произвольный промежуток времени  $\tau$ :

$$P[R(t + \Delta t) = j | R(t) = i] = \lambda_{ij}(t)\tau, \quad i \neq j.$$

При условии однородности по времени  $\lambda_{ij}(t) = \lambda_{ij}$ , и оценка максимального правдоподобия для интенсивностей перехода имеет вид:

$$\hat{\lambda}_{ij} N_{ij}(0, T) / \int_0^T Y_i(s) ds, \quad i \neq j,$$

где  $N_{ij}(0, T)$  — общее число переходов от рейтинга  $i$  к рейтингу  $j$  за весь рассматриваемый период времени;  $Y_i(s)$  — число заемщиков, отнесенных к

рейтингу  $i$  в момент времени  $s$ ; интеграл  $\int_0^T Y_i(s) ds$ ,

таким образом, определяет совокупное время, которое все заемщики выборки находились отнесенными к рейтингу  $i$ .

Оценку для матрицы интенсивности переходов можно представить в виде матричной экспоненты [6, с. 131]):

$$\hat{Q}(\Delta t) = \hat{Q}(t + \Delta t) = e^{(\Delta t)\hat{\Lambda}} = \hat{V} \exp(t\hat{D}) \hat{V}^{-1},$$

где  $\exp(t\hat{D}) = \text{diag}(e^{\alpha_1 t} \dots e^{\alpha_n t})$  — диагональная матрица с  $\alpha_i$  собственными значениями матрицы  $\hat{\Lambda}$ ,  $\hat{V}$  — матрица, составленная из собственных векторов матрицы  $\hat{\Lambda}$ , экспонента  $e^{(\Delta t)\hat{\Lambda}}$  может быть разложена в ряд Тейлора:  $e^{(\Delta t)\hat{\Lambda}} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{[(\Delta t)\hat{\Lambda}]^k}{k!}$ .

Описанные матрицы миграций по своей сути служат вспомогательным статистическим инструментом, позволяющим оценить, насколько вероятно негативное (реже — позитивное) изменение кредитного рейтинга заемщика и, соответственно, к каким потерям для банка это может привести.

Пожалуй, наиболее подробно матрицы миграции в задачах моделирования кредитного риска, а также иных экономических и финансовых задач моделируются с помощью марковских цепей. Этому посвящены как фундаментальные труды [7], так и исследования регулятивных органов (например, немецкого Бундесбанка [8]). Подробное исследование использования матриц миграции было проведено Национальным банком Хорватии [9]. В нем, в частности, описано применение механизма генерации выборок по Гиббсу (описание в общем виде см., например, в работе [10] для уточнения моделирования матриц миграции с помощью цепей Маркова путем оценки совместного распределения случайных величин, а также для минимизации апостериорного математического ожидания функции потерь при миграции рейтингов используется байесовская оценка решения. Наконец, отметим еще моделирование матриц миграции с помощью обобщенной линейной модели GLM [11]. Две модификации этой модели (GLMM) — маргинальная (marginal) и переходная (transitional) — определяют рейтинг как линейную функцию предыдущих состояний с различными начальными допущениями [12]. Функция, как правило, ищется методом наибольшего правдоподобия.

В российской практике матрицы миграции используются по большей части в справочных целях. Так, в довольно подробном руководстве по валидации рейтинговых систем, составленном Ассоциацией российских банков в сотрудничестве с рядом ведущих консалтинговых компаний и кредитных организаций [13], роль матриц миграций описана довольно кратко. Их анализ проводят для

выявления, насколько стабильны рейтинги отдельных клиентов, причем банк самостоятельно определяет критерии по признанию рейтингов стабильными (см. с. 26 этого руководства).

Обзор русскоязычных работ, посвященных применению матриц миграции для оценки существенности влияния изменения экономического цикла, а также вероятных ухудшений финансового положения заемщиков на показатели рейтинговых систем банков, и, как следствие, показатели их деятельности, показал результаты, аналогичные упомянутому. Так, в ряде работ выполнен общий анализ рейтинговых систем с указанием матриц миграций как аналитического инструмента, применяемого банками (см., например, работу [14]) и международными рейтинговыми агентствами [15]. В других работах говорится о применении матриц миграции для оценки изменений справедливой стоимости финансовых инструментов в целях расчета кредитного риска [16]. Наконец, матрицы миграции приводятся в рамках общего повествования о ПБР [17, 18].

Мы же, как было сказано, будем пользоваться не только матрицами миграции кредитных рейтингов, но и матрицами миграции состояний экономики. Совместим эти два инструмента для оценки вероятности изменения рейтинга заемщиков в условиях меняющейся экономической и финансовой конъюнктуры. Кроме того, рассмотрим ряд связанных прикладных задач, связанных с управленческими решениями в банке, по созданию резервов кредитными организациями, количественному ограничению профиля риска и др.

### 3. УЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЦИКЛА

Без ограничения общности внутри экономического цикла определим три фазы — подъем (будем отмечать индексом  $E$  от *expansion*), спад ( $C$  от *contraction*) и стабильное состояние ( $N$ ). Трехфазный экономический цикл, пожалуй, довольно хорошо характеризует последние 20 лет ситуации в российской экономике. При необходимости число фаз может быть изменено, что потребует лишь добавления и исключения дополнительных параметров системы. Положим для определенности, что в момент времени  $t$  система находится в периоде экономического подъема.

Матрица

$$S(1) \equiv S(t, t+1) = \begin{pmatrix} \vartheta & \phi & (1 - \vartheta - \phi) \\ \zeta & \delta & (1 - \zeta - \delta) \\ \varepsilon & (1 - \varepsilon - \gamma) & \gamma \end{pmatrix}$$

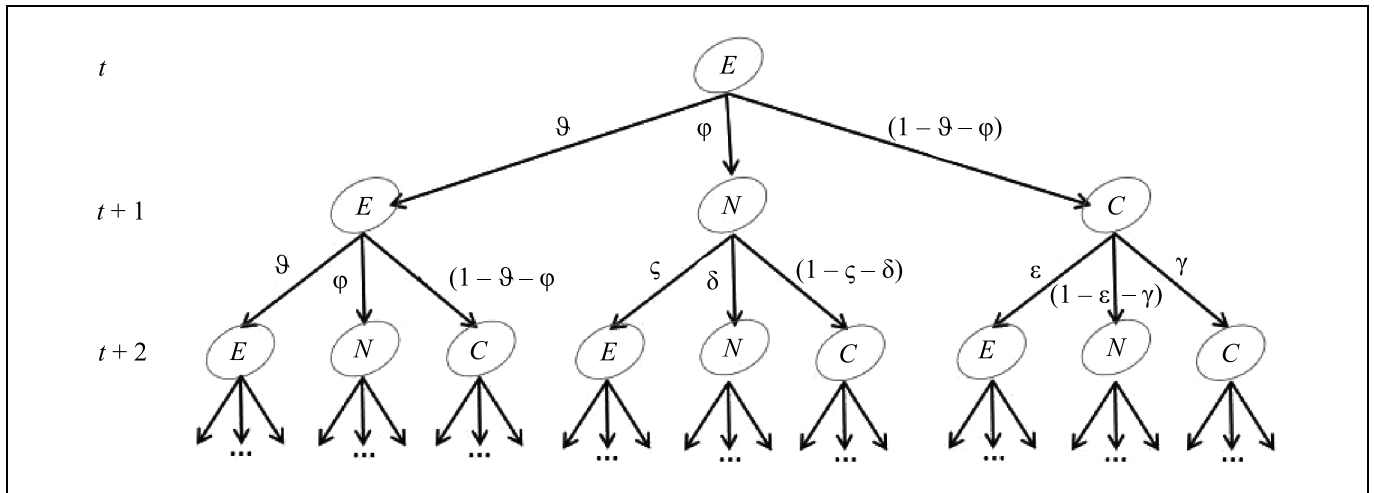


Рис. 2. Дерево трехфазного экономического цикла с условием периода экономического роста в момент времени  $t$

характеризует трехфазный цикл, где  $\theta$  — вероятность того, что в момент времени  $t + 1$  экономический рост сохранится (мы предположили, что в момент времени  $t$  наблюдается экономический подъем),  $\phi$  — вероятность того, что в момент времени  $t + 1$  экономический рост сменится стабильным периодом,  $(1 - \theta - \phi)$  — вероятность того, что в момент времени  $t + 1$  наступит экономический спад,  $\zeta$ ,  $\delta$ ,  $\epsilon$  и  $\gamma$  — аналогичные величины из предположения, что в момент времени  $t$  система находилась в ином периоде экономического цикла.

Указанные вероятности служат внешними параметрами для нашей модели и могут быть получены с помощью описанного ранее алгоритма для марковских цепей с непрерывным временем для соответствующей матрицы миграций  $\Lambda_S$ . Скажем, интенсивность перехода  $\hat{\lambda}_{EC}$  может быть вычислена как отношение числа переходов от экономического подъема к экономическому спаду за рассматриваемый период к общей длительности фаз экономического подъема за этот период. Аналогично могут быть получены интенсивности остальных переходов [19].

В условиях каждой рассматриваемой фазы рейтинги заемщиков изменяются по-разному. Обозначим через  $Q_E$ ,  $Q_N$  и  $Q_C$  матрицы миграций для фаз экономического цикла. Эти матрицы могут быть построены на основе наблюдений миграций внутри рейтинговой шкалы в соответствующие периоды экономического цикла.

Смешанный процесс, учитывающий как изменения в экономике, так и непосредственные миг-

рации рейтингов, можно представить одноперiodической матрицей перехода

$$M(1) \equiv M(t, t + 1) = \begin{pmatrix} M_1 & M_2 & M_3 \\ M_4 & M_5 & M_6 \\ M_7 & M_8 & M_9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \theta Q_E & \phi Q_N & (1 - \theta - \phi) Q_C \\ \zeta Q_E & \delta Q_N & (1 - \zeta - \delta) Q_C \\ \epsilon Q_E & (1 - \epsilon - \gamma) Q_N & \gamma Q_C \end{pmatrix}.$$

Все элементы матрицы  $M$  являются неотрицательными матрицами, суммы элементов каждой строки которых равны 1.

Рассмотрим произвольного заемщика с рейтингом  $i$  в момент времени  $t$  в условиях экономического подъема. Вероятность того, что рейтинг этого заемщика в момент времени  $t + 1$  будет понижен до  $j$  в условиях, что экономический подъем сменится стабильным периодом, согласно матрице  $M$ , есть  $\phi q_{ijN}$ . Для того чтобы определить это, обратим внимание на матрицу  $M_2 = \phi Q_N$ , являющуюся матрицей перехода при смене экономического роста на стабильный период, и найдем в ней искомый элемент, задающий вероятность изменения рейтинга с  $i$  на  $j$ .

Дерево трехфазного экономического цикла представлено на рис. 2. Оно построено из предположения, что в текущий момент времени период экономического подъема. Отсюда легко можно найти, например, матрицу  $Q_E(1) \equiv Q_E(t, t + 1)$ . Для этого нужно найти комбинацию вероятностей перехода фаз экономического цикла и самих воз-

можных переходов  $E(t) \rightarrow E(t+1)$ ,  $E(t) \rightarrow N(t+1)$  и  $E(t) \rightarrow C(t+1)$ :

$$\begin{aligned} Q_E(1) &\equiv X \equiv M_1 + M_2 + M_3 = \\ &= \vartheta Q_E + \phi Q_N + (1 - \vartheta - \phi) Q_C \end{aligned}$$

Аналогично:

$$\begin{aligned} Q_N(1) &\equiv Y \equiv M_4 + M_5 + M_6 = \\ &= \zeta Q_E + \delta Q_N + (1 - \zeta - \delta) Q_C \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_C(1) &\equiv Z \equiv M_7 + M_8 + M_9 = \\ &= \varepsilon Q_E + (1 - \varepsilon - \gamma) Q_N + \gamma Q_C \end{aligned}$$

Обозначим  $L = (X \ Y \ Z)$  и  $F = (M_1 \ M_2 \ M_3)$ .

Для нахождения матрицы миграций за два периода применяем тот же прием:

$$\begin{aligned} Q_E(2) &= M_1 Q_E(1) + M_2 Q_N(1) + M_3 Q_C(1) = \\ &= M_1 X + M_2 Y + M_3 Z = FL^T. \end{aligned}$$

Очевидно, что согласно нашей модели экономика в момент времени  $n$  будет иметь  $3^n$  путей развития. Кроме того, можно показать, что матрица миграций за период времени длиной  $n \geq 2$  определяется выражением  $Q_E(n) \equiv FM^{n-2}L^T$ .

Аналогично определим и матрицы  $Q_N(n)$  и  $Q_C(n)$ , положив  $F = (M_4 \ M_5 \ M_6)$  и  $F = (M_7 \ M_8 \ M_9)$  соответственно.

Итак, мы построили трехфазную модель, сочетающую в себе возможность оценки вероятности изменения рейтинга с течением времени с учетом предполагаемой ситуации в экономике.

#### 4. ЗАДАЧИ ОЦЕНКИ РАЗМЕРА ДОСОЗДАВАЕМОГО РЕЗЕРВА

Применим описанный подход учета влияния изменения экономического цикла во времени к решению вопросов управления капиталом кредитной организации.

Примем что, рейтинговая система состоит из  $n$  различных рейтинговых оценок, т. е.  $S = \{1, 2, \dots, n\}$  — множество рейтинговых оценок, где 1 — наивысший рейтинг, а  $n$  — дефолт.

Каждой рейтинговой оценке  $k \in S$  соответствует число  $\alpha_k$ , которое мы назовем нормой резервирования. Оно определяет относительный размер (в процентах) резерва, который должен быть сформирован по ссуде заемщика с рейтингом  $k$  согласно свойствам рейтинговой системы кредитной организации, т. е. это внутренний параметр системы.

Обозначим через  $\{L_m\}_{m \in N}$  множество ссуд, составляющих кредитный портфель банка. Рассмотрим

произвольную ссуду из портфеля  $L_m$ . Пусть в момент времени  $t$  она была отнесена к рейтингу  $i$ , а затем в момент времени  $t+1$  реклассифицирована в рейтинг  $j$ .

Тогда по ссуде  $L_m$  размер резерва, который необходимо доформировать вследствие реклассификации, составит:

$$R_{m_{ij}} = L_m(\alpha_j - \alpha_i).$$

В случае если  $\alpha_j < \alpha_i$ , значение  $R_{m_{ij}} < 0$ , т. е. резерв нужно восстановить, поскольку рейтинг заемщика улучшился.

Определим, как и ранее, матрицу миграций  $Q(\Delta t)$ .

Очевидно,  $\sum_{j=1}^n R_{m_{ij}} q_{ij} = 0$ , поскольку суммы эле-

ментов  $q_{ij}$  построчно равны нулю. В целях оценки рассмотрим только такие изменения рейтинга, при которых он ухудшается (негативный сценарий).

Для каждой ссуды  $L$  определим выборочное математическое ожидание:

$$R = \sum_{j>i} L(\alpha_j - \alpha_i) q_{ij} = L \sum_{j>i} (\alpha_j - \alpha_i) q_{ij}.$$

Данное выражение задает средний размер резерва, который должен быть доформирован по ссуде  $L$  в случае ухудшения рейтинга заемщика  $m$  с рейтингом  $i$ .

Рассмотрим пару примеров практического применения концепции матриц миграции в части вопросов управления капиталом банка.

**Пример 1.** Определение размера резерва на возможные потери по ссудам к доформированию.

Вновь рассмотрим множество ссуд  $\{L_m\}_{m \in N}$ . Каждая ссуда, согласно рейтинговой системе кредитной организации, имеет какой-то рейтинг  $i_m$  в момент времени  $t$ . Тогда выборочное математическое ожидание по всему кредитному портфелю

$$R = \sum_{m \in N} \sum_{j>i} L_m(\alpha_j - \alpha_{i_m}) q_{i_m j}.$$

Это выражение задает средний размер резерва, который должен быть доформирован по всему кредитному портфелю в случае ухудшения рейтингов заемщиков.

Положим, что в рамках процесса мониторинга рисков рассматривается несколько вероятных сценариев изменения экономической ситуации. Каждому сценарию соответствует своя матрица миграций  $Q^p(\Delta t)$ , учитывающая те или иные предполагаемые события (например, что в условиях экономического спада вероятности снижения кредитного рейтинга растут, в условиях подъема — наоборот). В начальный момент времени  $t$  фактический размер сформированного резерва на воз-





возможные потери по ссудам равняется  $R_t$  (по данным финансовой отчетности).

Рассмотрим ряд величин

$$R_{t+1}^p = \sum_{m \in N} \sum_{j>i} L_m(\alpha_j - \alpha_{i_m}) q_{i_m j}^p,$$

где  $q_{i_m j}^p$  — элементы матрицы  $Q^p(\Delta t)$ .

Отсюда в условиях рассматриваемых сценариев максимальный размер резерва к досозданию определится из попарного сравнения получившихся значений  $R_{t+1}^p$  и фактического значения  $R_t$ :

$$\Delta R = \max_p \{R_{t+1}^p - R_t\}.$$

Описанная концепция вновь учитывает только негативный эффект изменения экономической ситуации, т. е. только вероятности ухудшения рейтинга. Положительный эффект (вероятности повышения рейтинга) также может быть учтен. Для этого в выражении для  $R_{t+1}^p$  будем суммировать по всем рейтингам  $j$ , т. е.

$$R_{t+1}^p = \sum_{m \in N} \sum_{j=1}^n L_m(\alpha_j - \alpha_{i_m}) q_{i_m j}^p.$$

Приведенный метод может стать полезным инструментом принятия решений при оценке структуры кредитного портфеля в разрезе рейтингов. В то же время, поскольку полученная формула неявно (через относительные значения долей резервирования  $\alpha_j$ ) характеризует рейтинговую систему банка, то неудовлетворительные результаты расчетов могут быть основанием для корректировки этой системы.

**Пример 2.** Определение ограничений на размер отдельных классов кредитных требований.

Рассмотрим теперь систему укрупненно в рамках определенного класса кредитных требований. Величина, заданная в виде  $\sum_{j>i} (\alpha_j - \alpha_i) q_{ij}$ , определяет выборочное среднее процентного размера ссуды к доформированию в случае ухудшения рейтинга. Просуммируем приведенное выражение по всем  $i$ . Очевидно, при этом мы переберем все ссуды нашего кредитного портфеля, поскольку

$$L = L_1 \cup L_2 \cup \dots \cup L_n.$$

Таким образом, совокупный относительный размер резерва на возможные потери, который должен быть доформирован по всему портфелю, выражается как

$$R_{\%} = \sum_{i=1}^n \sum_{j>i} v_i(\alpha_j - \alpha_i) q_{ij},$$

где  $v_i = L_i/L$  — доля ссуд с рейтингом  $i$  в совокупном портфеле рассматриваемого типа кредитных требований.

Умножив полученное выражение на совокупный размер кредитного портфеля  $L$ , получим количественную оценку резерва в условиях негативного сценария:

$$R = R_{\%} L = L \sum_{i=1}^n \sum_{j>i} v_i(\alpha_j - \alpha_i) q_{ij}.$$

С позиций управления рисками кредитной организации эта величина не должна превышать имеющийся запас капитала.

Определим норматив достаточности капитала, который характеризует способность банка нивелировать возможные финансовые потери за свой счет, не в ущерб своим клиентам, как  $k = K/RWA$ , где  $K$  — капитал кредитной организации,  $RWA$  — взвешенные по риску активы (сумма произведений значений кредитных требований на коэффициенты риска по ним).

Доформирование резервов по ссудам уменьшает капитал кредитной организации. Положим,  $\beta$  — минимальное значение норматива достаточности капитала, установленное системой управления рисками банка.

Тогда максимальное значение резерва  $A$ , который может быть доформирован по ссудам кредитного портфеля, определится из уравнения:

$$\beta = \frac{K-A}{RWA-A},$$

$$\text{т. е. } A = \frac{K - \beta RWA}{1 - \beta}.$$

Отсюда ограничение на размер резерва, который может быть доформирован без критического влияния на капитал кредитной организации:

$$L \sum_{i=1}^n \sum_{j>i} v_i(\alpha_j - \alpha_i) q_{ij} \leq A.$$

Из данного соотношения получим следующий практический вывод. Рассматривая рейтинговую систему кредитной организации для определенного класса кредитных требований в условиях негативного сценария, мы можем указать максимальный размер совокупных кредитных требований этого класса — такой, при котором даже при негативном исходе с управленческой точки зрения не будут нарушены требования по запасу достаточности капитала банка:

$$L \leq A / \sum_{i=1}^n \sum_{j>i} v_i(\alpha_j - \alpha_i) q_{ij}$$

или, с учетом выражения размера резерва через капитал и взвешенные по риску активы,

$$L \leq (K - \beta RWA) / (1 - \beta) \sum_{j>i} v_i(\alpha_j - \alpha_i) q_{ij}.$$

Полученная формула, с одной стороны, позволяет оценить оптимальный размер кредитных требований, т. е. она может найти свое применение в мониторинге рисков, с другой стороны, неудовлетворительные результаты расчетов (например, неправдоподобно низкое значение  $L$ ) могут стать причиной, как и в ранее рассмотренной задаче, корректировки рейтинговых систем.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для учета эффекта влияния экономического цикла на рейтинговые системы кредитных организаций могут быть полезны матрицы миграций,



построенные на основе концепции марковских цепей. В совокупности они представляют собой полезный статистический инструмент для решения широкого круга задач в рамках оценки кредитного риска. Построение такой матрицы требует определенных усилий в части поиска релевантной статистики на рассматриваемом горизонте времени, однако цель оправдывает средства, поскольку учет изменений в экономике представляет собой одну из самых существенных трудностей в процессе создания рейтинговых систем в рамках подхода внутренних рейтингов.

Построена модель трехфазного экономического цикла, которая при желании может быть сокращена или расширена в зависимости от приоритетов детализации. В то же время с помощью матриц миграции может быть решен и ряд практических управленческих задач, две из них рассмотрены в настоящей статье. Задачи, связанные с оценкой допустимых размеров кредитного портфеля, а также принимаемых рисков в терминах размера досоздаваемого резерва составляют существенную долю функционала систем управления рисками кредитных организаций.

