



## Содержание

### Редакционный совет:

- В. М. Кутузов*  
(председатель)  
*М. Ю. Шестопалов*  
(заместитель председателя)  
*В. А. Мейев*  
(ответственный секретарь)  
*В. Н. Мальшев*  
("Радиоэлектроника  
и телекоммуникации")  
*А. В. Соломонов*  
("Физика твердого тела  
и электроника")  
*М. С. Курпьянов*  
("Информатика, управление  
и компьютерные технологии")  
*В. В. Путов*  
("Автоматизация  
и управление")  
*Г. И. Прокофьев*  
("Электротехника")  
*Ю. В. Филатов*  
("Приборостроение  
и информационные  
технологии")  
*В. В. Шаповалов*  
("Биотехнические системы  
в медицине и экологии")  
*С. А. Степанов*  
("Управление качеством,  
инновационный  
и антикризисный менеджмент")  
*О. Ю. Маркова*  
("Гуманитарные науки")  
*О. Г. Вендик*  
("История науки,  
образования и техники")  
*Н. В. Лысенко*  
("Современные технологии  
в образовании")

\* \* \*

197376, Санкт-Петербург,  
ул. Проф. Попова, 5  
СПбГЭТУ "ЛЭТИ"  
Тел.: (812) 234-02-23

### РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

- Соловьева Е. Б., Зубарев А. В.* Синтез компенсатора методом расщепления для линеаризации модели Вольтерры канала связи ..... 3  
*Задорожный А. И., Вендик О. Г., Парнес М. Д., Тихонов С. К.* Аналоговый фазовращатель с-диапазона по технологии автоматизированного поверхностного монтажа ..... 7

### ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА И ЭЛЕКТРОНИКА

- Богачев Ю. В., Марченко Я. Ю., Николаев Б. П.* Исследования ЯМР контрастирующих свойств суперпарамагнитных наночастиц оксида железа ..... 10  
*Калинин Б. В., Ламкин И. А., Тарасов С. А.* Моделирование вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик DHFET на основе гетероструктур AlGaIn/GaN ..... 16

### ИНФОРМАТИКА, УПРАВЛЕНИЕ И КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Молдовян Н. А., Аль-Рахми Р. Я.* Подходы к синтезу алгебраических блочных шифров ..... 21  
*Чертовской В. Д., Цехановский В. В., Фролов С. А.* Моделирование процесса планирования технологической производственной линии ... 27  
*Бурков Е. А., Соколов В. Н.* Построение иерархической структуры показателей качества тренажерно-обучающих систем ..... 32  
*Падерно П. И., Смирнов А. В.* Оценка безошибочности выполнения фрагментов алгоритмов при различных видах ошибок ... 38  
*Аль-Таяр Б. А., Музанна М. М., Яковлев С. А.* Оценка эффективности сетей доставки контента ..... 45  
*Григорьев Ю. Д., Нгуен Хай Винь.* Планирование эксперимента как задача размещения объектов ..... 50

### АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ

- Путов В. В., Шелудько В. Н., Чьен Н. К.* Сравнительное исследование не прямых и прямых адаптивных систем с параметрической настройкой и мажорирующими функциями для управления двухмассовым нелинейным упругим электромеханическим объектом ..... 58

### ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

- Агандеев П. О., Прокофьев Г. И.* Математическая модель параллельно работающих гидроагрегатов ..... 66

### ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Вьюгинова А. А.* Моделирование двумерных ультразвуковых технологических волноводов ..... 72  
*Боронахин А. М., Лукомский Ю. А., Шпекторов А. Г., Тханг Ха Мань, Дык Чан Танг.* Обоснование требований к системам навигации и ориентации при решении задач управления движением подвижных объектов ..... 77

**БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ  
В МЕДИЦИНЕ И ЭКОЛОГИИ**

- Даровских С. Н., Попечителей Е. П.* Некоторые аспекты механизмов информационной физиотерапии ..... 81
- Безгодков Ю. А., Ауди К., Дмитриевич Г. Д., Кормилицын О. П., Марков М. М.* Исследование и моделирование биомеханических процессов в тазобедренных суставах ..... 88

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ**

- Давидюк С. Ф., Давидюк Е. П., Кутузова Е. С.* Использование информационных технологий в контексте контроля качества дистанционного образования ..... 92

**УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ, ИННОВАЦИОННЫЙ  
И АНТИКРИЗИСНЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ**

- Сулейманкадиева А. Э.* Взаимосвязь системы непрерывного образования, научной системы и системы реальной экономики в условиях экономики знаний ..... 98

**ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ**

- Склярова А. М.* Социально-психологический аспект роли денег в современном обществе ..... 106

**ИСТОРИЯ НАУКИ, ОБРАЗОВАНИЯ И ТЕХНИКИ**

- Золотинкина Л. И., Николаева Л. Н.* Музейный комплекс СПбГЭТУ "ЛЭТИ" ..... 112
- Сведения об авторах* ..... 120
- Правила представления рукописей авторами* ..... 125

**Учредитель:**

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)»  
197376, Санкт-Петербург,  
ул. Проф. Попова, 5  
Тел.: (812) 346-44-87  
Факс: (812) 346-27-58

**Свидетельство о регистрации**

ПИ № ФС2-8390  
от 04.12.2006 г. выдано  
Управлением Федеральной службы по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия по Северо-Западному федеральному округу

\* \* \*

**Редакторы:**

*Э. К. Долгатов, Н. В. Лукина,  
Т. А. Лунаева, И. Г. Скачек*  
Комп. верстка:  
*Е. Н. Паздниковой,  
М. В. Егоровой, А. А. Веселова*

Подписано в печать 02.03.12.

Формат 60×84 1/8.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Гарнитура "Times New Roman".

Печ. л. 16,0.

Тираж 300 экз. (1-й завод 1–110 экз.)

Заказ 11.

**Издательство СПбГЭТУ "ЛЭТИ"**

197376, Санкт-Петербург,

ул. Проф. Попова, 5

Тел.: (812) 346-45-23

Факс: (812) 346-28-56

**ПОДПИСНОЙ ИНДЕКС 45821 ПО ОБЪЕДИНЕННОМУ КАТАЛОГУ  
"ПРЕССА РОССИИ". ТОМ 1 "ГАЗЕТЫ И ЖУРНАЛЫ"**

Подписка производится в любом почтовом отделении России

*Журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (решение Президиума Высшей аттестационной комиссии Минобрнауки России от 19 февраля 2010 года № 6/6)*



УДК 621.396.4

*Е. Б. Соловьева, А. В. Зубарев*

## СИНТЕЗ КОМПЕНСАТОРА МЕТОДОМ РАСЩЕПЛЕНИЯ ДЛЯ ЛИНЕАРИЗАЦИИ МОДЕЛИ ВОЛЬТЕРРЫ КАНАЛА СВЯЗИ

*Рассмотрена модель компенсатора в виде многочлена расщепленных сигналов для подавления нелинейных искажений в цифровом канале связи. Линеаризована модель Вольтерры канала связи. Исследовано влияние гауссовского шума на точность нелинейной компенсации.*

**Нелинейная компенсация, нелинейный оператор, нелинейная модель, метод расщепления, канал связи**

Основным источником нелинейных искажений в канале связи (КС) является усилитель мощности, который обладает ограниченной пиковой мощностью и становится нелинейным при достижении насыщения в режиме работы с высоким КПД. Безынерционная нелинейность усилителя мощности и элементы задержки, входящие в состав полосовых фильтров, формируют нелинейную динамическую модель КС [1], [2]. В нелинейных КС наблюдаются:

- комбинационные и интермодуляционные искажения;
- расширение спектра комбинационных искажений;
- подавление полезного сигнала.

Для борьбы с указанными негативными процессами применяется нелинейный компенсатор (НК), синтезируемый на основе операторного подхода [3]–[6].

Задачу синтеза модели НК сформулируем следующим образом. Пусть нелинейный оператор  $H$  устанавливает однозначное соответствие между множествами комплексной огибающей  $x(n)$  ( $n$  – нормированное дискретное время) входного и комплексной огибающей  $y(n)$  искаженного выходного сигналов КС. Необходимо построить оператор  $F$  НК для подавления нелинейных искажений сигналов. Каскадное соединение КС и НК образует результирующую систему (рис. 1), описываемую операторным уравнением