## ЛИТЕРАТУРА

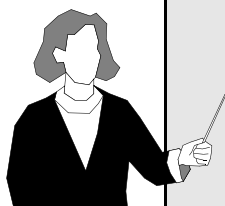
1. *Figlewski S.* Estimating the Implied Risk Neutral Density for the U.S. Market Portfolio. — Oxford: Oxford University Press, 2008. — 43 p.
2. *Varotto S.* Stress Testing Credit Risk: The Great Depression Scenario. — URL: [https://www.bundesbank.de/Redaktion/EN/Downloads/Bundesbank/Research\\_Centre/Conferences/2011/2011\\_10\\_19\\_eltville\\_11\\_varotto\\_paper.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bundesbank.de/Redaktion/EN/Downloads/Bundesbank/Research_Centre/Conferences/2011/2011_10_19_eltville_11_varotto_paper.pdf?__blob=publicationFile) (дата обращения 4.05.2016).
3. *Gaffney E., Kelly R., McCann F.* A Transitions-Based Framework for Estimating Expected Credit Losses. — URL: <https://www.centralbank.ie/publications/Documents/16RT14.pdf> (дата обращения 4.05.2016).
4. *Aalen O., Johansen S.* An Empirical Transition Matrix for Nonhomogeneous Markov Chains Based on Censored Observations // *Scandinavian Journal of Statistics*. — 1978. — Vol. 5. — P. 141–150.
5. *Gavalas D., Syriopoulos T.* Bank Credit Risk Management and Rating Migration Analysis on the Business Cycle // *International Journal of Financial Studies*. — 2014. — Vol. 2. — P. 122–143.
6. *Grzybowska U., Karwaiski M.* Application of migration matrices to risk evaluation and their effect on portfolio value // *Quantitative Methods in Economics*. — 2013. — Vol. XIV, N 1. — P. 127–136.
7. *Trueck S., Rachev S.* Ratings Based Modeling of Credit Risk. — Academic Press, 2009. — 280 p.
8. *Krüger U., Stötzel M., Trück S.* Time Series Properties of a Rating System Based on Financial Ratios // *Deutsche Bundesbank Discussion Paper*. — 2005. — N 14. — 50 p.
9. *Kunovac D.* Estimation Credit Migration Matrices with Aggregate Data — Bayesian Approach / Working Papers W-30. — Zagreb: Croatian National Bank, 2011. — 36 p.
10. *Rodriguez-Yam G., Davis R., Scharf L.* Efficient Gibbs Sampling of Truncated Multivariate Normal with Application to Constrained Linear Regression. — URL: <http://www.stat.columbia.edu/~rdavis/papers/CLR.pdf> (дата обращения 25.05.2016).
11. *Agresti A.* Categorical Data Analysis / Wiley Series in Probability and Statistics. — New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2002. — 30 p.
12. *Grzybowska U., Karwaiski M., Orlowski A.* Examples of Migration Matrices Models and their Performance in Credit Risk Analysis // *Acta Physica Polonica*. — 2012. — Vol. 121. — P. 40–46.
13. *Валидация.* Комитет АРБ по стандартам Базель II и управлению рисками. — URL: [http://arb.ru/b2b/docs/validatsiya\\_komiteta\\_arb\\_po\\_standartam\\_bazel\\_ii\\_i\\_ upravleniyu\\_riskami-9752430/](http://arb.ru/b2b/docs/validatsiya_komiteta_arb_po_standartam_bazel_ii_i_ upravleniyu_riskami-9752430/) (дата обращения 4.05.2016).
14. *Васильюк А., Карминский А., Сосюрко В.* Система моделей рейтингов банков в интересах IRB-подхода: сравнительный и динамический анализ. — М.: ВШЭ, 2011. — 68 с.
15. *Карминский А., Пересецкий А., Головань С.* и др. Модели рейтингов международных агентств / Препринт # WP2007/70R. — М.: Российская экономическая школа, 2007. — 59 с.
16. *Фантазини Д.* Эконометрический анализ финансовых данных в задачах управления риском. Часть 4: Управление кредитным риском // *Прикладная эконометрика*. — 2009. — № 1 (13). — С. 105–137.
17. *Жариков В.В.* Управление кредитными рисками. — Тамбов: Тамбовский гос. техн. ун-т, 2009. — 244 с.
18. *Жевага А.А., Моргунов А.В.* Использование сводных макроэкономических индикаторов для калибровки внутренних рейтинговых моделей в банках // *Деньги и кредит*. — 2015. — № 8. — С. 39–46.
19. *Fei F., Fuertes A.-M., Kalotychou E.* Credit Rating Migration Risk and Business Cycles // *Journal of Business Finance & Accounting*. — 2011. — Vol. 39. — P. 229–263.

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.С. Манделем.

Стежкин Александр Александрович — аспирант, Московский физико-технический институт (гос. ун-т), г. Долгопрудный, ✉ [stalex@phystech.edu](mailto:stalex@phystech.edu).

## Читайте в ближайших номерах

- ✓ Белов М.В. Модель управления человеческим капиталом фирмы
- ✓ Бурков В.Н., Коргин Н.А., Новиков Д.А. Проблемы комплексирования и декомпозиции механизмов управления организационно-техническими системами
- ✓ Кирич Ю.П., Кириянов В.В. Робастное управление технологическими процессами производства губчатого титана
- ✓ Микрин Е.А., Сомов С.К. Оптимальное оперативное резервирование информации в системах обработки данных на базе вычислительных сетей
- ✓ Потехин А.И. Логическая модель железнодорожной станции





# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ОЦЕНОК ДЛЯ РЕЗЕРВОВ ВРЕМЕНИ КАК ОДНА ИЗ ПРОБЛЕМ ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ

В.М. Трояновский, А.А. Запевалина, Е.Л. Румянцева, О.А. Сердюк

Рассмотрены вероятностные характеристики параметров для этапов планирования и реализации бизнес-процессов. Показано, что сумма планируемых резервов времени имеет распределение вероятностей, близкое к нормальному, уже при достаточно короткой цепочке работ. Показано также, что неизрасходованные резервы времени имеют распределение вероятностей, близкое к усеченному нормальному закону распределения. Предложена методика оценки распределения резервов времени на завершающем этапе работ. Отмечено, что проведена верификация путем сопоставления полученных теоретических результатов распределения временных интервалов с данными реального процесса прохождения писем в регионы.

**Ключевые слова:** проблемы управления, цепочка работ, статистические критерии, вероятностные характеристики, компьютерное моделирование.

## ВВЕДЕНИЕ

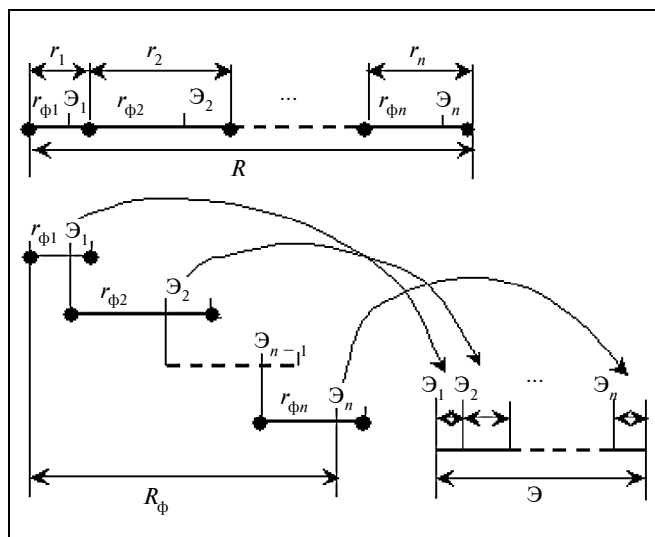
Задачи логистики и производства [1] часто объединяет невозможность строго детерминистического анализа протекающих здесь процессов. Одна из важных проблем в системах планирования и управления состоит в необходимости анализа вероятностных свойств используемых характеристик объектов и процессов. Вероятностные процессы сопровождают применение современных информационных технологий, включая разработку компьютерных программ, исследование логистических операций различных производств, организацию и планирование учебного процесса; вероятностные оценки необходимы при построении бизнес-процессов. Во всех этих случаях руководителям приходится вводить резервы при оценке трудоемкости и времени реализации каждого из этапов работ [2, 3]. Для получения надежных результатов определения таких резервов необходимо обоснование вероятностных характеристик разрабатываемых решений.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Источник анализируемой проблемы — непредвиденные потери времени при выполнении работ и введение резервов для их компенсации. На этапе планирования цепочки работ определяется некоторый общий резерв, который на этапе исполнения работ расходуется слабо предсказуемым образом, что приводит к необходимости оперативного управления на следующем этапе.

Необходимо получить оценки резервов времени как на этапе планирования, так и на этапе реализации всей цепочки работ. Случайные возмущения при прохождении работ приводят к рассмотрению процессов планирования и управления с вероятностных позиций.

Предположим, что каждая работа начинается немедленно по завершении предыдущей, а резервное время отдельных этапов накапливается и определяет резервное время работы в целом. По мере выполнения отдельных этапов реально использованный резерв оказывается исчерпанным лишь частично, и накапливаемая с некоторой ве-



**Рис. 1. Трансформация резервов в процессе исполнения работ:**  $r_{\phi i}$  — фактически использованный резерв времени на этапе  $i$ ;  $R_{\phi}$  — общее фактически использованное резервное время;  $\theta_i$  — экономия резерва времени на этапе  $i$ ;  $\Theta$  — общая экономия резервов времени

роятностью экономия резервов времени образует дополнительный запас для последующих этапов (рис. 1).

Требуется оценить статистические свойства имеющихся резервов времени и их изменений в процессе исполнения работ.

## 2. АНАЛИЗ РЕЗЕРВОВ ВРЕМЕНИ В ЦЕПОЧКЕ РАБОТ

Как известно, условия применимости центральной предельной теоремы состоят в том, что все слагаемые имеют примерно одинаковое распределение, а число слагаемых должно стремиться к бесконечности. На практике бесконечное число слагаемых не набирается, и вид распределения слагаемых можно предполагать, тем не менее, нормальный закон отчетливо проявляется для многих приложений [4].

Резервы времени на каждом из этапов могут иметь произвольный закон распределения. Дисциплинированный исполнитель с большей вероятностью использует минимальный резерв, а у недисциплинированного — кривая плотности вероятности расходования резерва нарастает к концу интервала. Можно предположить, что на каком-то из этапов имеет место равномерная плотность распределения вероятности времени резервов. Тем

не менее, в силу центральной предельной теоремы [5, 6], вероятностные характеристики общего резерва  $R$  как суммы резервов при значительном числе этапов можно аппроксимировать нормальным законом распределения.

На примере распределения резервов времени в цепочке работ определим рациональную нижнюю границу требуемого числа слагаемых для практических применений центральной предельной теоремы.

Известно [5], что закон распределения суммы двух независимых случайных величин  $Z = X + Y$  определяется как композиция законов их распределения:

$$f(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)f(z-x)dx, \quad (1)$$

$$f(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f(z-y)f(y)dy. \quad (2)$$

С помощью индуктивного подхода [7–9] и соотношений (1), (2) проследим изменение плотности распределения вероятности для суммы  $i$  независимых равномерно распределенных случайных величин резервов времени при малых  $i$ . Результаты расчетов и графики полученных распределений, а также графики нормальных распределений с соответствующими параметрами приведены в Приложении.

Полученные результаты показали, что при суммировании уже пяти равномерно распределенных случайных величин результирующее распределение незначительно отличается от нормального закона распределения с соответствующими параметрами математического ожидания и дисперсии [10]. Проверим гипотезы о соответствии рассматриваемых композиционных законов распределения нормальному закону распределения с привлечением критериев согласия, используемых в теории вероятностей.

Располагая точными теоретическими кривыми функций плотности распределения вероятности, воспользуемся критерием согласия Колмогорова — Смирнова [4, 5]. В качестве меры расхождения между теоретическим и аппроксимируемым распределением рассматривается максимальное значение модуля разности между статистической функцией распределения и соответствующей теоретической:

$$D = \max|F^*(x) - F_n(x)|, \quad (3)$$

где  $F(x)$  — интегральный закон распределения.

Таблица 1

**Определение расхождения между композиционным и нормальным распределениями**

| Число элементов с равномерным распределением     | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
|--------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Модуль максимальной разности $D$                 | 0,057 | 0,022 | 0,019 | 0,018 | 0,015 |
| $\lambda = D\sqrt{n}$<br>(при $n \approx 1000$ ) | 1,83  | 0,72  | 0,63  | 0,59  | 0,51  |
| Вероятность подобия $P(\lambda)$                 | 0,003 | 0,711 | 0,813 | 0,865 | 0,964 |

Таблица 2

**Число принятых гипотез о нормальности распределения суммы случайных величин из 100 проверяемых гипотез**

| $i$ | Критерии                    |                                                                     |                                 |
|-----|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
|     | Критерий согласия, $\chi^2$ | По доверительным интервалам для коэффициентов асимметрии и эксцесса | Критерий Колмогорова — Смирнова |
| 4   | 80                          | 78                                                                  | 79                              |
| 5   | 96                          | 94                                                                  | 95                              |
| 6   | 96                          | 93                                                                  | 95                              |
| 7   | 96                          | 92                                                                  | 95                              |
| 8   | 97                          | 98                                                                  | 98                              |
| 9   | 98                          | 95                                                                  | 97                              |
| 10  | 100                         | 99                                                                  | 97                              |

В случае дифференцируемых функций экстремум в (3) определяет экстремальные точки как соответствующие условию

$$\frac{d}{dx} F^*(x) - \frac{d}{dx} F_n(x) = 0 \text{ или } f^*(x) = f_n(x). \quad (4)$$

Уравнение (4) является трансцендентным, и реальный путь решения сводится к привлечению численных методов. Представляется целесообразным прямое использование полученных аналитических формул (см. Приложение) для композиционных законов распределения и соотношения (3) для проведения расчетов. Соответствующие результаты моделирования представлены в Приложении и в табл. 1.

Для проверки гипотезы о нормальности закона распределения суммы  $i$  независимых равномерно распределенных случайных величин  $H_0: \sum_{i=1}^n f_i \sim N$  при малых  $i$  проведено моделирование на ЭВМ для  $1 \leq i \leq 15$  и применены различные критерии [11, 15] (результаты приведены в табл. 2).

По результатам моделирования отвергнуто около 20 % гипотез при числе слагаемых  $i < 5$  (в табл. 2 приведены результаты для  $i = 4$ ). При числе слагаемых  $i = 5$  число принятых гипотез превышает 90, и при увеличении  $i$  изменяется незначительно. Получилось, что с вероятностью, близкой к 0,95, для описания вида распределения суммы пяти и более независимых равномерно распределенных величин можно использовать нормальный закон распределения.

Все это позволяет считать, что для инженерных приложений распределение суммарных резервов времени приближается к нормальному закону, если цепочка работ содержит пять и более этапов.

### 3. ОЦЕНКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЗЕРВОВ ВРЕМЕНИ НА ОСТАВШИХСЯ ЭТАПАХ РАБОТ

Будем считать, что работа некоторого проекта содержит пять и более этапов, для которых резервы времени исполнения имеют одинаковые равномерные распределения. Тогда в начале реализации проекта имеется общий резерв времени, распределенный на интервале  $[0, R]$  примерно по нормальному закону.

В силу центральной предельной теоремы, при большом числе этапов такая нормализация общего резерва  $R$  имеет также место и при других распределениях вероятностей. При большом общем числе этапов общая картина вероятностного распределения резервов по мере приближения к последнему этапу приобретает вид, близкий к нормальному.

По мере исполнения проекта часть резервов расходуется, уменьшая в той или иной мере ранее имевшийся общий резерв. Поскольку распределение исходного общего резерва имело вид нормального закона, то частичное использование резерва при выполнении каждого этапа работ фактически ведет к формированию усеченного нормального распределения для оставшихся резервов времени (рис. 2, заштрихованная область). Отметим, что

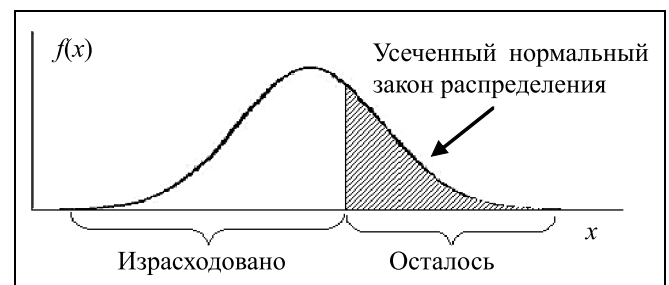


Рис. 2. К определению свойств неизрасходованных резервов

совсем необязательно на каждом этапе планировавшиеся резервы времени расходуются максимально, часть их экономится, и это увеличивает резерв времени от текущего момента до завершения работ. Однако общая вероятностная картина по-прежнему формируется исходным нормальным распределением суммарных резервов и израсходованными резервами времени.

Математическое выражение для образовавшегося таким образом одностороннего усеченного нормального распределения определяется [15] как

$$\varphi(x, m_x, \sigma_x, x_1) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < x_1, \\ \frac{A}{\sigma_x} f(t) & \text{при } x_1 \leq x, \end{cases}$$

где

$$A = \frac{1}{1 - F(t_1)};$$

$$t = \frac{x - m_x}{\sigma_x}, \quad t_1 = \frac{x_1 - m_x}{\sigma_x}, \quad F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt.$$

#### 4. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЗЕРВОВ ВРЕМЕНИ НА ЗАВЕРШАЮЩЕМ ЭТАПЕ РАБОТ

Размер использованных резервов времени при исполнении этапов работ в начале цепочки и их остаток на последнем этапе имеют разные последствия для результата всего проекта, и наиболее критичен завершающий этап.

Если известна плотность вероятности  $f_{\text{конеч}}(x)$  для резерва, отводимого исполнителю последнего этапа, то можно построить семейство кривых распределения для набора возможных резервов времени, сэкономленных на предшествующих этапах. Для этого достаточно свернуть  $f_{\text{конеч}}(x)$  и соответствующие кривые усеченного распределения

$\varphi(x)$  для различного набора значений сэкономленного времени. И хотя аналитические выражения для требуемых функций не слишком удобны для интегрирования, соответствующие операции осуществимы на компьютере с помощью численных методов.

Численное моделирование показало, что распределение резерва времени на последнем этапе зависит от ранее сэкономленных резервов и дисциплины исполнителя на последнем этапе. Это распределение имеет вид, близкий к нормальному, либо сужается к концу этапа (рис. 3), стягиваясь к виду, предопределенному распределением  $f_{\text{конеч}}(x)$ .

Исполнение всего проекта в срок зависит от успешного завершения последнего этапа, и его вероятность может быть рассчитана на основании кривых (см. рис. 3). Если есть распределения (или хотя бы два первых момента) у составляющих событий, то путем суммирования рассчитываются математическое ожидание и дисперсия для результирующего нормального распределения на всех этапах, вплоть до завершающего. По этим двум параметрам строится вся кривая результирующего нормального распределения, и по ней считается вероятность попадания на любой участок, а также кривая  $\varphi(x)$  для любого набора предполагаемой (или фактической) экономии резервов времени.

Это дает руководителю работ инструментарий для количественной оценки рисков выполнения (или невыполнения) работ в зависимости от статистических характеристик резервов времени для работы в целом и на завершающем этапе работ.

#### 5. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ В ЦЕПОЧКЕ РАБОТ

Верификация полученных результатов проведена посредством моделирования и практических проверок на примере управления прохождением письменных обращений для контроля и сопровождения работ по информатизации в регионах Российской Федерации. Объем выборки для моделирования (десятки и сотни отсчетов) обусловлен числом регионов и учреждений, участвующих в проводимых работах.

Результаты моделирования суммарных сроков прохождения писем в регионах представлены на рис. 4, где каждый график отображает сроки прохождения письма по указанным этапам в отдельном регионе.

Для моделирования была разработана специальная программа на языке VBA в среде MS Excel. Сравнение теоретических распределений времени по этапам прохождения писем и данных по реаль-

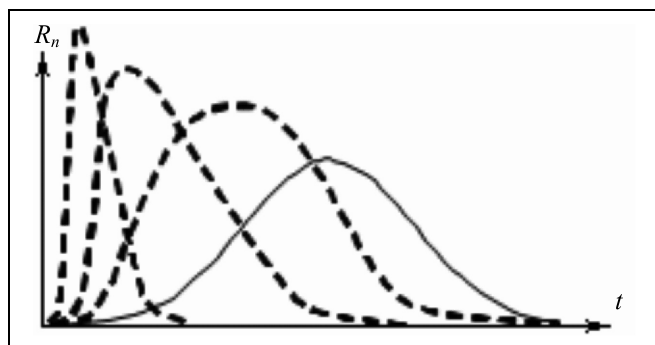


Рис. 3. Вид семейства кривых для оценки резервов времени на завершающем этапе работ



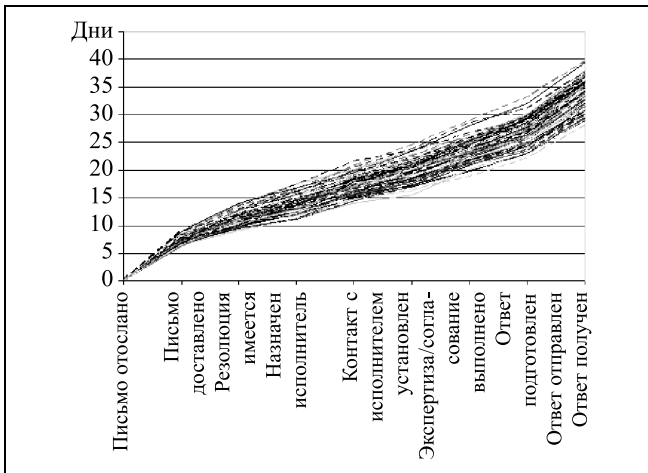


Рис. 4. Суммарные сроки прохождения писем в регионах

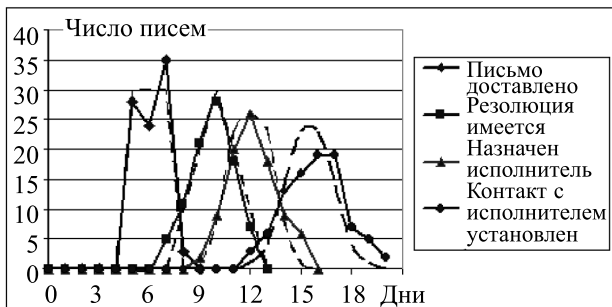


Рис. 5. Теоретические и эмпирические распределения времени по этапам прохождения писем

ным выборкам (рис. 5) показало их достаточно хорошее совпадение.

На рис. 5 сплошными линиями показаны графики, построенные по данным реального контроля прохождения писем в регионы; штрихами обозначены теоретические кривые распределения, рассчитанные в соответствии с результатами Приложения и с учетом оценок средних значений задержек времени на каждом из этапов.

Подобные результаты получены при моделировании процесса накопления знаний в условиях коллективного взаимодействия обучающихся при выполнении цепочки однотипных заданий. Предложенная методика оценивания резервов времени применена при построении обучающей программы «Лабиринт знаний».

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулируем основные выводы.

- Объективная оценка вероятностных свойств используемых характеристик объектов и про-

цессов является одной из важных проблем в системах планирования и управления.

- Проведенный анализ позволил установить возможность применения центральной предельной теоремы для расчетов распределения резервов времени при пяти и более этапов в цепочке работ. Проверка гипотезы о соответствии рассматриваемых композиционных законов распределения нормальному закону распределения проведена с привлечением критериев согласия.
- Распределение резервов времени на оставшихся этапах работ имеет вид усеченного нормального закона распределения.
- Распределение резервов времени на последнем этапе зависит от ранее сэкономленных резервов и дисциплины исполнителя на последнем этапе. Вид этого распределения может быть близким к нормальному либо стягивается к виду, предопределенному распределением резервов времени на последнем этапе работ.
- Верификация полученных результатов проведена посредством моделирования и исследования реального процесса прохождения писем в регионы.