$$\tilde{x}(n) = F[y(n)] = F[H[x(n)]] \approx x(n).$$

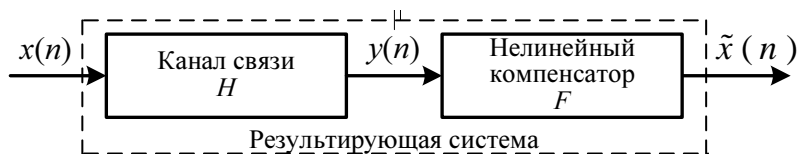


Рис. 1

Низкочастотная модель цифрового КС имеет вид отрезка ряда Вольтерры [7]

$$y(n) = \sum_{k=1}^P \sum_{i_1=0}^{I_1} \sum_{i_2=0}^{I_2} \dots \sum_{i_k=0}^{I_k} \sum_{i_{k+1}=0}^{I_{k+1}} \dots \sum_{i_{2k-1}=0}^{I_{2k-1}} h_{2k-1}(i_1, i_2, \dots, i_k, i_{k+1}, \dots, i_{2k-1}) \times \\ \times x(n-i_1) x(n-i_2) \dots x(n-i_k) x^*(n-i_{k+1}) \dots x^*(n-i_{2k-1}), \quad (1)$$

где  $h_{2k-1}(i_1, i_2, \dots, i_k, i_{k+1}, \dots, i_{2k-1})$  – ядро Вольтерры  $(2k-1)$ -го порядка ( $(2k-1)$ -мерная импульсная характеристика);  $*$  – знак комплексного сопряжения.

Модель Вольтерры (1) дает аналитическую форму выходного сигнала КС с отдельным описанием степенных составляющих, каждая из которых связана с воздействием и параметрами КС.

Для моделирования НК используем теорию расщепления сигналов [6]. Согласно данной теории оператор НК представляется композицией двух операторов: оператора расщепителя  $F_p$  и оператора  $F_N$  нелинейного безынерционного преобразователя (НБП).

Блок-схема модели НК изображена на рис. 2.

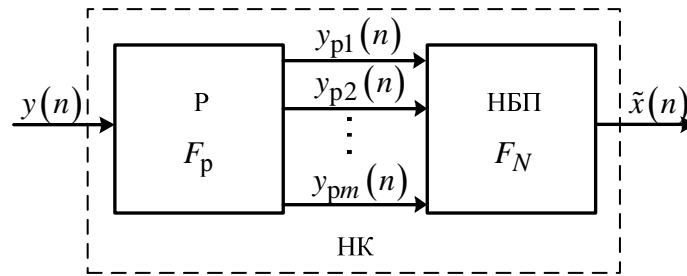


Рис. 2

Оператор  $F_p$  расщепителя преобразует скалярный выходной сигнал  $y(n)$  КС в векторный сигнал

$$y_p(n) = F_p [y(n)] = [y_{p1}(n), y_{p2}(n), \dots, y_{pm}(n)]^T$$

( $T$  – знак транспонирования) таким образом, чтобы векторные сигналы не пересекались, не касались и не обращались в ноль на множестве их определения.

Известно, что для модели (1) КС расщепитель в НК можно реализовать как линию задержки с числом элементов, равным длине памяти линейной составляющей модели (1) ( $I_1$ ) [7].

Оператор  $F_N$  НБП отображает векторный сигнал  $y_p(n)$  в скалярный сигнал  $\tilde{x}(n)$ .

Для описания оператора  $F_N$  используем многомерный многочлен

$$\tilde{x}(n) = \sum_{k=1}^P \sum_{i_1=0}^{I_1} \sum_{i_2=0}^{I_2} \dots \sum_{i_k=0}^{I_k} \sum_{i_{k+1}=0}^{I_{k+1}} \dots \sum_{i_{2k-1}=0}^{I_{2k-1}} c_{2k-1}(i_1, i_2, \dots, i_k, i_{k+1}, \dots, i_{2k-1}) \times \\ \times y(n-i_1) y(n-i_2) \dots y(n-i_k) y^*(n-i_{k+1}) \dots y^*(n-i_{2k-1}), \quad (2)$$

где  $c(i_1, i_2, \dots, i_m)$  – многомерная комплексная импульсная характеристика НК.

Выражение (2) является нелинейной низкочастотной моделью компенсатора.

Параметры модели (2) НК находятся в результате решения задачи аппроксимации

$$\|x(n) - \tilde{x}(n)\| \rightarrow \min_{\tilde{c}}$$

в среднеквадратичной метрике.