### ПРИЛОЖЕНИЕ

#### Изменение плотности распределения вероятностей для суммы независимых случайных величин

- Пусть исходные величины равномерно распределены на интервале  $[0, 1]$ :

$$f_1(t) = f(x) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq x \leq 1, \\ 0 & \text{вне этого интервала.} \end{cases}$$

Первые два момента этого распределения  $m_x = 0,5$ ;

$$\sigma_x^2 = 1/12.$$

- Композиция двух равномерно распределенных случайных величин определяется как

$$f_2(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_1(\tau) f_1(t - \tau) d\tau.$$

При  $t \leq 0$

$$f_2(t) = 0.$$

При  $0 \leq t \leq 1$

$$\begin{aligned} f_2(t) &= \int_{-\infty}^0 f_1(\tau) f_1(t - \tau) d\tau + \int_0^t f_1(\tau) f_1(t - \tau) d\tau + \\ &+ \int_t^{+\infty} f_1(\tau) f_1(t - \tau) d\tau = \int_0^t d\tau = t. \end{aligned}$$

При  $1 \leq t \leq 2$

$$f_2(t) = \int_{-\infty}^{t-1} f_1(\tau) f_1(t-\tau) d\tau + \int_{t-1}^1 f_1(\tau) f_1(t-\tau) d\tau + \int_1^{+\infty} f_1(\tau) f_1(t-\tau) d\tau = \int_{t-1}^1 d\tau = 2-t.$$

При  $t \geq 2$

$$f_2(t) = 0.$$

$$\text{Таким образом, } f_2(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \leq 0 \text{ и } t \geq 2, \\ t & \text{при } 0 \leq t \leq 1, \\ 2-t & \text{при } 1 \leq t \leq 2. \end{cases}$$

Математическое ожидание и дисперсия результирующего распределения:  $f_2(t)$   $m = 1$  и  $\sigma^2 = 1/6$ .

- Аналогичным образом для суммы трех равномерно распределенных случайных величин получим результирующее распределение  $f_3(t)$ :

$$f_3(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_2(\tau) f_1(t-\tau) d\tau = \begin{cases} 0 & \text{при } t \leq 0 \text{ и } t \geq 3, \\ t^2/2 & \text{при } 0 \leq t \leq 1, \\ 1-(t-1)^2/2-(2-t)^2/2 & \text{при } 1 \leq t \leq 2, \\ (t-3)^2/2 & \text{при } 2 \leq t \leq 3. \end{cases}$$

Математическое ожидание и дисперсия результирующего распределения:  $f_3(t)$   $m = 1,5$  и  $\sigma^2 = 1/4$ .

- Приведем подробные преобразования для композиции четырех равномерно распределенных случайных величин:

$$f_4(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_3(\tau) f_1(t-\tau) d\tau.$$

При  $t \leq 0$

$$f_4(t) = 0.$$

При  $0 \leq t \leq 1$

$$f_4(t) = \int_{-\infty}^0 f_3(\tau) f_1(t-\tau) d\tau + \int_0^t f_3(\tau) f_1(t-\tau) d\tau + \int_t^{+\infty} f_3(\tau) f_1(t-\tau) d\tau = \int_0^t \frac{\tau^2}{2} d\tau = \frac{t^3}{6}.$$

При  $1 \leq t \leq 2$

$$f_4(t) = \int_{-\infty}^{t-1} f_3(\tau) f_1(t-\tau) d\tau + \int_{t-1}^1 f_3(\tau) f_1(t-\tau) d\tau + \int_1^t f_3(\tau) f_1(t-\tau) d\tau + \int_t^{+\infty} f_3(\tau) f_1(t-\tau) d\tau = \int_{t-1}^1 \frac{\tau^2}{2} d\tau + \int_1^t \left(1 - \frac{(\tau-1)^2}{2} - \frac{(\tau-2)^2}{2}\right) d\tau = t - 1 - \frac{(t-1)^3}{3} - \frac{(t-2)^3}{6}.$$

При  $2 \leq t \leq 3$

$$f_4(t) = \int_{-\infty}^{t-1} f_3(\tau) f_1(t-\tau) d\tau + \int_{t-1}^2 f_3(\tau) f_1(t-\tau) d\tau + \int_2^t f_3(\tau) f_1(t-\tau) d\tau + \int_t^{+\infty} f_3(\tau) f_1(t-\tau) d\tau = \int_{t-1}^2 \left(1 - \frac{(\tau-1)^2}{2} - \frac{(\tau-2)^2}{2}\right) d\tau + \int_2^t \frac{(\tau-3)^2}{2} d\tau = 3 - t + \frac{(t-2)^3}{6} + \frac{(t-3)^3}{3}.$$

При  $3 \leq t \leq 4$

$$f_4(t) = \int_{-\infty}^{t-1} f_3(\tau) f_1(t-\tau) d\tau + \int_{t-1}^3 f_3(\tau) f_1(t-\tau) d\tau + \int_3^{+\infty} f_3(\tau) f_1(t-\tau) d\tau = \int_{t-1}^3 \frac{(\tau-3)^2}{2} d\tau = -\frac{(t-4)^3}{6}.$$

При  $t \geq 4$

$$f_4(t) = 0.$$

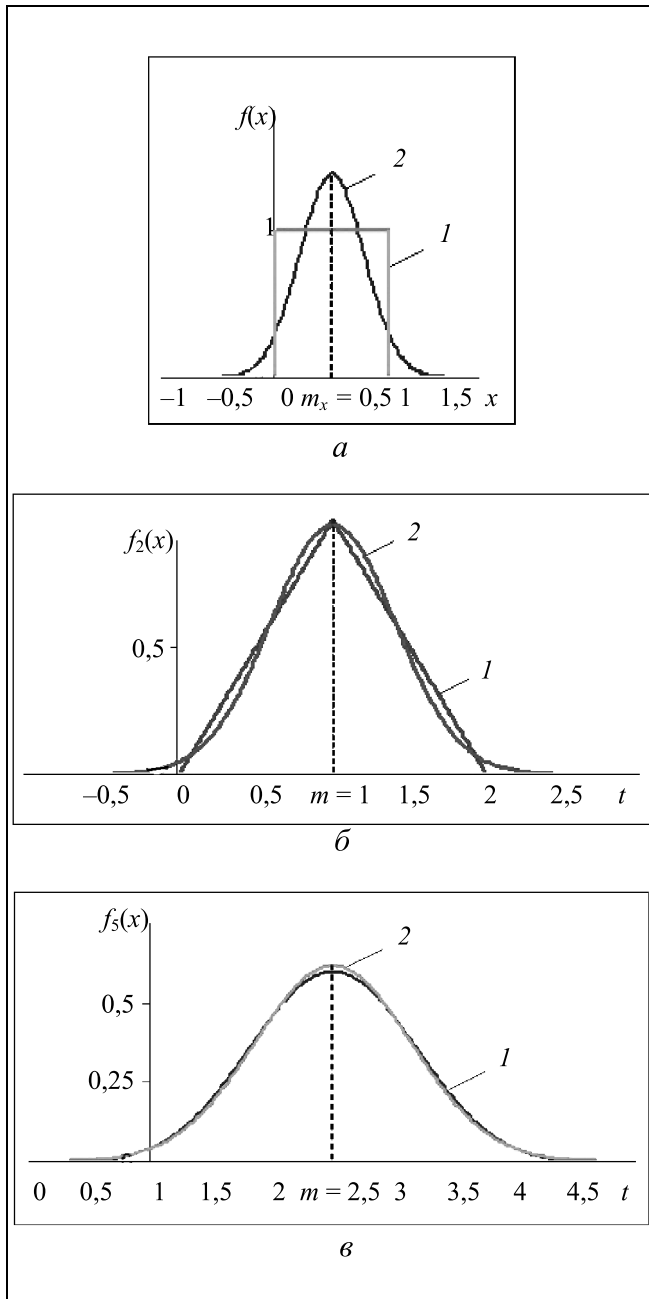
Таким образом,

$$f_4(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \leq 0 \text{ и } t \geq 4, \\ \frac{t^3}{6} & \text{при } 0 \leq t \leq 1, \\ t-1-(t-1)^3/3-(t-2)^3/6 & \text{при } 1 \leq t \leq 2, \\ 3-t+(t-2)^3/6+(t-3)^3/3 & \text{при } 2 \leq t \leq 3, \\ -(t-4)^3/6 & \text{при } 3 \leq t \leq 4. \end{cases}$$

Математическое ожидание и дисперсия результирующего распределения  $f_4(t)$ :  $m = 2,0$  и  $\sigma^2 = 1/3$ .

- Аналогичным образом для суммы пяти равномерно распределенных случайных величин после некоторых преобразований получим результирующее распределение  $f_5(t)$ :

$$f_5(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_4(\tau) f_1(t-\tau) d\tau = \begin{cases} 0 & \text{при } t \leq 0 \text{ и } t \geq 5, \\ t^4/24 & \text{при } 0 \leq t \leq 1, \\ t^2/2 - t + 7/12 - (t-1)^4/8 - (t-2)^4/24 & \text{при } 1 \leq t \leq 2, \\ 4t - 31/6 - t^2/2 - (t-1)^2/2 + (t-2)^4/8 + (t-3)^4/8 & \text{при } 2 \leq t \leq 3, \\ 91/12 - 3t + (t-1)^2/2 - (t-3)^4/24 - (t-4)^4/8 & \text{при } 3 \leq t \leq 4, \\ (t-5)^4/24 & \text{при } 4 \leq t \leq 5. \end{cases}$$



**Рис. П.1.1.** Графики для результирующего и нормального распределений с соответствующими параметрами: *а* — исходное равномерное распределение; *б* — распределение для суммы двух величин, *в* — для суммы пяти величин; *1* — композиционное распределение, *2* — нормальное распределение

Математическое ожидание и дисперсия результирующего распределения  $f_5(t)$ :  $m = 2,5$  и  $\sigma^2 = 5/12$ .

В качестве примера на рис. П.1 приведены результирующее распределение (график *1*) и нормальное распределение (график *2*) с соответствующими параметрами математического ожидания  $m_x$  и дисперсии  $\sigma_x^2$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Vassilyev S.N., Novikov D.A., Bakhtadze N.N. Intelligent control of industrial processes // Proc. of the 7th IFAC Conference on Manufacturing Modeling, Management, and Control. IFAC Publication. — Saint Petersburg, 2013. — P. 49–57.
2. Whitty S.J., Schulz M.F. The PM BOK code // 20th IPMA World Congress on Project Management. — 2006. — Vol. 1. — P. 466–472.
3. Epstein D., Maltzman R. Project Workflow Management: A Business Process Approach. — Fort Lauderdale: J. Ross Publishing, 2013. — 352 p.
4. Трояновский В.М. Информационно-управляющие системы и прикладная теория случайных процессов: учеб. пособие. — М.: Гелиос АРВ, 2004. — 304 с.
5. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. — М.: Высшая школа, 2002. — 380 с.
6. Пугачев В.С. Теория случайных функций. — М.: Физматгиз, 1962. — 520 с.
7. Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов. — М.: Мир, 1976. — 756 с.
8. Hageman L., Young D.M. Applied Iterative Methods. — N.-Y.: Dover Publications, 2004. — 416 p.
9. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами. — М.: Мир, 1973. — 957 с.
10. Румянцева Е.Л., Трояновский В.М. Вероятностная оценка резервов времени при контроле прохождения работ // Известия ТулГУ. Сер. «Вычислительная техника. Информационные технологии. Системы управления». — 2004. — Т. 1, вып. 2. — С. 176–184.
11. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных. — М.: Мир, 1980. — Т. 1. — 610 с.
12. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы планирования эксперимента. — М.: Мир, 1981. — Т. 2. — 516 с.
13. Закс Л. Статистическое оценивание. — М.: Статистика, 1976. — 598 с.
14. Лабораторный практикум по математической статистике / Э.А. Вуколов и др. — М.: МИЭТ, 1986. — 91 с.
15. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. — М.: Наука, 1974. — 832 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Н.Н. Бахтадзе.

**Трояновский Владимир Михайлович** — д-р техн. наук, профессор, ✉ troy40@mail.ru,

**Запевалина Алена Андреевна** — аспирант, ✉ nairy253@mail.ru,

**Румянцева Елена Львовна** — канд. техн. наук, доцент, ✉ lenarum@mail.ru,

**Сердюк Ольга Александровна** — начальник отдела, ✉ serdyukolga@yandex.ru,

Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», г. Зеленоград.

# БЛОКИРОВАНИЕ ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСНАБЖЕНИЯ ЦЕЛЕВЫХ ОБЪЕКТОВ В СЕТЕВЫХ ИНФРАСТРУКТУРАХ

Г.Г. Гребенюк, С.М. Никишов

Рассмотрена задача безопасности группы целевых объектов, получающих энергию или ресурсы из сетевой инфраструктуры, при негативном воздействии на компоненты сетей, нарушающем связи целевых объектов с источниками энергии или ресурсов. Описаны известные подходы к решению задач устойчивости сетей. Проанализированы особенности задачи поиска повреждаемых компонентов сети, приводящих к потере функциональности группы целевых объектов, и предложены методы ее решения и подходы к оптимизации вычислений. На конкретном примере проиллюстрирован алгоритм поиска повреждений.

**Ключевые слова:** уязвимость, сетевая инфраструктура, надежность, энергоснабжение.

## ВВЕДЕНИЕ

Обычный подход к топологическому анализу устойчивости сетей к деструктивным воздействиям на ее узлы заключается в определении степени нарушения связности сети после удаления узлов, избранных для таких воздействий.

Наиболее распространенными деструктивными воздействиями могут быть природные явления (грозы, ураганы и др.) и преднамеренные атаки. Такие атаки тщательно планируются, выполняют подготовленными лицами и наиболее опасны.

Данные задачи представляют интерес при проектировании инженерной инфраструктуры, при выработке мер противодействия негативным воздействиям на компоненты сетей. Поэтому указанной тематике посвящены многочисленные исследования, например, [1–5].

Основные стратегии выбора повреждаемых узлов сети основаны на анализе достижимости оставшихся работоспособных узлов из источников энергии, при этом выбирается такая стратегия, чтобы минимальное множество повреждаемых узлов обеспечивало изоляцию от сети максимального множества оставшихся узлов. Искомые повреждаемые компоненты выбираются либо методом перебора, либо на основе предположений о важности компонентов, их влиянии на структуру сети.

При решении данной задачи широко применяются методы топологического анализа систем, представленных в виде графа. Как правило, эти методы относительно просты для понимания, но требуют значительного объема вычислений для систем большой размерности.

Различают следующие основные виды (стратегии) атак на узлы системы:

- на основе результатов перебора вариантов повреждений;
- по степени узла (числу присоединенных к нему соседних узлов);
- по максимальному трафику;
- по минимальному трафику;
- по промежуточной центральности (числу путей, связывающих потребителей и генераторы и проходящих через данный узел).

Наиболее простой подход к выявлению минимального множества повреждаемых компонентов, вызывающих максимальные негативные последствия, основан на переборе вариантов повреждений с моделированием на графе отключений потребителей. Непосредственное решение этой задачи затруднено большим числом вариантов, подлежащих исследованию. Оно определяется размерностью исследуемой системы и кратностью одновременно повреждаемых компонентов сети — числом сочетаний из  $n$  (число элементов в системе) по  $k$  (кратность повреждений). Для вычисления последствий повреждений в энергосистемах, содержащих десятки тысяч компонентов, требуется обработка данных на суперкомпьютерах. Отметим, что данный подход обеспечивает высокую достоверность в определении повреждаемых компонентов.

Для уменьшения объема вычислений узлам сети назначаются веса (важности) в соответствии с влиянием узла на размер негативных последствий при его повреждении. В традиционной стратегии атаки одним из используемых критериев важности служит нагрузка узла. Эта стратегия основана на



том, что выход из строя узлов с большой нагрузкой приводит к перераспределению этой нагрузки по другим узлам и может вызвать перегрузку многих взаимодействующих узлов. Этот тип стратегии атаки широко применяется для анализа уязвимости энергосетей и выбора решений по их защите. Тем не менее, указанная стратегия имеет серьезное ограничение. Например, если соседние узлы слабонагруженные, то они могут безболезненно принять дополнительную нагрузку, демпфируя возмущение. Отметим, что в топологических моделях нагрузку узла связывают не с ее физической величиной, а с такими топологическими характеристиками графа, как степень узла, промежуточная центральность и др.

Атака по степени (по нагрузке) основана на удалении узлов, начиная с узлов с самой высокой степенью, в порядке уменьшения степени.

Для расчета трафика в энергосистеме используются модели физических процессов, которые строятся на основе законов Ома и Кирхгофа. Основные проблемы применения метода заключаются в большом числе параметров, которые должны быть введены в модель и которые, как правило, неизвестны исследователю проблем уязвимости, а также в низкой скорости расчета системы алгебраических и дифференциальных уравнений высокого порядка и невозможности учета случайного характера решений, принимаемых диспетчером при изменении потребления или возникновении аварийных ситуаций в системе.

Из сказанного можно сделать вывод, что при известной топологии сети точно выбрать вариант атаки с максимальными негативными последствиями можно путем перебора возможных вариантов повреждаемых компонентов. Однако, как уже отмечено, этот метод обладает большой вычислительной сложностью. В других методах топологического анализа используются достаточно «грубые» предположения о нагрузках и важности узлов.

Проведенный анализ показывает, что цель рассмотренных стратегий состоит в изоляции от сети максимального множества ее узлов, а не присоединенных к ним потребителей. Однако инфраструктурные сети лишь выполняют функции обес-

печения по отношению к системе потребления. Поэтому возникает вопрос, наносится ли при рассмотренных стратегиях максимальный ущерб объектам потребления? Иногда — да, чаще нет, так как наибольший ущерб достигается не в случае изоляции произвольных узлов, а при отключении от сетей тех узлов, которые обеспечивают энергией и ресурсами важные объекты промышленности, транспорта, пунктов управления, гражданской инфраструктуры и другие, так называемые целевые объекты (далее ЦО). Причем в качестве целевых могут выступать пространственные объекты в виде определенных территорий с входящими и исходящими из них транспортными и энергетическими потоками.

В статье рассматривается задача потери функциональности группы ЦО и выбора стратегии атаки на группу на основе анализа гетерогенной сетевой инфраструктуры, предлагаются подходы к решению с помощью известных методов структурного анализа, обсуждаются возможные решения по снижению сложности вычислений при поиске повреждаемых компонентов.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Выбор целевых объектов определяется при анализе их важности для решения определенных задач (рис. 1).

При выборе воздействия должен учитываться весь комплекс обеспечивающих инженерных и транспортно-логистических сетей, повреждение которых приводит к частичному или полному нарушению функциональности целевых объектов.

Рассмотрим граф, множество вершин которого  $V$  описывается тройкой вершин  $\langle S, P, U \rangle$ , где  $S$  — источники энергии и ресурса,  $P$  — объекты потребления энергии и  $U$  — вершины сети, в которых осуществляется преобразование энергии или ресурса (трансформаторные, насосные и другие подстанции), распределение энергии (распределительные устройства, отпайки), передача энергии (электрические линии, трубопроводы и др.):

$$V = S \cup P \cup U.$$

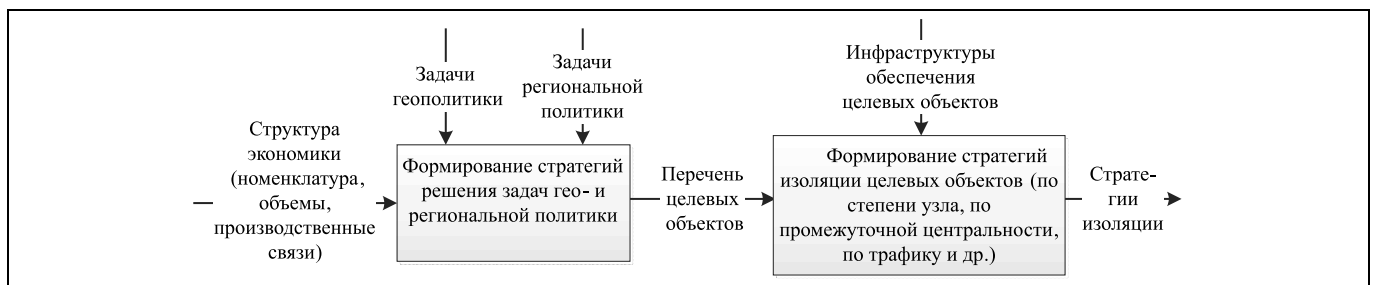


Рис. 1. Выбор целевых объектов и стратегий атак на них



Обозначим через  $P_z$  — заданное подмножество вершин (группа целевых объектов),  $P_z \subseteq P$ .

При этом пути передачи энергии от ее источников к целевым объектам следует рассматривать как конфликтные множества или гиперребра.

**Постановка задачи.** Для резервированного графа  $V$  инфраструктуры обеспечения целевых объектов энергией и ресурсами необходимо определить минимальное множество вершин  $u \subseteq U$  и  $s \subseteq S$  — повреждаемых компонентов инфраструктуры, при исключении которых из графа  $V$  нарушается достижимость вершин  $P_z$  из вершин  $S$ .

Достижимость вершины множества  $P_z$  из вершин  $S$  здесь понимается как существование пути между ними, т. е. наличие соответствующего конфликтного множества.

## 2. МЕТОДЫ АНАЛИЗА СЕТЕВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЦЕЛЕВЫХ ОБЪЕКТОВ

Указанное понимание уязвимости целевых объектов и стратегии деструктивных воздействий требует выполнения следующих видов анализа инфраструктуры:

- качественный анализ инфраструктуры ЦО в целом, взаимодействий между сетями;
- топологический анализ уязвимости ЦО и сетей, входящих в инфраструктуру ЦО;
- топографический анализ уязвимости сетевой инфраструктуры.

При качественном анализе инфраструктуры ЦО, взаимодействий между сетями определяются основные сети, влияющие на функциональность ЦО и узлы сопряжения гетерогенных сетей.

На графе (рис. 2) изображена сетевая инфраструктура двух целевых объектов  $P$  и  $G$ , содержащая две разнородные сети — сеть целевого объекта  $P$  (изображена сплошными линиями) и сеть целевого объекта  $G$  (изображена пунктирными линиями),  $I$  — источник энергии или ресурса, например, электроэнергии,  $A, B, C, D, E, F$  — узлы, связыва-

ющие между собой источник  $I$  и ЦО  $P$  (в случае энергосистемы — подстанции).  $J$  — источник энергии или ресурса, например, водозабор на водохранилище,  $M, N, H$  — узлы, связывающие между собой источник  $J$  и ЦО  $G$  (в случае водоснабжения — фильтрующие установки  $M, N$  и насосная подстанция  $H$ ).

Работоспособность узла  $H$  второй сети зависит от энергии, поступающей из первой сети с источником  $I$ .

Узел  $H$ , получающий энергию из первой сети, назовем узлом сопряжения.

В топологическом анализе уязвимости ЦО и сетей, входящих в инфраструктуру группы ЦО, можно воспользоваться методами, применяемыми для расчета надежности сложных структур и их диагностирования [6, 7]. При их кратком изложении будем употреблять терминологию работы [7].

Это методы нахождения безызбыточных путей и минимальных сечений, компоненты которых представляют собой потенциальные объекты деструктивных воздействий. Необходимо при применении этих методов учесть взаимодействие сетей разной природы, когда, например, на функционирование сети водоснабжения влияет состояние работоспособности насосной станции, работающей от системы энергоснабжения.

Задача вычисления минимальных сечений из минимальных конфликтных множеств тесно связана с задачей о покрытии множествами. Минимальное сечение определяется как минимальное покрывающее множество набора конфликтных множеств.

Задача решается в три этапа.

**Этап 1.** Построение минимального гиперграфа инфраструктуры обеспечения (см. рис. 2).

Гиперграф системы  $L = \{l_1, \dots, l_m\}$  представляет собой множество путей между ЦО  $P$  и  $G$  и источниками  $I$  и  $J$ , а также путей между узлом  $H$  и источником  $I$ .

Элемент  $l_i \in L$  называется гиперребром  $L$ . Гиперребро  $l_i \in L$  называется минимальным в  $L$ , если не имеется другого гиперребра  $l_j \in L$ ,  $i \neq j$  такого, что  $l_j \subseteq l_i$ . Гиперграф является минимальным, если каждое гиперребро  $l_i \in L$  минимально. Минимальные гиперребра образуют минимальные конфликтные множества гиперграфа [7]. Далее под  $L = \{l_1, \dots, l_m\}$  понимается минимальный гиперграф,  $m$  — число его минимальных гиперребер.

Минимальные конфликтные множества (гиперребра) представлены в виде булевой матрицы (табл. 1).

**Этап 2.** Нахождение минимальных сечений, при исключении которых из графа (см. рис. 2) нарушается достижимость вершин  $P$  и  $H$  из вершин  $I$  и  $J$ .

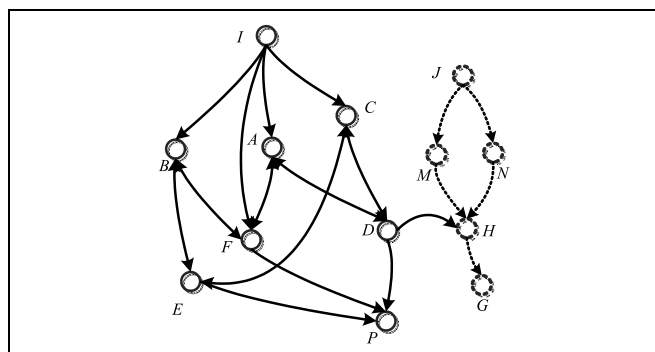


Рис. 2. Граф инфраструктуры двух целевых объектов  $P$  и  $G$



Функция покрытия  $\rho$  в общем случае для матрицы с  $k$  столбцами задается конъюнкцией вида  $D_1, \dots, D_k$ , где  $D_j$  — дизъюнкция всех переменных, приписанных строкам с единицей в  $j$ -м столбце. Конъюнктивная нормальная форма (КНФ) функции покрытия для ЦО «Р» (см. рис 2) имеет вид:

$$\rho(l_1, l_2, \dots, l_5) = (I \vee A \vee D \vee P) \wedge (I \vee F \vee P) \wedge (I \vee C \vee D \vee P) \wedge (I \vee B \vee E \vee P) \wedge (I \vee C \vee E \vee P).$$

КНФ функции покрытия для узла сопряжения  $H$

$$\rho(l_6, l_7) = (I \vee C \vee D \vee H) \wedge (I \vee A \vee D \vee H);$$

КНФ функции покрытия для ЦО  $G$  имеет вид:

$$\rho(l_8, l_9) = (M \vee J \vee H \vee G) \wedge (N \vee J \vee H \vee G).$$

Перемножив скобки в КНФ (удобнее перемножать вначале скобки с наибольшим числом общих компонентов, для  $\rho(l_1, l_2, \dots, l_5)$  умножаются третья на пятую скобки) и выполнив поглощения, получим минимальные сечения — дизъюнктивные нормальные формы (ДНФ):

$$\rho(l_1, l_2, \dots, l_5) = \{\langle I, \langle P, \langle F, D, E, \langle F, D, B, C, \langle F, A, C, E, \langle F, A, B, C \rangle \rangle \rangle \rangle\};$$

$$\rho(l_6, l_7) = \{\langle I, \langle H, \langle D, \langle C, A \rangle \rangle \rangle\};$$

$$\rho(l_8, l_9) = \{\langle G, \langle H, \langle J, \langle M, N \rangle \rangle \rangle\}.$$

**Этап 3.** Агрегирование минимальных сечений взаимодействующих сетей.

**Определение.** Средой целевого объекта назовем все минимальные сечения, которые могут быть причинами его отключения от источников энергии и ресурса. ♦

Среда целевого объекта  $P$  представляет собой минимальные сечения сети, показанной на рис. 2 сплошными линиями:

$$\{\langle I, \langle P, \langle F, D, E, \langle F, D, B, C, \langle F, A, C, E, \langle F, A, B, C \rangle \rangle \rangle \rangle\}. \quad (1)$$

Таблица 1

Булева матрица минимальных гиперребер графа (см. рис. 2)

|     | $l_1$ | $l_2$ | $l_3$ | $l_4$ | $l_5$ | $l_6$ | $l_7$ | $l_8$ | $l_9$ |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $I$ | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     |       |       |
| $P$ | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     |       |       |       |       |
| $A$ | 1     |       |       |       |       |       | 1     |       |       |
| $B$ |       |       |       | 1     |       |       |       |       |       |
| $C$ |       |       | 1     |       | 1     | 1     |       |       |       |
| $D$ | 1     |       | 1     |       |       | 1     | 1     |       |       |
| $E$ |       |       |       | 1     | 1     |       |       |       |       |
| $F$ |       | 1     |       |       |       |       |       |       |       |
| $M$ |       |       |       |       |       |       |       | 1     |       |
| $N$ |       |       |       |       |       |       |       |       | 1     |
| $J$ |       |       |       |       |       |       |       | 1     | 1     |
| $H$ |       |       |       |       |       | 1     | 1     | 1     | 1     |
| $G$ |       |       |       |       |       |       |       | 1     | 1     |

Среда целевого объекта « $G$ » представляет собой объединение минимальных сечений узла сопряжения  $H$   $\{\langle I \vee \langle H \vee D \vee \langle C, A \rangle \rangle$  и ЦО  $G$   $\{\langle G, \langle H, \langle J, \langle M, N \rangle \rangle\}$ :

$$\{\langle I, \langle H, \langle D, \langle CA, \langle G, \langle J, \langle M, N \rangle \rangle \rangle \rangle \rangle\}. \quad (2)$$

Минимальные сечения для нескольких ЦО получаются при вычислении конъюнкции дизъюнкций сред целевых вершин. Так, для двух ЦО  $G$  и  $P$  минимальные сечения получаются при вычислении конъюнкции дизъюнкций сред (1) и (2):

$$\{\langle I, \langle P, H, \langle P, D, \langle F, D, E, \langle F, D, B, C, \langle P, C, A, \langle F, A, C, E, \langle F, A, B, C, \langle P, G, \langle F, D, E, G, \langle P, J, \langle P, M, N \rangle \rangle \rangle \rangle \rangle \rangle \rangle \rangle\}. \quad (3)$$

Для нахождения минимальных сечений, кроме рассмотренного подхода, который часто называют алгоритмом Петрика, можно воспользоваться методом совпадающих множеств для множества минимальных гиперребер, основанным на построении  $HS$ -дерева [7].

В обоих случаях нахождение минимальных сечений требует большого объема вычислений для построения всех путей между источниками и ЦО, устранения избыточных путей. К этому добавляется необходимость нахождения дизъюнктивной формы функции покрытия для матрицы с большим числом столбцов (минимальных гиперребер) или большого числа обращений к множеству минимальных гиперребер, требуемое для поиска и отсека ветвей, не входящих в минимальное  $HS$ -дерево.

Пример поиска минимальных сечений для графа (см. рис. 2) показывает, что перемножение скобок в КНФ, другими словами, минимальных гиперребер, удобнее выполнять вначале со скобками, содержащими наибольшее число одинаковых компонентов. Это позволяет упростить решения, учитывая закон поглощения в процессе умножения. Поэтому приоритет при умножении получают минимальные гиперребра, связывающие один ЦО и один источник. Скобки, включающие в себя такие гиперребра, содержат, по меньшей мере, два общих компонента — ЦО и источник.

При таком подходе гиперграф  $L = \{l_1, \dots, l_m\}$  рассматривается как совокупность частичных гиперграфов  $L = \{l_1, \dots, l_n\}$ ,  $n$  — число частичных гиперграфов в  $L$ , каждый из которых задается своим набором гиперребер. Столбцы (гиперребра) матрицы функции покрытия при таком представлении распределяются в соответствии с их принадлежностью к частичным гиперграфам.

Тогда КНФ функции покрытия  $\rho(l_1, l_2, \dots, l_m)$  гиперграфа  $L = \{l_1, \dots, l_m\}$  можно представить как произведение частичных функций покрытия

$$\rho(l_1, l_2, \dots, l_m) = \prod_{i=1}^n \rho(l_{k_i}, l_{r_i}), \text{ где } l_{k_i}, l_{r_i} \text{ — столбцы}$$

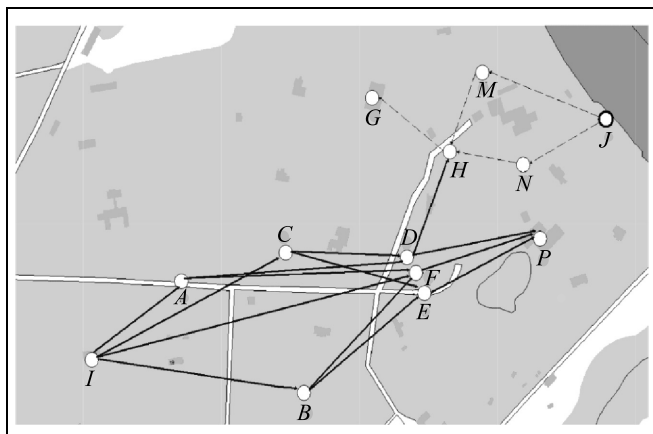


Рис. 3. Картографическое представление инфраструктуры целевых объектов  $P$  и  $G$

(гиперребра) матрицы функции покрытия, соответствующие частичному гиперграфу  $L_i$ .

В дальнейшем КНФ каждой частичной функции  $\rho(l_{k_i}, \dots, l_{r_i})$  приводится к ДНФ, которая определяет минимальные сечения для этого частичного гиперграфа. После перемножения минимальных сечений для частичных гиперграфов получим ДНФ функции покрытия исходного гиперграфа  $L = \{l_1, \dots, l_m\}$  и затем искомые минимальные сечения для группы ЦО.

Описанный процесс вычислений не только облегчает поиск минимальных сечений, но и обеспечивает возможность параллельной обработки данных при большой размерности задачи.

Топографический анализ уязвимости сетевой инфраструктуры необходим для оценки времени восстановления повреждений, на которое влияет географическая доступность повреждаемого компонента для ремонта, рисков нанесения воздействий, зависящих и от местности расположения компонента, определения меры близости между компонентами сетей, используемой при выборе возможного места атаки на близко расположенные сети.

Например, близость компонентов  $F$ ,  $D$  и  $E$  на карте местности (рис. 3), повреждение которых в соответствии с выражением (3) приводит к потере функциональности ЦО  $P$  и  $G$ , вполне определяет возможное место негативного воздействия.

### 3. ПРИМЕР АНАЛИЗА УЯЗВИМОСТИ ГРУППЫ ЦЕЛЕВЫХ ОБЪЕКТОВ

Проиллюстрируем рассмотренный подход к анализу уязвимости на фрагменте реальной энергосистемы и сети водоснабжения, схема которого в виде графа представлена на рис. 4.

На этой схеме вершины 6—43 относятся к сети электроснабжения и представляют собой подстанции (вершина 14 является подстанцией для насосной станции водоснабжения), а вершины 2, 5, 44—56 — потребители (14 — насосная станция водоснабжения, 32 — фабрика, 34 завод). Вершины 60—63 представляют собой объекты сети водоснабжения. Целевыми объектами служат вершины 14, 32 и 34.

Все подстанции понижающие. Соответственно с этим выбрана ориентация дуг графа. Однако часть дуг, в силу наличия контуров и возникающей при этом неопределенности направления их потоков, разнонаправленные.

Упростим изложение, приняв в качестве источников не вершины 1 и 3, а соответственно 6 и 30, непосредственно связанные с ними. Повреждение вершин 6 и 30 приводит к тем же последствиям, что и повреждение вершин 1 и 3. Аналогично, повреждение вершин 13, 23 и 27 вызывает прекращение энергоснабжения целевых объектов 14, 32 и 34, поэтому в дальнейшем изложении можно принять вершины 13, 23 и 27 в качестве целевых объектов.

С учетом упрощений необходимо определить множество повреждаемых компонентов, каждый из которых содержит минимальное множество вершин, при исключении которых из графа (см. рис. 4) нарушается достижимость целевых объектов 13, 23 и 27 из источников 6 и 30.

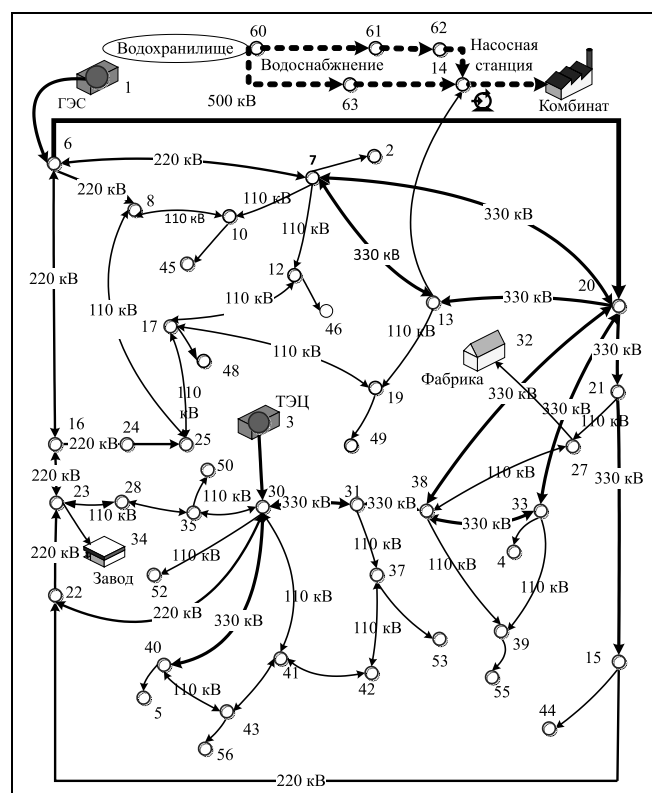


Рис. 4. Граф фрагмента реальной энергосистемы



С помощью программы выполним построение минимального гиперграфа энергосистемы  $L_{6,30-13,23,27}$ , осуществив поиск всех путей между вершинами 6, 30 и 13, 23, 27 и устранив поглощаемые пути. Как правило, устранение поглощений значительно снижает множество путей между вершинами — источниками и ЦО.

Минимальный гиперграф для поставленной задачи имеет вид

$$L_{6,30-13,23,27} = \{\{6, 20, 13\}, \{6, 7, 13\}, \{6, 20, 21, 15, 22, 23\}, \{6, 20, 38, 31, 30, 22, 23\}, \{6, 16, 23\}, \{6, 20, 21, 27\}, \{6, 20, 38, 27\}, \{6, 16, 23, 28, 35, 30, 31, 38, 27\}, \{30, 31, 38, 20, 13\}, \{30, 22, 23, 16, 6, 20, 13\}, \{30, 22, 23, 16, 6, 7, 13\}, \{30, 31, 38, 20, 7, 6, 16, 23\}, \{30, 22, 23\}, \{30, 31, 38, 27\}, \{30, 22, 23, 16, 6, 20, 21, 27\}, \{30, 22, 23, 16, 6, 20, 38, 27\}\}.$$

Далее методом покрытия множеств вычисляется минимальные сечения этого гиперграфа, т. е. ДНФ функция покрытия; ДНФ гиперграфа после исключения поглощений имеет вид:

$$\rho(I) = 6, 30 \vee 6, 23, 31 \vee 6, 23, 38 \vee 6, 23, 20, 27 \vee 6, 23, 20, 31 \vee 6, 23, 20, 38 \vee 6, 31, 22 \vee 6, 38, 22 \vee 6, 20, 22, 27 \vee 6, 22, 13, 27 \vee 13, 27, 23 \vee 13, 27, 21, 16, 30 \vee 13, 27, 15, 16, 30 \vee 13, 27, 22, 16 \vee 13, 20, 23, 30 \vee 13, 20, 23, 31 \vee 13, 20, 23, 38 \vee 13, 20, 23, 27 \vee 13, 21, 38, 23 \vee 13, 21, 38, 16, 30 \vee 13, 21, 38, 16, 22 \vee 20, 7, 16, 30 \vee 20, 7, 16, 23, 38 \vee 20, 7, 16, 23, 27 \vee 20, 7, 16, 23, 31 \vee 20, 7, 16, 31, 22 \vee 20, 7, 16, 38, 22 \vee 20, 7, 16, 22, 27.$$

Результаты расчета ДНФ — повреждаемых компонентов, которые обеспечивают блокирование энергоснабжения трех потребителей от двух источников, приведены в табл. 2.

Здесь не рассмотрено взаимодействие энергосистемы и сети водоснабжения, поскольку структура сети водоснабжения (см. рис. 4) аналогична представленной на рис. 2 и последовательность расчета на этапе 3 совпадает с изложенной в § 2.

Таблица 2

Комбинации возможных повреждений сети для группы из трех целевых объектов

| Двух-кратные | Трех-кратные                                     | Четырех-кратные                                                                                                          | Пятикратные                                                                                                                                      |
|--------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 6, 30        | 6, 23, 31<br>6, 23, 38<br>6, 31, 22<br>6, 38, 22 | 6, 23, 20, 27<br>6, 23, 20, 31<br>6, 23, 20, 38<br>6, 20, 22, 27                                                         | 13, 27, 21, 16, 30<br>13, 27, 15, 16, 30<br>13, 21, 38, 16, 30<br>13, 21, 38, 16, 22                                                             |
|              | 13, 27, 23                                       | 6, 22, 13, 27<br>13, 27, 22, 16<br>13, 20, 23, 30<br>13, 20, 23, 31<br>13, 20, 23, 38<br>13, 21, 38, 23<br>20, 7, 16, 30 | 20, 7, 16, 23, 38<br>20, 7, 16, 23, 27<br>20, 7, 16, 23, 31<br>20, 7, 16, 31, 22<br>20, 7, 16, 38, 22<br>20, 7, 16, 22, 27<br>13, 21, 38, 16, 22 |

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены методы структурного анализа уязвимости сетей, их отличие от методов анализа уязвимости группы целевых объектов. Показано, что в последнем случае могут применяться методы расчета надежности и диагностирования сложных систем. Эти методы позволяют получить точное решение задачи потери функциональности группы целевых объектов с учетом взаимодействующих гетерогенных сетей в виде комбинаций повреждений, блокирующих энерго- и ресурсоснабжение этой группы.

На примерах сетевой инфраструктуры рассмотрены этапы решения задачи потери функциональности, включая анализ взаимодействующих сетей, показаны возможности ее декомпозиции на структуры, допускающие параллельные процессы обработки и снижение сложности вычислений.

Рассмотренные методы анализа уязвимости могут быть применены для решения задач повышения безопасности целевых объектов в реальных сетевых структурах, имеющих большую вероятность реализации угроз.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Eusgeld I., Kruger W., Sansavini G., et al. The role of network theory and object-oriented modeling within a framework for the vulnerability analysis of critical infrastructures // Reliability Engineering and System Safety. — 2009. — Vol. 94. — P. 954–963. — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832008002639> (дата обращения: 10.03.2016).
2. Rosas-Casals M. Topological Complexity of the Electricity Transmission Network. Implications in the Sustainability Paradigm / PhD Thesis Universitat Politècnica de Catalunya. — Autumn, 2009. — URL: <http://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/5824/TMRC1de1.pdf> (дата обращения: 10.02.2016).
3. Wang W. Defending against multifaceted attacks in wireless networks and power grid networks / University of Rhode Island, 2011 URL: [http://dfsc.uri.edu/docs/Wenkai\\_Dissertation.pdf](http://dfsc.uri.edu/docs/Wenkai_Dissertation.pdf) (дата обращения: 10.12.2015).
4. Rosas-Casals M., Valverde S., Solà R.V. Topological vulnerability of the European power grid under errors and attacks. — URL: [http://upcommons.upc.edu/e-prints/bitstream/2117/6179/6/vulnerabilitat\\_xarxa\\_DEF\\_revisat.pdf](http://upcommons.upc.edu/e-prints/bitstream/2117/6179/6/vulnerabilitat_xarxa_DEF_revisat.pdf) (дата обращения: 10.01.2016).
5. Кондратьев А. Современные тенденции в исследовании критической инфраструктуры в зарубежных странах // Западное военное обозрение. — 2012. — № 1. — С. 19–30.
6. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. — СПб.: Изд-во СПб. гос. ун-та, 2007. — 276 с.
7. Haenni R. Generating Diagnoses from Conflict Sets. — URL: [www.aai.org/Papers/FLAIRS/1998/FLAIRS98-081.pdf](http://www.aai.org/Papers/FLAIRS/1998/FLAIRS98-081.pdf) (дата обращения: 18.05.2016).

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.В. Кульбой.

Гребенюк Георгий Григорьевич — д-р техн. наук, зав. лабораторией, ✉ grebenuk@lab49.ru,

Никишов Сергей Максимович — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, ✉ nikishov@lab49.ru,

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва.



# ПРОБЛЕМЫ ПРОГРАММИРУЕМОСТИ, БЕЗОПАСНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ И СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

## 4. 2. Подход к общему решению

Ю.С. Затуливетер, Е.А. Фищенко

Изложены принципы формирования в глобальной компьютерной среде математически однородного, бесшовно программируемого и кибербезопасного алгоритмического пространства распределенных вычислений и сетецентрического управления на базе компьютерного исчисления древовидных структур. Приведены свойства языка бесшовного программирования в этом пространстве, а также принципы организации программными методами надежных распределенных вычислений в вычислительных средах с ненадежными компонентами. Сформулированы требования к сетевым компьютерам с немикропроцессорной архитектурой, которые необходимы для эффективной и кибербезопасной реализации данного алгоритмического пространства в глобальной компьютерной среде.

**Ключевые слова:** глобальная компьютерная среда, глобальная информационная сильносвязность, распределенные вычисления, сетецентрическое управление, исчисление древовидных структур, немикропроцессорная архитектура, математически однородное алгоритмическое пространство, бесшовное программирование, кибербезопасность, надежные вычисления в среде с ненадежными компонентами.

### ВВЕДЕНИЕ

Количество компьютерных устройств разных классов (от «умных» сенсоров и смартфонов, до суперкомпьютеров), связанных глобальными сетями, исчисляется многими миллиардами и быстро растет. Совокупные вычислительные, функциональные и информационные ресурсы глобальной компьютерной среды (ГКС) обладают колоссальным системообразующим потенциалом. Для полномасштабного его раскрытия требуется массовое применение больших и сверхбольших систем распределенных вычислений, нацеленных на решение практически неограниченного разнообразия задач сетецентрического управления (СЦУ).

В первой части [1] настоящей работы показано, что с увеличением размеров и масштабов применения таких систем в условиях крайней разнородности аппаратных и программных платформ в ГКС возникают фундаментальные барьеры комбинаторной сложности задач функциональной интеграции вычислительных и информационных

ресурсов. Существующие технологии построения распределенных вычислительных систем требуют лобового преодоления комбинаторной сложности задач интеграции. При этом с увеличением размеров, помимо неограниченного роста средств и времени, требуется добавление на системных уровнях очередных разнородных, все более сложных и менее надежных слоев промежуточного программного обеспечения (ПО).

В настоящее время доля вычислительных ресурсов, вовлекаемых в сильносвязные системы алгоритмической переработки глобально распределенной информации, относительно совокупных ресурсов ГКС скорее уменьшается, чем растет. Это говорит, прежде всего, о том, что общесистемная сложность ГКС, препятствующая созданию таких систем, достигла критических уровней, а также об отсутствии адекватного инструментария преодоления этой сложности.

В долгосрочной перспективе качественное развитие ГКС на основе существующих технологий интеграции, толерантных к разнородности, становится практически невозможным — ни в части





функциональной интеграции, ни в части обеспечения ее кибербезопасности и надежности.

В условиях растущих масштабов острых социальных проявлений кризиса перепроизводства в ГКС слабо формализованной информации [1] необходимы новые научно обоснованные подходы к общему решению проблем функциональной интеграции при создании больших систем распределенной переработки глобально распределенной информации в сколь угодно больших сетях.

В данной работе, в отличие от существующих технологических подходов к функциональной интеграции сетевых ресурсов при изначальной «легализации» их разнородности, рассматривается общий системный подход, цель которого состоит в устранении причин разнородности и бесшовном распространении свойства универсальной программируемости, присущего отдельному компьютеру, на сколь угодно большие множества компьютеров, связанных сетями.

Суть рассматриваемого подхода состоит в:

- выявлении и устранении первопричин непрерывного воспроизводства разнородных форм представления компьютерной информации (программ и данных) и способов работы с ней;
- разработке принципов и методов формирования единого, бесшовно программируемого и кибербезопасного алгоритмического пространства распределенных вычислений в сколь угодно больших сетях;
- разработке и обосновании требований к аппаратной поддержке этого пространства.

## 1. ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИ ОДНОРОДНОГО АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Чрезмерное разнообразие разнородных, трудно совместимых аппаратных платформ и форм представления данных и программ с позиций алгоритмической универсальности представляется заведомо избыточным. Оно приводит к многовариантности задач системно-функциональной интеграции сетевых ресурсов и к непреодолимой комбинаторной сложности создания и интеграции сколь угодно больших систем распределенной обработки данных в ГКС [1].

Устранение причин воспроизводства разнородности ГКС и проблем комбинаторной сложности интеграции разнородных ресурсов становится возможным посредством формирования в ней математически однородного алгоритмического пространства распределенных вычислений.

### 1.1. Ограничения классической компьютерной модели

Установлено [2–4], что первопричины разнородности информационных и вычислительных ре-

сурсов компьютерных сред обусловлены свойствами так называемой модели Дж. фон Неймана [5], которая рассматривается как классическая индустриально значимая аксиоматика универсальных машинных вычислений [4]. Микропроцессорные компьютерные архитектуры стали ее массовым воплощением, базовым элементом компьютерной революции и глобализации сетевого пространства. По сути, из-за отсутствия индустриально значимых альтернатив, она до сих пор остается единой логической основой массового производства компьютеров и программ.

Сложившиеся к настоящему времени в ГКС условия и массовые проявления глобальной связности показывают принципиальные недостатки классической модели, из-за которых сбалансированное развитие ГКС становится невозможным. В этом состоит новизна и актуальность проблем и общего подхода к их решению, рассматриваемых в данной работе.

Классическая компьютерная аксиоматика изначально представляет собой *однозадачную* модель, в которой свойство универсальной программируемости замкнуто во внутренних ресурсах компьютера — в оперативном запоминающем устройстве (ОЗУ), арифметико-логическом устройстве (АЛУ), устройстве управления (УУ) и устройстве ввода-вывода (В/В) [5]. Управление вычислениями в рамках этой модели осуществляется устройством управления (УУ) посредством указания *физических* адресов к ячейкам оперативной памяти (ОЗУ), охваченных одномерным, линейно организованным адресным пространством.

В силу изначальной однозадачности в этой модели в принципе отсутствует встроенная универсальная логика защиты памяти от вмешательства одной программы со стороны другой. Отсюда аппаратно незащищенное адресное пространство ОЗУ во многих поколениях компьютеров, реализованных по этой модели.

Многозадачность и другие системные функции управления вычислительными ресурсами, включая защиту памяти от несанкционированного доступа и управление вводом/выводом для всего разнообразия внешней периферии, привносятся программно — на уровне операционных систем (ОС), загружаемых в ОЗУ и функционирующих совместно с многими пользовательскими программами.

В микропроцессорных архитектурах, как известно, используются аппаратные средства поддержки системных функций управления доступом к памяти, которые частично решают и задачи защиты памяти. Но при этом в крайне сложных программных недрах и запутанных лабиринтах ОС остаются множества лазеек для несанкционированного проникновения сторонних программ в области физического адресного пространства опе-

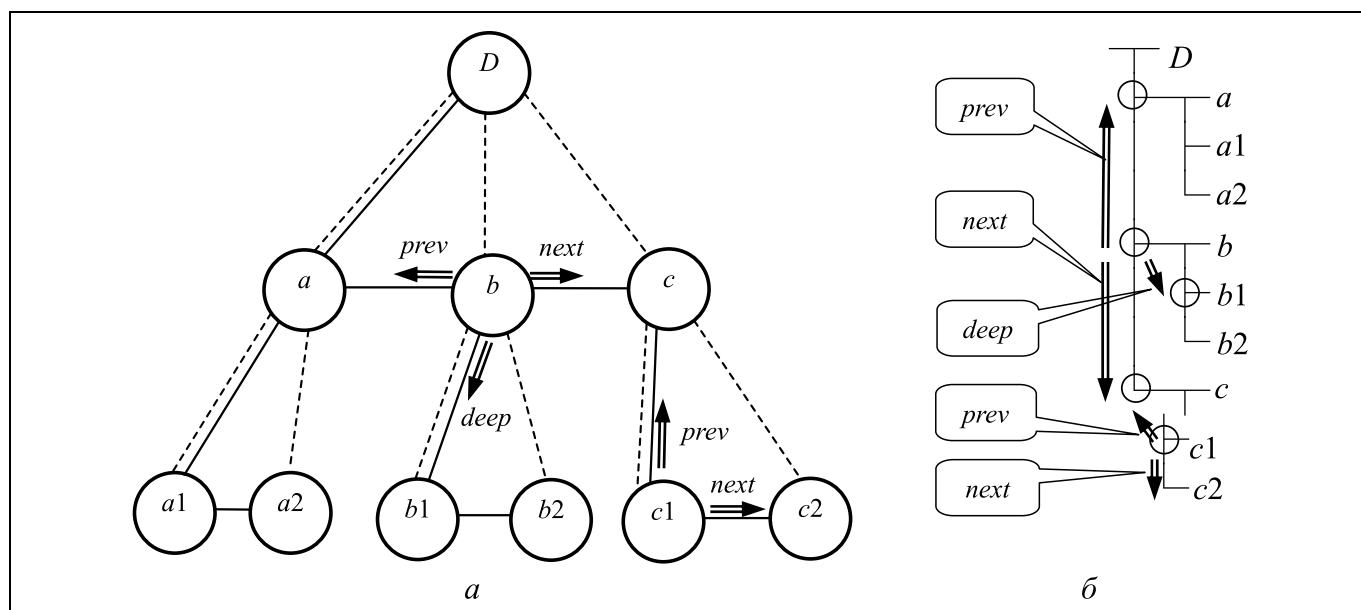


Рис. 1. Древоидная структура (а) и компьютерная форма ее представления (б)

ративной памяти, что представляет собой трудно контролируемую угрозу безопасности современных компьютеров и систем.

Работа сетей также опирается на многослойные, крайне разнородные системные программы, обеспечивающие реализацию большого числа сетевых протоколов обмена данными.

*В чрезмерной сложности разнородных, локализованных и сетевых системных программ кроются причины уязвимости современных компьютерных систем и сетей.*

В рамках рассматриваемого общего подхода были выявлены первопричины непрерывного воспроизводства разнородных форм представления компьютерной информации (данных и программ). Они скрыты в постулатах универсального машинного счета классической модели Дж. фон Неймана в виде двух избыточных степеней свободы управления вычислениями, открытых для изначально нерегламентированного использования программистами [2—4]. Эта модель позволяет, во-первых, произвольным образом выстраивать структуры данных и, во-вторых, по собственному усмотрению алгоритмически кодировать их в потоках адресов к физическому адресному пространству ОЗУ.

В указанных степенях свободы скрываются причины неконтролируемого воспроизводства разнородных форм представления данных, программ, процессов и систем. Массовое применение компьютеров с микропроцессорными архитектурами, которые имеют еще и разнородные, трудносовместимые между собой аппаратные платформы (что также допускается классической аксиоматикой),

привело к закреплению разнородности в масштабах ГКС, что стало одним из главных барьеров фундаментального характера на путях к преодолению ее общесистемного кризиса и дальнейшему сбалансированному развитию [1].

## 1.2. Компьютерное исчисление древоидных структур

В работах [2—4] посредством математического обобщения классической компьютерной модели проведена ее минимальная коррекция, которая на основе компьютерного исчисления древоидных структур предоставляет математически замкнутую форму регламентации и системы команд, и структур данных, и программ. На уровне обновленной таким образом аксиоматики устраняются избыточные степени свободы, а вместе с ними и первопричины разнородности аппаратных и программных платформ и, как следствие, комбинаторного сопротивления функциональной интеграции ресурсов ГКС.

Математическая регламентация форм представления и способов обработки структурированной информации позволила не только устранить избыточные степени свободы в управлении вычислениями, но и сохранить достоинства классической модели — универсальность и простоту логических правил процедурного управления счетом.

В модели компьютерного исчисления древоидных структур [2—4, 6] универсальный объект исчисления — деревья, которые представляют собой простейшую связную структуру из возможных (число ребер на единицу меньше числа вершин). На рис. 1, а показаны деревья общего вида (связи



между вершинами показаны пунктирными линиями), а на рис. 1, б — компьютерная форма их представления в виде двоичного дерева (в котором у каждой вершины не более двух соседних снизу вершин).

Двоичные деревья являются универсальным и математически однородным структурным объектом представления программ и данных. Двоичное дерево получается из общего путем устранения всех прямых связей с родительскими вершинами, кроме крайней слева и внесения новых связей между вершинами своего уровня (на рис. 1, а связи двоичного дерева показаны сплошной линией).

Содержимое вершин может быть битом, байтом, числом, символом, строкой произвольного размера (двоичной или символьной) или массивом.

### 1.3. О свойствах процедурного языка ПАРСЕК

На основе нового компьютерного базиса в виде математической модели компьютерного исчисления древовидных структур [3] разработаны процедурный язык ПАРСЕК (ParSeq<sup>®</sup>) и система программирования на его основе [6].

В языке ПАРСЕК постулируется единое, математически однородное представление и программ, и данных (числового и нечислового — структурного — характера) в виде двоичных деревьев в геометрической форме (рис. 1, б).

Древовидные структуры в языке ПАРСЕК изначально не привязаны к какой-либо одной или нескольким предметным областям. Их смысловая интерпретация всецело определяется программистами при решении задач из различных предметных областей.

Посредством древовидных структур в двоичной форме представляются те или иные информационные объекты и структуры, смысловая интерпретация и способы обработки которых определяются программистом в соответствии с решаемой задачей.

Обработка древовидного объекта ведется посредством выделения и обхода вершин двоичных деревьев. Для выделения вершин вводятся *курсорные переменные*, которые принимают значение указателей на вершины, расположенные в памяти. На деревьях можно определять произвольные множества курсорных переменных. Процесс обработки начинается с открытия курсоров и продолжается дальнейшим перемещением их по дереву посредством команд исполняемой программы.

С курсорными переменными связан базисный набор функций для работы с деревьями. Имеется три вида связей для каждой вершины (на рис. 1, б показаны утолщенными стрелками):

- *deep* — связь с подчиненной по уровню вершиной;
- *next* — связь со следующей вершиной своего уровня;

- *prev* — связь с предыдущей соседней вершиной своего или старшего уровня.

Компьютерный базис на основе предложенного исчисления — это математически замкнутый и функционально полный на множестве двоичных деревьев набор простейших операций формирования и преобразования двоичных деревьев [2—4, 6]. На этой основе осуществляется минимальная коррекция классической модели фон Неймана путем ее математического обобщения.

Главным объектом математического обобщения классической модели стала оперативная память. Место физического устройства одномерной памяти с произвольным доступом к линейно организованному адресному пространству в обобщенной модели занимает «умная» память хранения множеств произвольных двоичных деревьев с автоматическим их размещением в линейном адресном пространстве ОЗУ. В этой памяти доступ к вершинам деревьев осуществляется посредством курсорных переменных, несущих указатели на вершины, расположенные в памяти.

Управление вычислениями в языке ПАРСЕК осуществляется командами исполняемой программы посредством перемещения курсорных указателей между соседними вершинами и применением к выбранным вершинам вычислительных операций обработки содержимого вершин или функций преобразования (редактирования) деревьев. Таким способом программы на языке ПАРСЕК могут осуществлять произвольные формирования и преобразования древовидных структур.

Особенность языка и системы программирования ПАРСЕК в том, что он в едином математически замкнутом формализме соединяет процедурный (алгоритмический) стиль программирования с возможностями решения задач обработки информации высокой структурно-динамической сложности.

Первым языком высокого уровня стал Fortran (Джон Бэкус, 1954—1957 гг.). Он предназначен для программирования, главным образом, в классе «числовых» задач и реализует процедурный (алгоритмический) стиль программирования (команда за командой), заложенный в модели фон Неймана на машинном уровне. Компиляция программ в машинные коды предполагает статическое распределение памяти, позволяющее сводить к минимуму затраты на перераспределение памяти в ходе исполнения программ.

Вслед за первым процедурным языком высокого уровня был предложен Lisp<sup>1</sup> (Джон Маккарти,

<sup>1</sup> Первоначальную — теоретически целостную версию — называют Pure Lisp (Чистый Лисп).

1958—1963 гг.) — первый функциональный язык программирования [7], основанный на математической теории  $\lambda$ -исчисления Черча. Язык Lisp предназначен для решения задач искусственного интеллекта, особенность которых — ориентация на работу в классах задач обработки «структур» (с информацией высокой структурно-динамической сложности).

По сути, это была первая, практически значимая компьютерная модель, составившая теоретическую альтернативу модели фон Неймана. Процедурному (алгоритмическому) стилю она противопоставила функциональный (непроцедурный) стиль, который требует иных, существенно более сложных механизмов аппаратной реализации. Это стало одной из главных причин того, что модель фон Неймана выиграла соревнование за индустриальное производство массовых компьютеров. Другая причина непопадания в индустрию массового производства компьютеров и программ — относительно малый (на то время) спрос на задачи искусственного интеллекта, а также весьма непростой в использовании формализм, требующий особого склада ума и математической подготовки, что является заведомо избыточным требованием для большинства индустриальных программистов.

Тем не менее, в практическом плане Lisp на многие годы занял свою нишу, предоставляя мощный компьютерный инструментарий для решения логически и структурно сложных задач искусственного интеллекта. В этих задачах доминируют сложные структуры и их преобразование, которые требуют больших затрат времени на динамическое перераспределение памяти, сопровождающееся необходимостью многократного повторения весьма длительных системных процедур сборки мусора [8].

Несмотря на эволюционное сближение возможностей многочисленных поколений языков этих противостоящих классов, разрыв между ними остается непреодоленным. Новая модель процедурных вычислений в базе исчисления древовидных структур, построенная как математическое обобщение модели фон Неймана, и язык ПАРСЕК на ее основе, позволяют устранить этот разрыв, соединяя достоинства и во многом снимая ограничения принципиально различающихся подходов.

Принципиальная особенность языка ПАРСЕК в том, что в нем осуществлено *математически замкнутое соединение* процедурного стиля

программирования с новым компьютерным базисом в виде исчисления древовидных структур. Обновленная классическая модель процедурных вычислений позволила связать в едином формализме достоинства двух ранее противостоящих моделей, до сих пор деливших языки программирования высокого уровня по классам задач обработки «чисел» и «структур».

#### 1.4. Бесшовное программирование компьютеров, связанных сетями

Важнейшим и принципиально новым качеством предлагаемой модели вычислений стала возможность бесшовного распространения свойства универсальной программируемости, замкнутого в классической модели на внутрикомпьютерные ресурсы, на ресурсы сколь угодно большого числа компьютеров, связанных сетями [3, 4, 9].

На рис. 2 представлена виртуальная ПАРСЕК-машина [9], которая иллюстрирует принципы распространения модели исчисления древовидных структур на распределенные вычислительные ресурсы сколь угодно больших сетей.

В рамках такого расширения сформировано единое (сквозное) адресное пространство оперативной памяти компьютеров, связываемых сетями. Оно состоит из двухкомпонентных адресов для идентификации вершин двоичных деревьев  $\langle \text{IP:Port}, \text{Address} \rangle$ . Первый компонент IP:Port — уникальный сетевой IP-адрес компьютеров, второй — Address — указатель на их расположение в оперативной памяти [9].

При этом данные и программы в виде древовидных структур могут целиком или своими компонентами распределяться по различным ком-

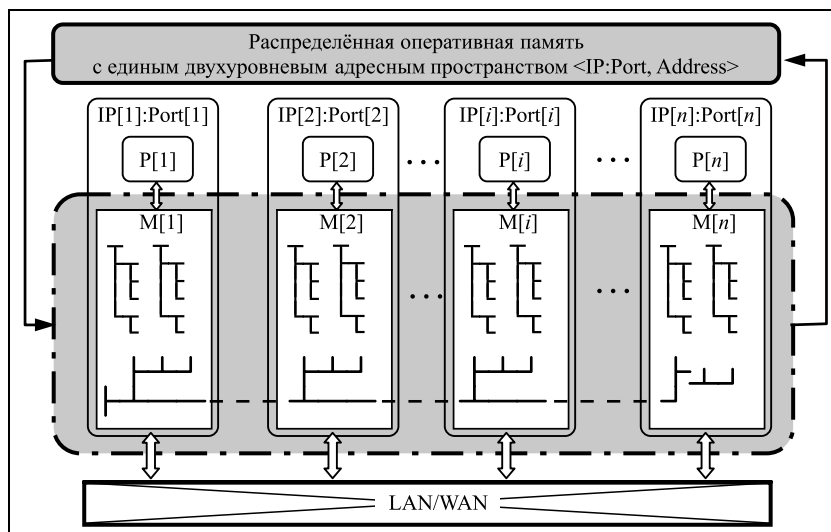


Рис. 2. Виртуальная ПАРСЕК-машина для распределенных вычислений





пьютерам. На рис. 2 показано, как программы и данные в виде древовидных структур могут располагаться в оперативной памяти  $M[i]$  многих компьютеров с сетевыми адресами  $IP[i]:Port[i]$ , охваченной единым адресным пространством. Обработка в каждом  $i$ -м компьютере осуществляется своими процессорами  $P[i]$  (параллельно).

Деревья могут располагаться как целиком в локальной памяти компьютеров (на рис. 2 изображены вертикально), так и путем размещения своих связанных компонентов в памяти различных компьютеров (горизонтальное изображение). Важно отметить, что при этом логика работы с деревьями в процессе составления и исполнения программ остается инвариантной относительно способов размещения деревьев в распределенной памяти вовлекаемых компьютеров.

Экспериментальная реализация виртуальной ПАРСЕК-машины для распределенных вычислений осуществлена [9] как функционально полная реализация системы программирования ПАРСЕК с привнесением стандартных команд управления многими процессами и использованием библиотечных функций управления протоколом TCP/IP.

В язык ПАРСЕК добавлены встроенные функции [9, 10], с помощью которых задается распределенная обработка компонентов деревьев посредством одновременного исполнения на разных компьютерах многих асинхронно взаимодействующих процессов. Основными компонентами распределенных вычислений в данной реализации являются как перемещаемые exe-модули, так и подпрограммы с параметрами, которые получили собственную системную реализацию механизма отдаленного запуска процедур RPC (Remote Procedure Calls).

Классические принципы реализации RPC [11] легли в основу технологий распределенных вычислений в сетях. Они предполагают взаимодействие процессов, протекающих в памяти отдаленных компьютеров в отсутствие единого адресного пространства. Такое решение предлагалось в виде технологии «переходного» моста, который посредством устанавливаемого на связанных компьютерах специального промежуточного ПО может перекидываться между компьютерами с разными адресными пространствами.

Главное отличие такой технологии от типового локального вызова процедур, реализуемого во всех процедурных языках программирования, состоит в том, что передача параметров между отдаленно взаимодействующими процессами при запуске процедур не допускает передачу данных по адресным ссылкам и требует обязательного копирования пересылаемых значений.

В известных реализациях механизмов RPC отсутствуют возможности работы с глобальными переменными и передачи адресных указателей в качестве параметров процедур. Неустраненные логические различия в вызове локальных и отдаленных процедур создают технологические проблемы допущения «прозрачности» программирования распределенных вычислений.

В отсутствие единого адресного пространства, охватывающего оперативную память компьютеров в сетях, и единой универсальной модели распределенных вычислений механизмы RPC вынужденно реализовывались на уровне частных способов стыковки разнородных адресных пространств посредством сложных промежуточных программных слоев, которые повышают степень разнородности ГКС.

Такие ограничения приводят к тому, что отдаленно вызываемые процедуры обладают меньшими функциональными возможностями, чем локальные.

Последующее развитие технологии отдаленного взаимодействия программных процессов шло в направлениях поддержки индустриально значимых языков объектно-ориентированного программирования. Это такие технологии, как CORBA [12], DCOM [13], а также средства создания на их основе межплатформенных технологий интеграции сложных распределенных программных комплексов, например, такие как SOA [14].

Реализация механизма RPC в системе ПАРСЕК отличается от известных типовых подходов. Во-первых, тем, что он реализован в едином адресном пространстве, охватывающем оперативную память связанных сетями компьютеров, вовлекаемых в распределенные вычисления. При этом передача параметров при вызове как локальных, так и отдаленных процедур происходит по одинаковым правилам, что делает работу в сети полностью прозрачной. Во-вторых, эта реализация встроена в систему ПАРСЕК как внутренний механизм и не предназначается, в отличие от существующих решений, к самостоятельному использованию в условиях легализованной в ГКС разнородности аппаратных и программных платформ. В системе ПАРСЕК это позволило существенно упростить программную реализацию RPC и открыло возможности распространения свойства бесшовной программируемости в нотациях языка исчисления древовидных структур на сколь угодно большие сети.

Встраиваемые в ПАРСЕК механизмы распространения свойства универсальной программируемости на сетевые ресурсы логически и технологически прозрачны для программистов и не



требуют сложного системно-сетевого конфигурирования и сопровождения.

Язык и система ПАРСЕК рассматриваются как прототип бесшовного программирования в математически однородном алгоритмическом пространстве распределенных вычислений и СЦУ.

В этом пространстве отпадает необходимость в сторонних технологиях функциональной интеграции изначально разнородных сетевых ресурсов. Предполагается, что внутренние механизмы управления бесшовно программируемыми распределенными вычислениями, включая собственное воплощение RPC, задействованные в системе ПАРСЕК, будут реализованы аппаратно в сетевых однокристальных компьютерах с немикропроцессорной архитектурой (см. далее), система команд которых строится на основе обновленной классической модели в базисе исчисления древовидных структур.

Система программирования ПАРСЕК с функциями распределенных вычислений в едином алгоритмическом пространстве исчисления древовидных структур испытана на задаче поиска оптимальных конфигураций коммутирующих сетей на основе комбинаторных методов построения квазиполных графов [15]. Алгоритм решения этой задачи допускает разбиение на многие слабо связанные фрагменты, каждый из которых требует большого объема вычислений. Это позволяет исполнять их одновременно на многих компьютерах, связанных через сети.

Применительно к данной задаче с помощью системы ПАРСЕК разработана стендовая система распределенных вычислений в математически однородном алгоритмическом пространстве [16], в которой в распределенные вычисления вовлекались десятки компьютеров как из локальных сетей нескольких организаций, так и домашних. Принципиальных ограничений на число вовлекаемых компьютеров нет. Взаимодействие компьютеров через Интернет (в том числе обмена данными) осуществляется в логике сетевой вычислительной архитектуры «Peer-to-Peer». При этом возможен запуск с любого числа компьютеров и одновременное исполнение многих задач с разными значениями параметров их размерностей и конфигураций разбиения на фрагменты.

Для присоединения компьютеров к распределенной системе вычислений требуется регистрация на сайте системы их IP-адресов и последующая установка небольшой программы, обеспечивающей взаимодействие компьютеров в ходе распределенных вычислений.

Эксперименты показали, что на задаче, разбиваемой на большое число фрагментов со значительными объемами вычислений, требующими за-

ведомо большего времени, чем время обменов по сети промежуточными данными, обеспечивается сокращение общего времени счета, пропорциональное числу вовлеченных компьютеров.

Ключевой результат: новый компьютерный базис исчисления древовидных структур позволяет бесшовно распространить свойство универсальной программируемости с внутрикомпьютерных ресурсов на любые совокупности связанных сетями компьютеров, что становится основой для формирования в сколь угодно больших сетях универсального, математически однородного и бесшовно программируемого алгоритмического пространства распределенных вычислений и СЦУ.

Наследуя универсальность и простоту процедурного стиля программирования классической компьютерной аксиоматики, новая модель распределенных вычислений позволяет интегрировать в новое алгоритмическое пространство функциональные возможности и наработки имеющихся в ГКС компьютерных и программных платформ, обеспечивая тем самым эволюционный переход в новое алгоритмическое пространство, охватывающее совокупные ресурсы ГКС.

В математически однородном алгоритмическом пространстве открываются качественно новые возможности для решения непрерывного спектра задач СЦУ высокой структурной сложности с привлечением совокупного системообразующего потенциала ГКС.

Это необходимо для *массовой интеллектуализации* всего разнообразия процессов управления устойчивым развитием социосистем в условиях глобальной связности [1]. Это актуально для построения разных видов систем СЦУ военного назначения [17], а также решения важнейших для разнообразных видов бизнеса классов задач массовой переработки глобально распределенной информации, рассмотренных в работе [1] — Internet of Things [18], Internet of Everything [19] и др.

---

## 2. АРХИТЕКТУРНО-АППАРАТНАЯ ПОДДЕРЖКА БЕСШОВНО ПРОГРАММИРУЕМОГО И КИБЕРБЕЗОПАСНОГО АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

---

Бесшовно программируемое алгоритмическое пространство дает стратегическое направление для качественного совершенствования ГКС, нацеленное на устранение разнородности и других фундаментальных барьеров, препятствующих снижению ее общесистемной сложности.

Необходимое условие реализуемости единого алгоритмического пространства — наличие эффективных архитектурно-аппаратных решений, обеспечивающих компьютерно-сетевую реализа-

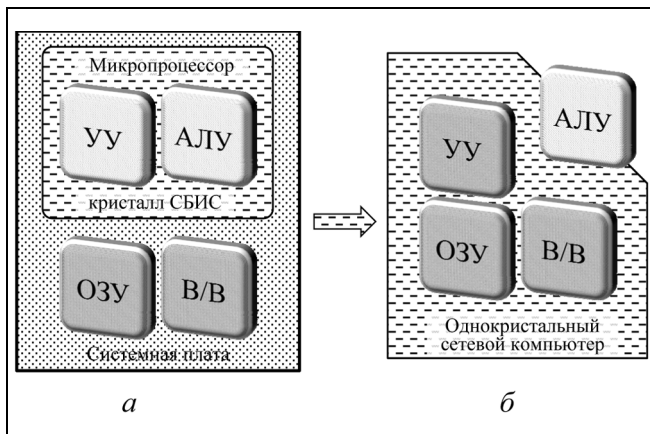


Рис. 3. От микропроцессорной архитектуры (а) к «немикропроцессорной» (б)

цию системных функций, поддерживающих исполнение операций математически замкнутого базиса преобразования деревьев.

Ключевые системные функции, образующие системный базис управления машинными ресурсами, предлагается реализовать на аппаратном уровне посредством универсальных сетевых компьютеров с новой — немикропроцессорной — архитектурой [3, 20, 21] (рис. 3).

Из четырех блоков АЛУ, ОЗУ, УУ и В/В фон-неймановских универсальных компьютеров [5] микропроцессоры в одном кристалле СБИС реализуют (рис. 3, а) два — АЛУ и УУ. Память (ОЗУ) и устройства ввода-вывода (В/В) вынесены как отдельные блоки, управление которыми осуществляет УУ из микропроцессора. Включение УУ в состав микропроцессора позволяет характеризовать микропроцессорные архитектуры компьютеров как («умная» арифметика) & («глупая» память).

Известно, что до сих пор системный интеллект компьютеров реализуется программно посредством ОС, загружаемых в оперативную память. Несбалансированность микропроцессорной архитектуры выражается в том, что управление вычислениями осуществляется из УУ микропроцессора, не обладающего собственной системной памятью для хранения текущего состояния вычислительных процессов. Отсюда высокие накладные расходы — чрезмерная сложность ОС, большие расходы памяти для ОС, большие временные затраты на последовательную реализацию многошаговых системных команд, слабая защищенность системных областей оперативной памяти от несанкционированного вмешательства других программ и др.

Компьютерный базис исчисления древовидных структур позволяет относительно просто (благодаря математической полноте и замкнутости) пе-

реходить к системно сбалансированной и более эффективной — немикропроцессорной — архитектуре компьютеров (рис. 3, б). Система команд компьютеров с немикропроцессорной архитектурой строится на основе нового компьютерного базиса исчисления древовидных структур [3].

Такие архитектуры открывают новый класс массовых компьютерных устройств, которые предназначены для использования как универсальные однокристалльные сетевые узлы, обеспечивающие формирование единого, математически однородного, бесшовно программируемого и кибербезопасного алгоритмического пространства, с качественно новыми системообразующими свойствами, о которых говорилось выше, а также в работе [1].

Особенность и основа архитектуры однокристалльного сетевого компьютера с немикропроцессорной архитектурой (рис. 3, б) — «умная» оперативная память большого объема со встроенным «системным интеллектом». Он реализуется аппаратно в СБИС «умной» памяти посредством УУ с эффективным алгоритмом управления, воплощающим набор операций нового компьютерного базиса. Арифметические возможности наращиваются путем внешнего подключения ведомых АЛУ (рис. 3, б). В качестве таких «сопроцессоров» могут использоваться разные вычислители — от специальных ускорителей и универсальных микропроцессоров до суперкомпьютеров. Это позволяет характеризовать немикропроцессорную архитектуру компьютеров как («умная» память) & («глупая» арифметика).

В компьютерном базисе исчисления древовидных структур становится возможным эффективный перенос ключевых системных функций, которые до сего времени программно реализуются в ядре ОС, а также в сетевом оборудовании для поддержки сетевых протоколов, на аппаратный уровень. «Умная» память аппаратно (на транзисторном уровне СБИС) реализует функции ядра ОС и обеспечивает:

- автоматическое управление динамическим распределением памяти при размещении в ней и удалении элементов преобразуемых древовидных структур (включая сборку мусора);
- многозадачный режим, виртуализацию памяти;
- управление вводом-выводом;
- выход в сети и сетевые взаимодействия по осуществлению бесшовно программируемых распределенных вычислений;
- полную, встроенную в память, аппаратную защиту от несанкционированного доступа к физическому адресному пространству ОЗУ со стороны исполняемых программ.

Благодаря аппаратной реализации системных функций достигается предельно высокие уровни эффективности по управлению и защите внутри-компьютерных и сетевых ресурсов, вовлекаемых в распределенные вычисления.

Обеспечение кибербезопасности — это не только функциональная защита от зловредных программ, но и, прежде всего, борьба с причинами чрезмерной системно-технической сложности, которая приводит к утрате контроля над внутренними степенями свободы больших систем и росту уязвимостей компьютерной среды [21].

Важнейшая особенность нового пространства, открывающая возможности кардинального снижения системотехнической сложности ГКС, — разнесение системных и прикладных функций на разные уровни: системные выносятся на аппаратный, прикладные остаются на программном.

Размещение и обработка компонентов древовидных структур в распределенной оперативной памяти компьютеров, связанных сетями, в ходе исполнения прикладных программ осуществляется автоматически посредством аппаратно реализованных системных функций управления машинными/сетевыми ресурсами, которые полностью скрыты от программиста под математически замкнутыми операциями преобразования древовидных структур.

Все операции преобразования древовидных структур в математически замкнутом базисе исчисления древовидных структур трактуются как инструмент решения прикладных задач. Воплощая математически замкнутую логику произвольных алгоритмических преобразований сколь угодно больших древовидных структур, они составляют машинонезависимый уровень программирования прикладных задач, на котором логика обработки древовидных структур инвариантна относительно сетевых конфигураций используемых вычислительных ресурсов.

Как следствие, это сводит к минимуму необходимость «ручного» управления взаимодействием прикладных задач с системной программной средой, которое типично для индустриально значимых языков программирования.

Новое алгоритмическое пространство — это не только путь к повышению эффективности и надежности исполнения системных функций управления вычислениями в ГКС на порядки. Это — избавление от необходимости создания новых многослойных, крайне разнородных, непомерно раздувшихся и, потому, трудно контролируемых программных реализаций системных функций (ОС, промежуточное ПО, сетевые протоколы). Это — возможность взаимодействия и совместного функционирования в ГКС нового алгоритми-

ческого пространства и всех наработок в существующих программных платформах.

На этом пути открываются возможности для прекращения роста разнородности ГКС, для обеспечения в дальнейшем кардинального снижения степени системной разнородности совокупных ресурсов ГКС, а значит и чрезмерной, все хуже контролируемой системотехнической сложности ГКС, что позволит вывести ее на качественно новые уровни эффективности и кибербезопасности.

Важно отметить, что аппаратная реализация системных функций в «умной» памяти, построенная на основе математически замкнутых моделей, не имеет «неучтенных» степеней свободы и «скрытых функций» управления, что крайне важно для обеспечения абсолютной защиты от несанкционированного вмешательства на системные уровни со стороны прикладных программ. Защита обеспечивается тем, что со стороны прикладных программ в новой архитектуре отсутствуют каналы нелегального доступа (в обход математически замкнутых операций исчисления древовидных структур) к внутренним механизмам системных уровней, аппаратно реализованным в «умной» памяти.

В рамках новой (немикропроцессорной) архитектуры и единого алгоритмического пространства открываются возможности общего решения проблем обеспечения кибербезопасности ГКС в разных сферах:

- безопасность прикладных сервисов — благодаря решению прикладных задач в математически замкнутом базисе исчисления древовидных структур;
- системотехническая безопасность — благодаря:
  - исполнению на аппаратном уровне математически верифицированных системных функций управления вычислительными ресурсами и процессами;
  - полной защите физического адресного пространства оперативной памяти от несанкционированного доступа со стороны собственных и сторонних вычислительных процессов;
  - исключению необходимости создания новых промежуточных программных слоев (ОС, поддержка протоколов разных уровней и др.);
- информационная безопасность — благодаря новым возможностям перехода к высокоорганизованным формам накопления и систематизации глобально распределенной информации посредством глубокого структурирования данных и программ в математически замкнутом базисе исчисления древовидных структур;
- социальная безопасность [1] — благодаря высокой степени структурирования глобально распределенной информации, позволяющей уст-



ранять «токсичные» и деструктивные воздействия сверхпотоков плохо организованной информации на человека и социумы.

### 3. ПУТИ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ ОРГАНИЗАЦИИ НАДЕЖНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Огромное количество компьютеров ГКС и наличие большой избыточности связей между ними дает необходимый резерв для программных методов обеспечения надежного выполнения распределенных вычислений и процессов СЦУ в вычислительных средах с ненадежными компонентами. Ненадежность компонентов обусловлена неустранимой недетерминированностью вхождения вовлекаемых вычислительных узлов и связей сетевых ресурсов. Причины недетерминированности — негарантированное включение отдаленных устройств, поломки, сбои, деструктивные воздействия и др.

В общем случае доступ пользователей своих компьютерных устройств к аппаратным и системотехническим уровням повышения надежности чужих компьютеров и сетевого оборудования ГКС отсутствует. При этом каждому пользователю необходимо предоставить высокую надежность распределенного исполнения его программ при том состоянии компьютерной среды, которое де-факто имеется на каждый текущий момент.

В отсутствие на системотехнических уровнях внешнего доступа к отдаленным ресурсам сетей наиболее доступным путем к обеспечению надежности исполнения программ каждого пользователя-программиста становится применение программных методов подготовки прикладных программ распределенных вычислений к исполнению в компьютерной среде с отработкой задаваемых уровней параллелизма.

Бесшовная программируемость единого алгоритмического пространства распределенных вычислений открывает возможности обеспечения требуемой надежности исполнения программ путем автоматического внесения информационной, коммуникационной и вычислительной избыточности в программы пользователей на этапах их трансляции и последующей компоновки исполняемых машинных кодов. При этом учитывается наличие в программах параллельно исполняемых фрагментов, которые в ходе исполнения на многих компьютерах напрямую обмениваются промежуточными данными.

Информационная избыточность реализуется разбиением массивов данных и файлов на порции, с последующим их копированием и распределенным хранением в памяти различных компьютеров.

Коммуникационная избыточность — одновременной передачей идентичных копий порций данных от мест их хранения к местам их обработки по разным маршрутам. Вычислительная избыточность — посредством одновременного исполнения на разных компьютерах многих копий идентичных для каждого фрагмента задачи процессов с обеспечением обменов данных между ними через сети по многим маршрутам.

Вычислительная избыточность вносится на этапах трансляции прикладных программ автоматически посредством специальных вставок в коды машинных программ. Сохраняя правильное функционирование и требуемые уровни параллелизма, они осуществляют надежное исполнение программы при наличии больших резервов ресурсов путем привлечения (через сети) в ходе вычислений любого требуемого для сохранения заданных уровней параллелизма и надежности количества работоспособных компьютерных устройств.

Повышение надежности распределенного исполнения программ с привнесенной избыточностью обеспечивается путем одновременного (параллельного) выполнения многих копий машинных кодов программ с идентичными начальными состояниями и входными данными на многих компьютерных устройствах. В системе ПАРСЕК фрагменты программ, с указанным параллелизмом их исполнения, реализуются на доступных компьютерах как запуск процедур с отдаленным доступом — RPC (см. выше).

Надежность достигается посредством исполнения в идентичных копиях программ процедуры мажорирования, которая встраивается в коды исполняемых программ на этапе трансляции-компоновки. Она привязывается к идентификаторам контрольных точек, расставленных в программе. В ходе исполнения программы во всех одноименных контрольных точках всех ее копий процессов, исполняемых на различных компьютерах, осуществляется их приостановка с последующими обменами промежуточными данными между всеми копиями в целях взаимного сравнения и мажорирования текущего состояния процессов в контрольных точках.

Совпадение большинства промежуточных результатов указывает на то, что компьютеры, в которых они получены, находятся в работоспособном состоянии. Отсутствие ожидаемых сведений или несовпадение с результатом большинства говорит о неработоспособности соответствующих компьютеров и необходимости их замены, с передачей копии текущего состояния правильного процесса на другой компьютер сети из пула дееспособных.



В математически однородном пространстве исчисления древовидных структур пулы дееспособных компьютеров в масштабах ГКС априори не ограничены. В отсутствие разнородности форм представления данных и программ проблемы перекодировок для сравнения промежуточных результатов и передачи состояния копий правильных процессов на дееспособные компьютеры не возникают.

В предполагаемом подходе представлена программная реализация модели резервирования с заменой (хорошо известной в теории надежности) в ее адаптации к особенностям ГКС.

Исследования математической модели рассмотренного способа обеспечения надежности показали [22] экспоненциальный характер роста надежности при линейном увеличении количества идентичных процессов. Так, внесение избыточности сравнительно небольшой кратности ~5 может повысить надежность на многие порядки. Полученные оценки дают количественные зависимости между требуемой надежностью исполнения программ пользователей и кратности внесения на этапе их трансляции-компоновки необходимой избыточности.

Изложенный способ обеспечения надежности частично реализован в рамках технологии ПАРСЕК в представленной выше стендовой системе распределенных вычислений в математически однородном алгоритмическом пространстве [16].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во второй части работы продолжено исследование общесистемных свойств глобальной компьютерной среды (ГКС) — принципиально нового, сверхбольшого и глобально сильносвязного кибернетического объекта, введенного в рассмотрение в статье [2] первой части работы [1], который оказывает беспрецедентное по масштабам, глубине и темпам влияние на мировую социосистему. Стихийный и сверхбыстрый рост крайне разнородной ГКС привел к массовым системотехническим противоречиям и общесистемному кризису в ее развитии, который проявляется в экспоненциальном росте слабо формализованной информации, непригодной для осуществления качественного управления.

Глубокий внутренний кризис ГКС в нарастающих масштабах оказывает негативное влияние на устойчивость развития социосистем, которое сопровождается чередой глобальных кризисов, не поддающихся известным методам и способам политического и экономического регулирования.

Для восстановления управляемости социосистем в условиях глобальной сильносвязности необходим адекватный масштабам возникающих проблем глобально распределенный инструмент управления устойчивым развитием. Таким инструментом может стать только ГКС, обладающая практически неограниченным потенциалом наращивания вычислительных ресурсов и функциональных возможностей, необходимых для полномасштабной переработки экспоненциально растущих потоков и объемов информации в целях управления устойчивым развитием социосистем.

Необходимое условие для этого — принципиальное обновления системообразующего потенциала ГКС.

Представленный подход к формированию в ГКС математически однородного алгоритмического пространства показывает пути к общему решению проблем программируемости, безопасности и надежности распределенных вычислений и сетецентрического управления (СЦУ).

Научная новизна подхода начинается с пересмотра базовых принципов организации машинных вычислений, заложенных в классической модели Дж. фон Неймана. Математическое обобщение классической компьютерной аксиоматики на основе исчисления древовидных структур открывает возможности:

- устранения первопричин воспроизводства разнородности аппаратных и программных платформ;
- распространения свойства универсальной программируемости с внутрикомпьютерных ресурсов на любые совокупности компьютеров, связанных сетями;
- построения нового класса сетевых универсальных компьютеров, имеющих немикропроцессорную архитектуру;
- формирования в сколь угодно больших сетях на основе компьютеров с немикропроцессорной архитектурой бесшовно программируемого и кибербезопасного алгоритмического пространства надежных распределенных вычислений и процессов СЦУ.

Практическое воплощение изложенных принципов и методов формирования математически однородного алгоритмического пространства открывает пути к созданию принципиально новых технологий решения в ГКС с минимальными издержками всего разнообразия задач распределенных вычислений и СЦУ устойчивым функционированием и развитием больших распределенных систем в условиях глобальной информационной сильносвязности.

Это напрямую относится к технологиям общего и высокорентабельного решения комплексных





проблем СЦУ как в военных сферах, так в разнообразных сферах управления функционированием и развитием социосистем. Ключевую роль такие технологии сыграют в опережающем решении обширной проблематики, обозначенной в концепциях Internet of Things [18] и Internet of Everything [19], которые открывают на компьютерном рынке новую нишу емкостью \$14.4 трлн. до 2022 г.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Затуливетер Ю.С., Фищенко Е.А.* Проблемы программируемости, безопасности и надежности распределенных вычислений и сетевидного управления. Ч. 1. Анализ проблематики // Проблемы управления. — 2016. — № 3. — С. 49—57.
2. *Затуливетер Ю.С.* Проблемы глобализации парадигмы управления в математически однородном поле компьютерной информации. Ч. 1; Ч. 2 // Проблемы управления. — 2005. — № 1. — С. 2—10; № 2. — С. 12—23.
3. *Затуливетер Ю.С.* Компьютерный базис сетевидного управления // Тр. конф. «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения» УКИ'10 / ИПУ РАН. — М., 2010. — С. 17—37. — URL: <http://www.ipu.ru/sites/default/files/publications/38190/20052-38190.pdf> (дата обращения: 22.06.2016).
4. *Затуливетер Ю.С.* К новой компьютерной аксиоматике // Тр. третьей междунар. конф. «Идентификация систем и задачи управления», SICPRO'04 / ИПУ РАН. 28—30 янв. 2004 г. — М., 2004. — С. 2187—2193.
5. *Беркс А., Голдстейн Г., Нейман Дж.* Предварительное рассмотрение логической конструкции электронного вычислительного устройства // Кибернетический сборник. — 1964. — Вып. 9. — С. 7—67.
6. *Затуливетер Ю.С., Халатян Т.Г.* ПАРСЕК — язык компьютерного исчисления древовидных структур с открытой интерпретацией. Стеновый вариант системы программирования. — М.: ИПУ РАН, 1997. — 71 с.
7. *McCarthy, John.* Recursive Functions of Symbolic Expressions and Their Computation by Machine, Part I // Communications of the ACM. — 1960. — Vol. 3, N 4. — P. 184—195. — URL: <http://www-formal.stanford.edu/jmc/recursive.pdf> (дата обращения: 22.06.2016).
8. *Кнут Д.Э.* Искусство программирования. Т. 1. Основные алгоритмы. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2000. — 720 с.
9. *Затуливетер Ю.С., Топорщев А.В.* Язык ПАРСЕК: программирование глобально распределенных вычислений в модели исчисления древовидных структур // Проблемы управления. — 2005. — № 4. — С. 12—20.
10. *Затуливетер Ю.С., Фищенко Е.А.* Организация распределенных вычислений в системе программирования ПАРСЕК на примере сжатия цифрового видео // Проблемы управления. — 2003. — № 4. — С. 6—10.
11. *Birrell A.D., Nelson B.J.* Implementing remote procedure calls // ACM Trans. Comp. Systems. — 1984. — Vol. 2, N 1. — P. 39—59. — URL: <http://birrell.org/andrew/papers/ImplementingRPC.pdf> (дата обращения: 22.06.2016).
12. *Орфали Р., Харки Д., Эдвард Д.* Основы CORBA. — М.: Малип, 1999. — 316 с.
13. *Модель COM/DCOM.* — URL: [http://www.interface.ru/fset.asp?Url=/borland/com\\_dcom.htm](http://www.interface.ru/fset.asp?Url=/borland/com_dcom.htm) (дата обращения 12.07.2016).
14. *Service Oriented Architecture (SOA).* — URL: <http://www.interface.ru/home.asp?artId=3352> (дата обращения 22.06.2016).
15. *Каравай М.Ф., Пархоменко П.П., Подлазов В.С.* Комбинаторные методы построения двудольных однородных минимальных квазиполных графов (симметричных блок-схем) // Автоматика и телемеханика. — 2009. — № 2. — С. 153—170.
16. *Артамонов С.Е., Затуливетер Ю.С., Козлов В.А.* и др. Экспериментальный стенд распределенных вычислений в математически однородном алгоритмическом пространстве // Тр. конф. «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения» УКИ-2012 / ИПУ РАН. — М., 2012. — С. 001956—001961. — URL: <http://www.ipu.ru/sites/default/files/publications/16726/2885-16726.pdf> (дата обращения: 22.06.2016).
17. *Затуливетер Ю.С., Семенов С.С.* Ориентир — достаточная оборона // Национальная оборона. — 2012. — № 11 (80). — С. 30—40. — URL: <http://www.oborona.ru/includes/periodics/conceptions/2012/1112/14319513/detail.shtml> (дата обращения: 22.06.2016).
18. *Dave Evans.* The Internet of Things How the Next Evolution of the Internet is Changing Everything. 2011. — URL: [http://www.cisco.com/web/about/ac79/docs/innov/IoT\\_IBSG\\_0411FINAL.pdf](http://www.cisco.com/web/about/ac79/docs/innov/IoT_IBSG_0411FINAL.pdf) (дата обращения: 22.06.2016).
19. *Bradley J., Barbier J., Handler D.* Embracing the Internet of Everything to Capture your Share of \$14,4 trillion. CISCO, White Paper. 2013. — URL: [http://www.cisco.com/web/PH/ciscoinnovate/pdfs/IoE\\_Economy.pdf](http://www.cisco.com/web/PH/ciscoinnovate/pdfs/IoE_Economy.pdf) (дата обращения: 22.06.2016).
20. *Затуливетер Ю.С., Фищенко Е.А., Семенов С.С.* Принципы формирования универсального алгоритмического пространства распределенных и параллельных вычислений на основе немикроспроцессорных компьютерно-сетевых архитектур // Вестник компьютерных и информационных технологий. — 2013. № 6 (108). — С. 3—10. — URL: <http://www.ipu.ru/sites/default/files/publications/25296/7293-25296.pdf> (дата обращения: 22.06.2016).
21. *Затуливетер Ю.С., Фищенко Е.А.* Принципы формирования универсального бесшовно программируемого и кибербезопасного алгоритмического пространства // Программные системы: теория и приложения. — 2014. — № 1. — С. 153—173. — URL: [http://psta.psiras.ru/read/psta2014\\_1\\_153-173.pdf](http://psta.psiras.ru/read/psta2014_1_153-173.pdf) (дата обращения: 22.06.2016).
22. *Затуливетер Ю.С., Топорщев А.В., Фищенко Е.А., Ходаковский И.А.* Принципы реализации моделей повышения надежности распределенных вычислений в системе программирования ПАРСЕК // Датчики и системы. — 2009. — № 12. — С. 11—16. — URL: <http://www.ipu.ru/sites/default/files/publications/7192/1206-7192.pdf> (дата обращения: 22.06.2016).

Статья представлена к публикации членом редсовета чл.-корр. РАН П.П. Пархоменко.

**Затуливетер Юрий Семенович** — канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник, ✉ [zvt@ipu.rssi.ru](mailto:zvt@ipu.rssi.ru),

**Фищенко Елена Алексеевна** — канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник, ✉ [elena.fish@mail.ru](mailto:elena.fish@mail.ru),

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва.

## Станислав Николаевич ВАСИЛЬЕВ (к 70-летию со дня рождения)



5 июля 2016 г. исполнилось 70 лет со дня рождения д-ра физ.-мат. наук, академика РАН, директора Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН Станислава Николаевича Васильева.

Станислав Николаевич родился 5 июля 1946 г. в г. Чистяково Сталинской области (ныне г. Торез Донецкой области). В 1964 г. окончил с золотой медалью среднюю школу № 6 в г. Казани, а в 1970 г. — с отличием и рекомендацией в аспирантуру Казанский авиационный институт им. А.Н. Туполева, в котором затем работал и учился в аспирантуре. В 1975 г. приглашен в организуемый Отдел теории систем и кибернетики при Сибирском энергетическом институте АН СССР (ныне Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения РАН, г. Иркутск), зав. Отделом — д-р физ.-мат. наук, позднее академик, В.М. Матросов. В 1980 г. на базе этого отдела был создан Иркутский ВЦ СО АН СССР, реорганизованный в 1997 г. в Институт динамики систем и теории управления СО РАН. С.Н. Васильев прошел путь от младшего научного сотрудника до директора (с 1991 г.) ИДСТУ. Защитил кандидатскую и

докторскую диссертации по специальностям «математическая кибернетика» и «системный анализ и теория автоматического управления». В 1997 г. избран член-корреспондентом, а в 2006 г. — действительным членом Российской академии наук по специальности «процессы управления». В 2006 г. назначен директором ИПУ РАН.

Академику С.Н. Васильеву принадлежат выдающиеся результаты в области математической теории систем и методов автоматизации исследований, проектирования и управления. Разрабатываемые им направления: теория систем, нелинейная динамика и управление, автоматизация решения задач на ЭВМ, интеллектуальное управление, многокритериальное принятие решений, управление развитием эколого-экономических и других систем. В развитие метода сравнения, предложенного В.М. Матросовым, им разработана теория модельных аналогий, применяемая к качественному анализу разнообразных математических моделей систем. На ее основе исследованы алгебраические, логико-динамические и другие системы, например, нелинейные системы при возмущениях



с приложениями к управлению механическими системами, группировками движущихся объектов, к анализу динамики автоматных сетей и асинхронных переключаемых схем. Созданы логические методы представления и обработки знаний с приложениями к проблемам интеллектуализации систем автоматического управления. С.Н. Васильев — автор и соавтор методов векторной оптимизации с минимальными требованиями к априорной информации, методов гармонизации интересов сторон, в том числе в задачах регионального развития. Эти и другие разработанные С.Н. Васильевым методы легли в основу ряда оригинальных программных продуктов. Полученные результаты отражены в многочисленных публикациях. Он автор и соавтор более 400 научных работ, в том числе 14-ти монографий.

Академик С.Н. Васильев неоднократно приглашался в ведущие зарубежные исследовательские центры и университеты для чтения лекций и работы в совместных научных проектах. На протяжении многих лет он руководит рядом научных тем, в том числе поддержанных международными грантами. Организатор и руководитель ведущей научной школы по устойчивости и управлению в гетерогенных моделях динамических и интеллектуальных систем. Многократно приглашался с пленарными докладами на авторитетные российские и международные конференции. Организатор ряда таких конференций.

По совместительству С.Н. Васильев ведет многолетнюю педагогическую работу. В 1976—2006 гг. работал профессором и заведующим кафедрами Иркутского и Бурятского госуниверситетов, заведующим (2007—2012 гг.) и профессором (2013—2016 гг.) кафедры МФТИ. С 2009 г. заведует кафедрой МГУ им. М.В. Ломоносова. Подготовил более 20 кандидатов и докторов наук. В 2005—2015 гг. — член Экспертного совета ВАК. Председатель диссертационных советов при ИПУ РАН.

Немало времени С.Н. Васильев уделяет научно-организационной работе, будучи членом Бюро

Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН и Бюро Комиссии Президиума РАН по совершенствованию структуры научных организаций, находящихся в ведении ФАНО России, председателем Научного совета РАН по процессам управления, сопредседателем Научного совета РАН по методологии искусственного интеллекта, заместителем председателя Российского национального комитета по автоматическому управлению, членом Совета РАН по исследованиям в области обороны, Научно-издательского совета РАН, Комиссии Президиума РАН по формированию перечня программ фундаментальных исследований РАН, экспертных комиссий РАН по золотой медали РАН им. С.П. Королева и премии РАН им. Б.Н. Петрова и др.

Академик С.Н. Васильев — главный редактор журнала РАН «Автоматика и телемеханика»; заместитель главного редактора журнала «Доклады Академии наук»; член редколлегий журналов «Известия РАН. Теория и системы управления», «Проблемы управления», «Вестник информационных и компьютерных технологий», «Искусственный интеллект и принятие решений», «Известия вузов. Авиационная техника», «Онтология проектирования», «Подводные исследования и робототехника», «Nonlinear Studies», «Mathematics in Engineering, Science, and Aerospace», «Nonlinear Dynamics and Systems Theory», «Journal of Automation and Information Science», «Numerical Analysis and Applications» и др.

Деятельность С.Н. Васильева отмечена Государственной премией СССР в области науки и техники (1984), Премией Правительства РФ в области образования (2010), Премией Правительства РФ в области науки и техники (2012) и премиями РАН в области фундаментальных исследований, орденами Почета, Дружбы и другими государственными и научными наградами, грамотами и благодарностями.

***Дорогой Станислав Николаевич! Сердечно поздравляем Вас с юбилеем и желаем здоровья и счастья на многие годы! Творческих Вам успехов!***

*Редакционный совет,  
редакционная коллегия  
и редакция журнала «Проблемы управления»*





## ВОСЬМАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «УПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЕМ КРУПНОМАСШТАБНЫХ СИСТЕМ» MLSD'2015

Конференция состоялась 29 сентября — 1 октября 2015 г. в Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН), г. Москва и собрала ведущих отечественных и зарубежных ученых, работающих в данной области. Цели конференции — обмен информацией по результатам современных исследований и разработок, обсуждение, обобщение и распространение научных достижений в области научно-методического сопровождения стратегического и инвестиционного развития крупномасштабных топливно-энергетических, промышленных, транспортных, информационных, региональных, муниципальных и других систем. Одна из важных задач конференции — разработка методологии и инструментальных средств управления развитием крупномасштабных систем.

Конференция объединила представителей учреждений Российской академии наук, а также отечественных и зарубежных вузов, академий и университетов, управленческих и коммерческих организаций.

На конференции работали 12 секций по следующим направлениям.

- Проблемы управления развитием крупномасштабных систем, включая ТНК, госхолдинги и госкорпорации.
- Методы и инструментальные средства управления инвестиционными проектами и программами.
- Имитация и оптимизация в задачах управления развитием крупномасштабных систем.
- Управление топливно-энергетическими, экономическими и другими системами.
- Управление транспортными системами.
- Управление развитием крупномасштабных технических комплексов и систем в отраслях народного хозяйства.
- Управление региональными, городскими, муниципальными системами.

- Управление объектами атомной энергетики и другими объектами повышенной опасности.
- Информационное и программное обеспечение систем управления крупномасштабными производствами.
- Мониторинг в задачах управления крупномасштабными системами.
- Управление развитием крупномасштабных систем здравоохранения, медико-биологических систем и технологий.
- Методология, методы и программно-алгоритмическое обеспечение обработки и интеллектуального анализа больших массивов информации.

В программу MLSD'2015 были включены 26 пленарных и 220 секционных докладов, представленных учреждениями Российской академии наук, вузами, академиями и университетами, а также управленческими и коммерческими организациями из семи стран и многих регионов. Число участников конференции составило 384 чел., не менее четверти из них составили молодые ученые и специалисты. Представлено несколько десятков докладов по результатам работ, выполненных при поддержке РФФИ и других российских фондов.

**Работу конференции открыли** ученый секретарь ИПУ РАН, д-р техн. наук *В.Г. Лебедев* и заместитель председателя Программного комитета, председатель Оргкомитета конференции, д-р техн. наук *А.Д. Цвиркун*. Была отмечена популярность конференции, важность и актуальность разработки фундаментальных проблем управления развитием крупномасштабных систем и систематического широкого обмена опытом и знаниями в этой области, расширение тематики в соответствии с запросами времени и развитием сферы действия крупномасштабных систем в научной, промышленно-технической, социально-экономической и информационной жизни страны.

Разработка теории функционирования крупномасштабных систем охватывает широкий круг



проблем. Это концепции и стратегии управления в современных условиях; методологические основы управления ТНК, госхолдингами и госкорпорациями; системный анализ, мониторинг и аудит крупномасштабных систем; отраслевые и региональные крупномасштабные системы; информационные крупномасштабные системы; интеллектуальные технологии и инструментальные средства; безопасность крупномасштабных проектов, систем и объектов; формирование корпоративных систем поддержки принятия решений для управления и др.

Об актуализации проблемы развития крупномасштабных систем говорит уже тот факт, что по предложениям участников конференций прошлых лет и по решению Программного комитета на нынешней конференции сформировались две новые секции: по управлению развитием крупномасштабных систем здравоохранения, медико-биологических систем и технологий и по исследованию проблем обработки и интеллектуального анализа больших массивов информации — методологии, методам и программно-алгоритмическому обеспечению этих исследований. Работа обеих новых секций прошла успешно и вызвала большой интерес.

**На пленарных заседаниях** конференции заслушаны доклады приглашенных известных крупных ученых в области управления крупномасштабными системами.

В докладе «Проблемы управления развитием крупномасштабных систем в современных условиях» академика РАН *С.Н. Васильева* и д-ра техн. наук *А.Д. Цвиркуна* (ИПУ РАН) дан анализ геополитической и социально-экономической ситуации в России, Европе, Азии, рассмотрены цели и задачи в области устойчивого развития и вопросы совершенствования модели развития России и ее взаимодействия с внешним миром, вопросы стратегического планирования и принятия финансовых решений по проектам социально-экономических инвестиций в России. Отмечено, что в целях реализации системного подхода к управлению в научно-технической политике, стимулирования инновационной активности целесообразно создание федерального органа, отвечающего за разработку государственной научно-технической и инновационной политики, координацию деятельности отраслевых министерств и ведомств в ее реализации.

Динамический характер задач управления развитием крупномасштабных систем требует создания методов формализации и оптимизации — от сценариев развития до выбора рациональных

производственных и управленческих структур и совместного использования оптимизационных и имитационных моделей, итеративных процедур выбора рациональных вариантов развития системы.

В ИПУ РАН создано и развивается научное направление управления развитием крупномасштабных систем, заложены методологические основы, разработаны агрегативно-декомпозиционный подход к проектированию структур крупномасштабных систем и методология построения комплексов взаимосвязанных оптимизационно-имитационных моделей планирования развития и функционирования крупномасштабных систем на уровне предприятий и групп предприятий, итеративные процедуры планирования развития крупномасштабных систем. Созданы и активно применяются профессиональные системы для финансового анализа и разработки бизнес-планов инвестиционных проектов.

Инвестиционные проекты должны осуществляться в рамках комплексной, межотраслевой долгосрочной программы социально-экономического развития страны и территориального размещения производств и производительных сил с учетом опыта мирового и регионального развития. Государственные программы и крупные бизнес-проекты должны претворяться в жизнь после тщательной проработки в институтах государственных академий.

Большое внимание участники конференции уделили проблемам энергетического обеспечения промышленности, систем и объектов инфраструктуры, социально-эколого-экономическому развитию и проблемам безопасности.

Развитию **крупномасштабных систем энергетики**, особенностям управления системами электроэнергетического хозяйства генерирующих и передающих компаний, энергосетей, регионов, страны посвящены доклады чл.-корр. РАН *С.П. Филиппова* (Институт энергетических исследований РАН) «Управление технологическим развитием крупномасштабных систем энергетики на долгосрочную перспективу», канд. экон. наук *Ф.В. Веселова* (Институт энергетических исследований РАН), д-ра техн. наук *И.Б. Ядыкина* (ИПУ РАН), д-ра техн. наук *Н.Н. Бахтадзе* (ИПУ РАН) «О концептуальном проектировании интеллектуальных систем управления энергетическими системами», чл.-корр. РАН *Н.И. Вороняя* (Институт сильноточной электроники СО РАН) «О методологии обоснования развития ЕНЭС России».

Системный анализ новых энергетических технологий: методология, математическое моделирование, теоретические и прикладные исследования,



обоснование исследовательских работ в области тепловой и возобновляемой энергетики, энергосбережения и теплоснабжения; прогнозирование энергопотребления страны и регионов: разработка методологии и имитационных моделей, подготовка прогнозов, исследование проблем энергоэффективности: разработка инструментария, технико-экономический анализ энергосберегающих технологий, изучение тенденций в экономике; моделирование топливно-энергетического баланса страны и регионов: методология, модельно-информационные средства, практика; экологические проблемы (моделирование, исследования процессов образования вредных веществ, трансформации выбросов энергетики в окружающей среде и др.) и глобальные энергетические исследования, в том числе моделирование мировой энергетической системы, анализ тенденций технологического развития мировой энергетики — вот круг вопросов, затронутых в этих докладах.

Растет сложность управления единой энергосистемой. Отсутствие современных систем прогнозирования нагрузки приводит к снижению безопасности функционирования энергосистем или/и к снижению эффективности. Обеспечение эффективного использования всех видов ресурсов (природных, социально-производственных и человеческих) для надежного, качественного и эффективного энергоснабжения возможно на основе интеллектуальной системы управления. Интеллектуальные энергетические системы требуют применения системного подхода к исследованиям и разработке.

Координирующая система управления глобальной энергосистемой должна представлять собой иерархическую информационно-управляющую систему, функционирующую в формате мультиагентной технологии на основе прогнозирующих моделей. Целесообразно применение мультиагентного подхода к динамической оценке состояния энергосистемы, использующего для оперативного прогноза модели реального времени. Основой для построения интеллектуальных прогнозирующих моделей должны быть технологии систем мониторинга переходных режимов. Методы оперативной оценки состояния и прогнозирующей диагностики на основе виртуальных моделей технологических процессов опираются на методы интеллектуального анализа данных (Data Mining).

Создание комплекса моделирования в реальном времени является критической технологией, так как открывает возможность применения в энергетике ряда технологий управления, основанных на принципах адаптивного и оптимального

управления, в том числе нового поколения мультиагентных систем поддержания гарантированной устойчивости энергетических систем.

Формирование вариантов развития ЕНЭС, анализ условий функционирования и выбор решений по развитию ЕНЭС позволят выработать обоснованные рекомендации по развитию Единой национальной энергетической системы России.

Блок **социально-эколого-экономических вопросов** представлен докладами чл.-корр. РАН *В.И. Сулова* (Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН) «От деиндустриализации к реиндустриализации крупномасштабной социально-экономической системы», д-ра экон. наук *О.С. Сухарева* (Институт экономики РАН) «Стратегии индустриализации: теоретическое решение и экономическая политика», д-ра физ.-мат. наук, д-ра полит. наук *С.С. Сулакина* «Образ будущей России», д-ра экон. наук *Н.И. Комкова* (Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН) «Условия и возможности инновационного развития отечественных компаний и экономики в целом», чл.-корр. РАН *В.И. Данилова-Данильяна*, д-ра техн. наук *И.Л. Храновича* (Институт вводных проблем РАН) «Комплекс математических моделей обоснования стратегий водопользования», д-ра экон. наук *В.Н. Лившица* и кандидатов экон. наук *Т.И. Тищенко* и *Фроловой* (Институт системного анализа РАН) «Оптимизация парадигмы государственного управления как крупномасштабное инвестиционное мероприятие». В основном речь идет о стратегиях инновационного развития, реиндустриализации промышленности и экономики страны в целом, об оптимизации управления крупномасштабной социально-экономической системой, интенсификации промышленного и экономического развития с сохранением жизненного пространства и экологической безопасности.

Под реструктуризацией понимается целенаправленное, управляемое, являющееся результатом мероприятий правительственной политики изменение экономических, социально-демографических, производственно-технологических, региональных и других пропорций, необходимое для повышения устойчивости и эффективности функционирования национального хозяйства. Все силы государство и бизнес должны приложить для удержания лидирующих позиций в космической и атомной промышленности, для укрепления и возвращения позиций в авиа-, судо-, автомобилестроении, микроэлектронике и микробиологии, максимально сосредоточиться на восстановлении компетенций в станкостроении, материаловедении,



нии. Необходимость реиндустриализации для России очевидна. Она должна происходить на «инновационном поле», на базе новых технологий с принципиальными изменениями в используемых технологиях, организационно-управленческих механизмах, инфраструктурном обеспечении.

Основные черты нового технологического (инновационного) базиса — автоматизация на базе производственных роботов; аддитивные технологии (3D-принтинг); новые материалы для 3D-печати с заранее заданными свойствами; информационные технологии, пронизывающие производственно-логистические структуры и кластеры, интегрирующие их в макротехнологические комплексы. Интеграция проводится на основе интеллектуального анализа больших данных (Big Data), агентно-ориентированного моделирования, когнитивных экспертных систем, облачных и распределенных вычислений.

В рамках реиндустриализации необходима модернизация на основе наукоемких технологий секторов добычи и переработки природного сырья, отраслей, ориентированных на внутренний спрос: строительство дорог, жилья, промышленность стройматериалов, сельское хозяйство и агропром, медицина и здравоохранение, транспорт, коммуникации, энергетика и жилищно-коммунальное хозяйство — особенно в той части, которая нацелена на жизнеобеспечение в Сибири и на Дальнем Востоке, на Севере и в Арктике.

Технический прогресс, расширение производства, повышение требований к качеству жизни и забота об улучшении состояния окружающей среды предопределяют преобразования в структуре, параметрах и правилах управления водохозяйственными системами. О важности вопросов водоснабжения говорят многочисленные исследования и заключения мировой науки о возрастании проблемы воды и условий устойчивого развития водоемких отраслей экономики, удовлетворения потребностей населения в воде и экологически приемлемой среде обитания. Предлагается сценарный подход, основанный на адаптации к изменениям условий, при которых водохозяйственная система может оказаться в будущем.

При любом механизме инициирования идей о разработке новых технологий их реализация должна иметь теоретическое обоснование, которое базируется на полученных ранее результатах фундаментальных исследований. Фундаментальные исследования служат начальной, задающей стадией воспроизводственного инновационного цикла и образуют базис знаний о свойствах и закономерностях окружающего мира, который используется

в теоретико-прикладных исследованиях, практических разработках, в создании и освоении новых технологий.

Логика задачи прогнозирования, проектирования будущего желаемого социально-экономического потенциала России заставляет рассматривать эту задачу как системную задачу государственного строительства и общественного развития. Обосновывается идея перехода к новой системной парадигме социально-экономического развития страны, предполагающего проведение комплекса изменений в системе государственного целеполагания и регулирования социально-экономического развития. Изменения должны согласованно охватить ключевые компоненты государственной социально-экономической политики — социальной, макроэкономической, бюджетно-налоговой, административно-управленческой, природно-ресурсной, естественно-монопольной, инвестиционной, региональной, кадровой, образовательной, антикоррупционной и др. Все эти изменения потребуют значительных ресурсов на их эффективное осуществление, вследствие чего все это будет представлять собою крупномасштабное инвестиционное иерархическое мероприятие.

**Прикладным проблемам управления развитием** крупномасштабных систем и проектов, а именно, применению разработанных моделей, алгоритмов, программ к внедрению технологических новаций, посвящено несколько пленарных докладов.

В докладе д-ра техн. наук *Л.Р. Соркина*, д-ра техн. наук *А.С. Хохлова*, *Д.Ю. Мишутина* (ЗАО «Хоневелл») «Комплекс управления ВИНК. Опыт реализации» рассматривается подход к решению ключевых задач планирования и оперативного управления деятельностью вертикально-интегрированной нефтяной компании (ВИНК) с помощью комплекса оптимизационных систем. Рассмотрены задачи класса APS (Advanced Planning & Scheduling) в ВИНК и реализация их системами комплекса. На основе большого опыта внедрения и регулярного сопровождения систем оптимизации в ВИНК сформулированы общие требования, необходимые для успешного внедрения и сопровождения подобных комплексов, которые состоят в тесном сотрудничестве разработчиков и исполнителей комплекса с заказчиком — предприятием, на котором комплекс внедряется, — от этапа проектирования до сдачи в промышленную эксплуатацию, сопровождения проекта на протяжении года эксплуатации и технической поддержки программного обеспечения, консультаций по настройке и модификации моделей и до регулярной переподготовки специалистов. Таким образом

обеспечивается непрерывность и оптимальность производственных цепей.

Канд. техн. наук В.М. Розин с коллегами (ОАО «Интеллсофт») представили «ВИП-конструктор проектирования систем управления корпорациями и крупномасштабными проектами». Накопленный опыт разработок и внедрения управленческих систем свидетельствует о возможном использовании эффективных автоматизированных технологий создания и развития управленческих систем на основе ВИП-конструктора, содержащего готовые функциональные модули и обеспечивающего сборку систем вместо разработки «с нуля». Каждый функциональный модуль является самостоятельной системой, включающей в себя набор визуально-интерактивных панелей (ВИП-панелей), обеспечивающих комплексный обзор ситуации в целом с акцентированием «узких мест», требующих оперативного управленческого вмешательства. Такие панели ориентированы на ситуационный анализ проблем, обеспечивают интерактивное решение комплекса задач на одном экране без дополнительных работ по алгоритмизации и программированию. Функциональные модули могут быть установлены в подведомственных структурах, создавая единую информационную среду корпорации. Развитие системы обеспечивается с помощью ряда сервисов: интеграционного, информационно-аналитического, визуально-интерактивного, статистического.

Эффективность разработанной технологии автоматизированного проектирования систем управления корпорациями и крупномасштабными проектами с помощью ВИП-конструктора определяется наряду с другими характеристиками быстрым запуском функциональных модулей, естественным формированием, актуализацией и развитием централизованного интегрированного инфохранилища, повышением качества отчетной информации, многоаспектным аналитическим мониторингом исполнения решений руководства и вышестоящих органов управления; наличием расчетных индикаторов управленческой дисциплины, определением целесообразности расширения комплекса решаемых задач и сопряжения с конкретными модулями действующих внутренних и доступных внешних систем.

Доклад д-ра техн. наук А.Г. Полетыкина (ИПУ РАН) «Формализованный метод оценки и управления рисками для обеспечения кибербезопасности больших систем управления» посвящен оценке рисков от нарушений информационной безопасности (киберугроз). Предлагается общий подход, учитывающий роль барьеров специальной безо-

пасности и специфических средств информационной безопасности.

Существует проблема встраивания системы защиты информации для автоматизированных систем управления объектами промышленности в общую систему мер обеспечения безопасности (качества, надежности, функциональной безопасности, физической защиты, экономической эффективности и др.). Барьеры, установленные для других целей (для физической, технологической защиты и др.) служат также барьерами информационной безопасности АСУ.

Цель кибератаки — организация аварии, следовательно, защите в первую очередь подлежат слабые места технологического процесса, уязвимости процесса. Кибератака подразумевает уязвимости, которые связаны с изменением работы программируемой АСУ (реализация нештатных, скрытых функций). Докладчик привел виды и сценарии нарушений и ответные меры в виде системы барьеров, препятствующих кибератакам, и предложил шкалу возможных ущербов и процедуры оценки рисков, в том числе два вида ущербов для атомных электростанций (первый — нарушение ядерной безопасности, которая имеет абсолютный приоритет, второй — экономический ущерб для АЭС как объекта электрогенерации). Информация об уязвимостях поступает из различных источников в формализованном виде с набором атрибутов, позволяющих проверить достоверность сведений и запустить процессы реагирования. Список актуальных источников угроз пополняется и заносится в БД промышленно-технического комплекса АСУ АЭС для анализа и выработки мер реагирования.

Интересный аспект проблемы рисков представлен в докладе чл.-корр. РАН Н.А. Махутова (Институт машиноведения РАН), д-ра техн. наук А.Ф. Бермана, д-ра техн. наук О.А. Николайчука (Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова) «Управление риском сложных технологических комплексов на основе самоорганизации». Использованы принципы искусственной самоорганизации для обоснования алгоритма и системы управления риском сложных технологических комплексов (СТК). Техногенный риск является системным свойством, поэтому для создания системы управления им требуются знания значительного числа инженерных и естественнонаучных дисциплин, а также дисциплин, связанных с обоснованием решений, математическим моделированием и информационными технологиями. Разработанный алгоритм внутрисистемных динамических связей обеспечивает взаимоувязанные решения монодисциплинарных, междис-



циплинарных и мультидисциплинарных задач с помощью трехконтурной кибернетической самоорганизующейся системы управления. Самоорганизация — это целенаправленный процесс, в ходе которого создается, воспроизводится или совершенствуется организация сложной динамической системы. Цель работы авторов — разработка принципов искусственной самоорганизации системы управления риском СТК на основе понижения размерности проблемы и обеспечения эффективного взаимодействия специалистов различных научно-технических дисциплин для принятия согласованных управленческих решений.

Предложенная технология позволит обосновать адекватные параметры технического состояния СТК и обеспечить управление воздействиями, а это позволит увеличить количество автоматически регулируемых параметров, при необходимости переформулировать цели управления для снижения риска (например, увеличивая экономические последствия и снижая человеческие потери) и, наконец, обосновать изменение структуры системы для снижения риска вплоть до безопасного разрушения ее отдельных компонентов.

В докладе чл.-корр. РАН А.Ф. Резчикова, канд. физ.-мат. наук А.С. Богомолова (Институт проблем точной механики и управления РАН) «Критические сочетания событий — причины аварий в человеко-машинных системах» предложено представление аварий человеко-машинных систем (ЧМС) как следствия развития критических сочетаний событий. Раскрывается в формальном виде механизм распространенного типа критических сочетаний событий.

Развитие аварийных ситуаций, как правило, связано с комплексным воздействием сочетания разнородных неблагоприятных событий в ЧМС, наложенных на дефекты и отказы в системе. Вводится понятие критического сочетания как совокупности событий, приводящей к критической ситуации в системе. Для прогноза, предотвращения и парирования критических сочетаний и последовательностей событий необходимо использовать аппарат, позволяющий рассматривать ресурс сложной системы как комплекс взаимодействующих объектов и процессов с учетом динамики комплекса причинно-следственных связей системы и решать задачи прогнозирования, анализа и предотвращения критических сочетаний событий.

Причинно-следственная схема развития критических сочетаний событий представляется в виде дерева событий, а схема взаимодействия неблагоприятных событий в соответствии с определением критического сочетания событий — в виде ориен-

тированного графа. На основе данной концепции получены основные результаты в виде подходов, методов, комплексов алгоритмов и реализующих их программ. Разработан комплекс программ, позволяющих оперативно выявлять критические сочетания событий, осуществлять их сравнительный анализ, и предложена методология создания комплексов моделей системной динамики, позволяющих прогнозировать основные показатели безопасности функционирования ЧМС на различных интервалах времени и разрабатывать рекомендации на основе этих прогнозов.

Пленарные выступления докладчиков сопровождались вопросами и обсуждениями.

**Секционная работа** конференции также прошла интересно и содержательно. Отмечено участие большого числа молодых ученых и специалистов — исследователей, аспирантов и даже студентов старших курсов вузов.

Участниками **круглых столов**, проведенных под председательством д-ра техн. наук А.Д. Цвиркуна и других руководителей направлений, отмечены расширение тематики конференции и возрастающая потребность в научной координации работ, проводимых по тематике ежегодной международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем».

По результатам работы конференции изданы двухтомные «Материалы восьмой международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2015)» и двухтомные «Труды восьмой международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2015)» под общей редакцией академика РАН С.Н. Васильева и д-ра техн. наук А.Д. Цвиркуна (см. сайт конференции <http://mlsd2015.ipu.ru/>).

Опубликованные материалы свидетельствуют о новых достижениях в области управления развитием крупномасштабных систем, в создании методов и инструментально-технологических средств мониторинга, анализа, оценки и повышения качества управления и снижения рисков в контурах управления крупномасштабными системами.

*Председатель Оргкомитета А.Д. Цвиркун,  
член Оргкомитета Э.Г. Прохорова*

**Цвиркун Анатолий Данилович** — д-р техн. наук, профессор, зав. отделом, ✉ [tsvirkun@ipu.ru](mailto:tsvirkun@ipu.ru);

**Прохорова Элла Григорьевна** — науч. сотрудник, ✉ [proipu@yandex.ru](mailto:proipu@yandex.ru).

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва.





## **Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН осуществляет подготовку (по очной и заочной форме) научных кадров в аспирантуре**

### **Перечень направлений подготовки в аспирантуре ИПУ РАН:**

#### ■ **01.06.01. Математика и механика**

*Специальность:*

01.01.02 Дифференциальные уравнения, динамические системы и оптимальное управление

#### ■ **09.06.01 Информатика и вычислительная техника**

*Специальности:*

05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям)

05.13.05 Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления

05.13.06 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)

05.13.10 Управление в социальных и экономических системах

05.13.11 Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей

05.13.12 Системы автоматизации проектирования (по отраслям)

05.13.15 Вычислительные машины, комплексы и компьютерные сети

05.13.18 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

#### ■ **38.06.01 Экономика**

*Специальности:*

08.00.05 Экономика и управление народным хозяйством (по отраслям и сферам деятельности, в том числе управление инновациями)

08.00.13 Математические и инструментальные методы экономики

### **Сроки обучения:**

В очной аспирантуре — 4 года (по направлению подготовки 38.06.01 — 3 года); в заочной аспирантуре — 5 лет (по направлению подготовки 38.06.01 — 4 года).

Институт имеет бессрочную лицензию на высшее образование и государственную аккредитацию.

**Прием документов в аспирантуру с 1 июля по 30 сентября.**

**Зачисление в аспирантуру по результатам конкурса до 1 ноября.**

**Иногородним аспирантам предоставляется общежитие.**

В Институте читаются лекции для аспирантов по следующим программам:

- эконометрический анализ экономического развития (д-р экон. наук Р.М. Нижегородцев);
- моделирование систем управления (д-р техн. наук А.Л. Генкин);
- теория робастного управления (д-р техн. наук А.П. Курдюков);
- вычислительные машины, комплексы и компьютерные сети (д-р техн. наук В.М. Вишневский);
- системы автоматизации проектирования (д-р техн. наук А.В. Толок).



### ***Не забудьте подписаться!***

Подписку на журнал «Проблемы управления» можно оформить в любом почтовом отделении (подписной индекс **81708** в каталоге Роспечати или **38006** в объединенном каталоге «Пресса России»), а также через редакцию с любого месяца, при этом почтовые расходы редакция берет на себя. Отдельные номера редакция высылает по первому требованию.





## МЕРОПРИЯТИЯ IFAC – Международной федерации по автоматическому управлению

| Мероприятие                                                                                                                             | Дата                  | Место проведения                              |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------|
| IFAC Symposium on Non-Linear Control Systems — 10th NOLCOS                                                                              | 30 Aug — 02 Sep, 2016 | Monterey,<br>CA, USA                          |
| IFAC IFIP, IFORS, IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems — 13th HMS 2016                            | 31 Aug — 02 Sep, 2016 | Kyoto,<br>JAPAN                               |
| Mining, Mineral and Metal Processing — 17th MMM 2016                                                                                    | 05—08 Sep, 2016       | Vienna,<br>AUSTRIA                            |
| IFAC IMechE, IET, InstMC Symposium on Mechatronic Systems — 7th MECHATRONICS 2016                                                       | 08—09 Sep, 2016       | Loughborough<br>University,<br>UNITED KINGDOM |
| IFAC, Tokyo Institute of Techn. Workshop on Distributed Estimation and Control in Networked Systems — 6th NecSys 2016                   | 12—15 Sep, 2016       | Tokyo,<br>JAPAN                               |
| EUROSIM IFAC Congress on Modelling and Simulation — 9th EUROSIM 2016                                                                    | 13—16 Sep, 2016       | Oulu,<br>FINLAND                              |
| IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems — 10th CAMS 2016                                                              | 14—16 Sep, 2016       | Trondheim, NORWAY                             |
| APCA IFAC Conference on Portuguese Conference on Automatic Control — 12th CONTROLO 2016                                                 | 28—30 Sep, 2016       | Guimarães,<br>PORTUGAL                        |
| FAC Workshop on Thermodynamic Foundations for a Mathematical Systems Theory — 2nd TFMST 2016                                            | 05—07 Oct, 2016       | Vigo,<br>SPAIN                                |
| IFAC/IEEE Conference on Programmable Devices and Embedded Systems — 14th PDES 2016                                                      | 09—12 Oct, 2016       | Brno,<br>CZECH REPUBLIC                       |
| IFAC, CACHE, IEEE CSS TC on Systems Biology Conference on Foundation of Systems Biology in Engineering — 6th FOSBE 2016                 | 11—13 Oct, 2016       | Magdeburg,<br>GERMANY                         |
| IFAC Czech & Slovak Nat. Com. CIGRE/Czech Nat. Com. CIRED Workshop on Control of Transmission and Distribution Smart Grids — CTDSG 2016 | 13—15 Oct, 2016       | Prague,<br>CZECH REPUBLIC                     |
| Conference on Latin American Conference of Automatic Control (in cooperation with IFAC) — XVII CLCA 2016                                | 18—20 Oct, 2016       | Medellín,<br>COLOMBIA                         |
| IFAC/IFIP Workshop on Control and Computers — 1st WOCO 2016                                                                             | 19—21 Oct, 2016       | Valencia,<br>SPAIN                            |
| IFAC/IFIP WG 5.7/ESRA Workshop on Advanced Maintenance Engineering, Service and Technology — 3rd AMEST 2016                             | 26—28 Oct, 2016       | Biarritz,<br>FRANCE                           |
| IFAC EUROSIM Conference on Technology, Culture and International Stability — 17th TECIS 2016                                            | 26—27 Oct, 2016       | Durres,<br>ALBANIA                            |
| OTM IFAC, IFIP, OMG, IIC, GIC Workshop on Enterprise Integration, Interoperability and Networking — EI2N 2016                           | 03—04 Nov, 2016       | Rhodes,<br>GREECE                             |
| IEEE — CSS, The Asian Control Association, IFAC Conference on Australian Control Conference (in cooperation with IFAC) — AUCC 2016      | 06—09 Nov, 2016       | Newcastle,<br>AUSTRALIA                       |
| IFAC Symposium on Telematics Applications — 4th TA 2016                                                                                 | 09—11 Nov, 2016       | Porto Alegre — RS,<br>BRAZIL                  |

Более подробную информацию см. на сайте [www.ifac-control.org/](http://www.ifac-control.org/)

# CONTENTS & ABSTRACTS

## PATTERN ANALYSIS: DIFFUSION-INVARIANT PATTERN CLUSTERING . . . . . 2

**Myachin A.L.**

The paper presents a modification of the pattern analysis method that allows allocating separate clusters of objects with similar structure as well as with close values of their parameters. A description of the method and its algorithm realization are given.

**Keywords:** pattern, cluster analysis, diffusion-invariant pattern clustering.

## HIERARCHICAL SYNTHESIS OF MANIPULATOR SIGMOIDAL GENERALIZED MOMENTS UNDER UNCERTAINTY . . . . . 10

**Krasnova S.A., Antipov A.S.**

Feedback synthesis decomposition procedure providing tracking trajectories in operating device coordinate system is developed for control system of manipulator working body with electric actuators positioning. It is shown that using S-shaped smooth sigma-functions as local communications and states observer corrective actions provides the invariance of the tracking system with a given accuracy with respect to the existing uncertainties taking into account the restrictions on the mechanical system variables. Pointed is that the developed approach does not require solving the kinematics and dynamics inverse problems and reduces the requirements to the volume of a priori information about the control plant and external influence.

**Keywords:** manipulator, tracking, invariance, restrictions on state variables, sigma-function, states observer.

## MODELS OF POWER EXCHANGE STABILIZATION PROCESSES MONITORING AND CONTROL IN AUTONOMOUS ELECTRIC POWER SYSTEM . . . . . 22

**Nyrkov A.P., Zhilenkov A.A., Chernyi S.G.**

The paper reviews the problem of ensuring the stable parallel operation of two or more gas diesel-generators as part of an autonomous power plant in the offshore drilling platforms and water transport facilities. The conditions and features of the plant were analyzed. The recommendations on the choice of optimal values for parameters of gas diesel engine controller were given. The models allowing to solve a wide range of control tasks in autonomous power plants and providing the energy of the required quality were developed.

**Keywords:** quality indicator, the electric power system, diesel engine-generator units, drilling platform, water transport.

## STOCK MARKET TRADING BEHAVIOR MODELING TO DETECT AGGRESSIVE TRADING STRATEGIES. . . . . 29

**Kazdagli M.N.**

The paper presents a novel approach to modeling coordinated traders' behavior in stock market. The main assumption that we rely on is that traders may conspire to manipulate stock prices. The presented algorithm efficiently identifies malicious traders abusing market instruments to gain extra profit. Comparing to other similar algorithms, our algorithm provides much higher accuracy when processing historical market data.

**Keywords:** securities market, stock prices manipulations, hidden Markov model, time series analysis.

## ON MIGRATION MATRICES APPLICATION FOR CREDIT RISK EVALUATION AND MANAGEMENT UNDER THE INTERNAL RATINGS-BASED APPROACH . . . . . 37

**Stezhkin A.A.**

Noted is that under conditions of unstable global economy the issues of risk quantitative estimation accuracy and reliability and of risk-management as well become more and more relevant. Internal ratings-based approach to credit risk estimation allows to get its precise values, however the weak point of the method is the necessity of taking into account the procyclicality (economic cycle changes) influence on borrowers solvency, which as a result affects the quality of risk

management. A tool based on the theory of continuous-time Markov chains is designed to improve the quality of credit risk estimation and therefore to upgrade risk-management quality.

**Keywords:** credit risk, internal ratings-based approach (IRB), migration matrices, Markov chains, default probability, economic cycle, risk management system.

## DETERMINING THE PROBABILISTIC ESTIMATES FOR TIME RESERVES AS ONE OF THE PLANNING AND CONTROL PROBLEMS . . . . . 45

**Troyanovskiy V.M., Zapevalina A.A., Rumyantseva E.L., Serdyuk O.A.**

Probabilistic characteristics of time parameters for business processes planning and implementation stages are considered. It is shown that the sum of planned time reserves has the close to normal probability distribution, even at fairly short chain of works. It is also shown that unspent time reserves have a probability distribution that is close to truncated normal distribution. A method of evaluating time reserves distribution at a final stage of work is suggested. It is noted that results verification is conducted through comparison of obtained theoretical results of time reserves distribution with the real process of letters passage to the regions.

**Keywords:** control problems, chain of works, statistical criteria, probabilistic characteristics, computer modeling.

## TARGET OBJECTS ENERGY AND RESOURCES SUPPLY BLOCKING IN NETWORK INFRASTRUCTURES . . . . . 52

**Grebenyuk G.G., Nikishov S.M.**

Considered is the security problem of target objects, obtaining the energy or resources from network infrastructure, subjected to negative impact on network components, breaking connections between special-purpose objects and energy or resources supplies. Known approaches to network stability problem solution are described. Analyzed are features of the task of finding damaged network components, resulting to the special-purpose objects group functionality loss, ways of its solution are suggested as well as the approaches to calculations optimization. A particular example of using the damage search algorithm is given.

**Keywords:** vulnerability, network infrastructure, reliability of power supply.

## PROBLEMS OF PROGRAMMABILITY, SECURITY AND RELIABILITY OF DISTRIBUTED COMPUTING AND NETWORK-CENTRIC CONTROL. PART 2: THE APPROACH TO GENERAL SOLUTION . . . . . 58

**Zatuliveter Yu.S., Fishchenko E.A.**

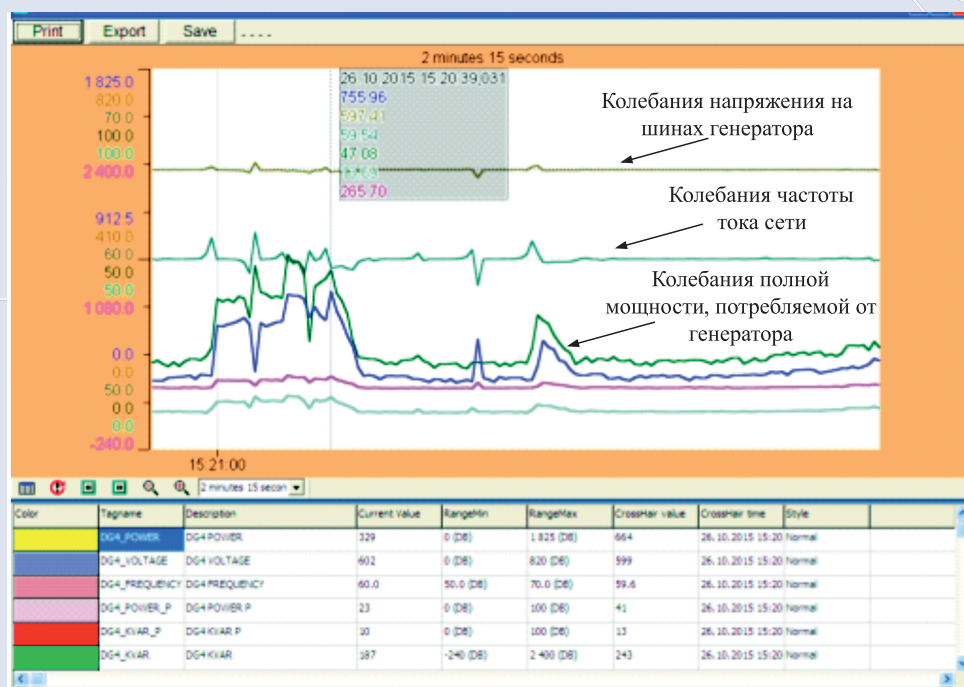
In the global computer environment stated are the principles of forming the mathematically uniform, seamlessly programmable and cybersecure algorithmic space of the distributed computing and network-centric management, based on tree-like structures computer calculation. The properties of seamless programming language in this space are presented, as well as the principles of software-based organization of reliable distributed computing in computer environments with unreliable components. Defined are the requirements to the network computers with the non-microprocessor architecture, which are necessary for the effective and cybersecure implementation of given algorithmic space in the global computer environment.

**Keywords:** global computer environment, powerful global information connectivity, distributed computing, network-centric control, computer calculation of tree-like structures, mathematically uniform algorithmic space, seamless programming, cybersecurity, reliable computing in environments with unreliable components.

**Stanislav Nikolaevich Vasil'ev (to the 70-th anniversary) . . . . . 70**

## THE 8<sup>TH</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE «MANAGEMENT OF LARGE-SCALE SYSTEM DEVELOPMENT» . . . . . 72

**Рисунки к статье А.П. Ныркова, А.А. Жиленкова, С.Г. Черного**  
**«МОДЕЛИ МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ**  
**СТАБИЛИЗАЦИИ ПОТОКОВ МОЩНОСТИ В АВТОНОМНЫХ**  
**ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»**  
**(см. с. 22 – 28)**



а



б

**Рис. 1. Основные параметры электроэнергии АЭЭС буровой платформы при спуско-подъемных операциях:**  
 а – межкоммутационный интервал 2 мин; б – межкоммутационный интервал 25 мин