На основе метода расщепления синтезирован компенсатор для борьбы с нелинейными искажениями сигналов в цифровом спутниковом КС со следующими параметрами в модели Вольтерры (1) [8]:  $h_1(0) = 1,22 + j0,646$ ;  $h_1(1) = 0,063 - j0,001$ ;  $h_1(2) = -0,024 - j0,014$ ;  $h_1(3) = 0,036 + j0,031$ ;  $h_3(0,0,2) = 0,039 - j0,022$ ;  $h_3(3,3,0) = 0,018 - j0,018$ ;  $h_3(0,0,1) = 0,035 - j0,035$ ;  $h_3(0,0,3) = -0,040 - j0,009$ ;  $h_3(1,1,0) = -0,01 - j0,017$ ;  $h_5(0,0,0,1,1) = 0,039 - j0,022$ .

Расщепитель НК реализован в виде линии задержки с тремя элементами ( $I_1 = 3$  в выражении (1)), а модель НК – многочлен (2) с  $I_1 = 3$ .

Нелинейная компенсация выполнена при 16-позиционном фазомодулированном сигнале (16PSK) и 64-позиционном сигнале с квадратурной амплитудной модуляцией (64QAM).

Качество компенсации оценивалось с помощью среднеквадратичной погрешности

$$\varepsilon = \frac{1}{Q - Q_n} \sqrt{\sum_{n=Q_n}^Q |\tilde{x}(n) - x(n)|^2}$$

при  $Q_n = 7$ ,  $Q = 5000$ .

Результаты компенсации представлены в таблице, где указаны значения  $\varepsilon$  при разной степени нелинейности модели НК, а также на рис. 3, а, б, где изображены зависимости  $\varepsilon(SNR)$  при действии в КС гауссовского шума и 16PSK-, 64QAM-входных сигналах соответственно.  $SNR$  – отношение сигнал/шум в децибелах, вычисляемое по формуле

$$SNR = 20 \lg \left( \sqrt{\sum_{n=Q_n}^Q |y(n)|^2} / \sqrt{\sum_{n=Q_n}^Q |\xi(n)|^2} \right),$$

где  $y(n)$  – низкочастотный комплексный выходной сигнал КС, формируемый моделью Вольтерры (1);  $\xi(n)$  – узкополосный комплексный гауссовский процесс. На рис. 3, а, б кривые 1 получены при линейной компенсации, кривые 2, 3 – при нелинейной компенсации 3-й и 5-й степеней соответственно.

Таблица 1

Входной сигнал КС	Линейная модель	Нелинейная модель	
		3-й степени	5-й степени
16PSK	$120,14 \cdot 10^{-5}$	$34,73 \cdot 10^{-5}$	$12,21 \cdot 10^{-5}$
64QAM	$35,75 \cdot 10^{-5}$	$10,37 \cdot 10^{-5}$	$5,01 \cdot 10^{-5}$

Как показывает анализ результатов компенсации, с увеличением степени НК погрешность компенсации уменьшается (достигает наименьшего значения при НК 5-й степени). Данный вывод справедлив при действии гауссовского шума в КС.

Таким образом, на основе теории расщепления сформирована низкочастотная полиномиальная модель НК для борьбы с нелинейными искажениями сигналов в цифровом КС, описываемом отрезком ряда Вольтерры. Достоинства предложенной модели по сравнению с моделями-аналогами (функциональным рядом Вольтерры, нейронными сетями) заключаются в следующем:

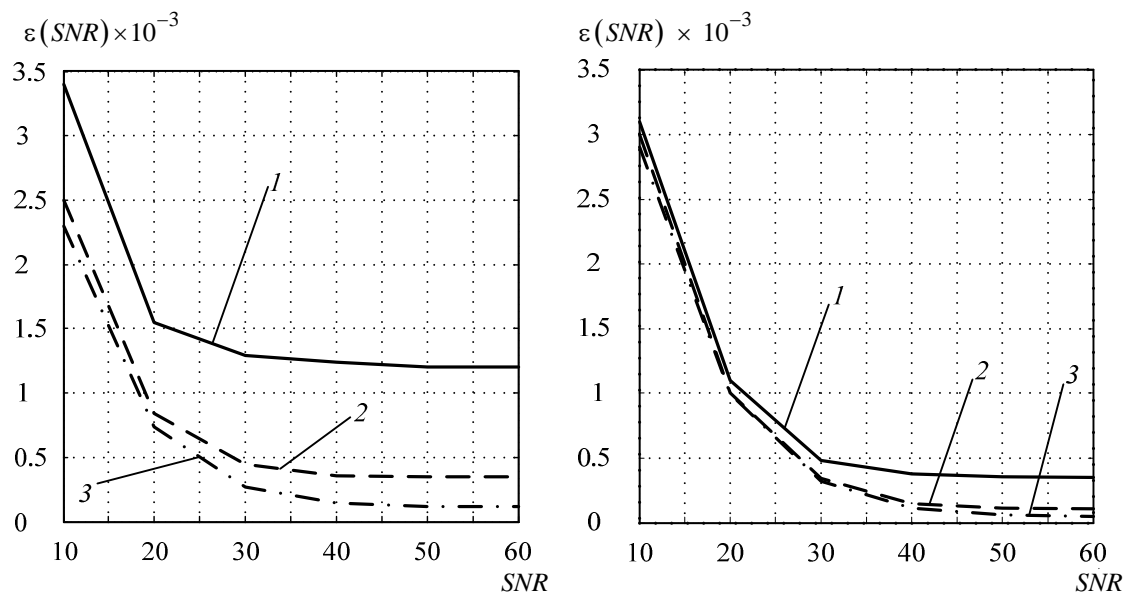


Рис. 3

При использовании многочлена расщепленных сигналов отсутствует проблема сходимости к решению задачи аппроксимации. Указанная проблема характерна для ряда Вольтерры (область применения ряда ограничена слабо нелинейным режимом работы).

Предложенная полиномиальная модель НК содержит линейно входящие параметры, поэтому решение задачи аппроксимации является глобальным оптимумом. Нейронные сети как универсальные аппроксиматоры с нелинейно входящими параметрами дают множество локальных оптимумов.

Полиномиальная модель НК адаптирована к классу входных сигналов, поскольку внутренний расщепитель строится на заданном классе воздействий. В результате предложенная модель является более простой (на заданном классе сигналов) по сравнению с функциональным рядом Вольтерры.

Полиномиальная модель НК применена для линеаризации усеченного ряда Вольтерры, описывающего цифровой КС. Воздействиями в КС являлись сигналы с фазовой и квадратурной амплитудной модуляциями (16PSK-и 64QAM-сигналы).

В процессе исследований при указанных воздействиях показано:

- точность компенсации нелинейных искажений сигналов в КС повышается с увеличением степени полиномиальной модели НК;
- указанное свойство сохраняется при действии в КС гауссовского шума с SNR из диапазона [10, 60] дБ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Пер. с англ. М.: Издательский дом "Вильямс", 2007.
2. Волков Л. Н., Немировский М. С., Шинаков Ю. С. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики. М.: Эко-Трендз, 2005.
3. Пупков К. А., Капалин В. И., Ющенко А. С. Функциональные ряды в теории нелинейных систем. М.: Наука, 1976.
4. Данилов Л. В. Ряды Вольтерра-Пикара в теории нелинейных электрических цепей. М.: Радио и связь, 1987.
5. Mathews V. J., Sicuranza G. L. Polynomial signal processing. N. Y.: John Wiley & Sons, 2000.
6. Ланнэ А. А. Нелинейные динамические системы: синтез, оптимизация, идентификация. Л.: ВАС, 1985.
7. Соловьева Е. Б. Компенсация нелинейных искажений сигналов в каналах связи методом расщепления // Цифровая обработка сигналов. 2005. № 4. С. 2–8.

8. Benedetto S., Biglieri E., Daffara R. Modeling and performance evaluation of nonlinear satellite links – a Volterra series approach // IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems. 1979. Vol.15, № 4. P. 494–506.

E. B. Solovyeva, A. V. Zubarev

#### COMPENSATOR SYNTHESIS BY SPLIT METHOD FOR LINEARIZATION OF COMMUNICATION CHANNEL VOLTERRA MODEL

*The compensator model is described as the polynomial with split signals for nonlinear distortion compensation in digital communication channel. The Volterra model of the communication channel is linearized. The influence of Gaussian noise on the accuracy of nonlinear compensation is investigated.*

**Nonlinear compensation, nonlinear operator, nonlinear model, split method, communication channel**

УДК 621.372.852.29

**А. И. Задорожный, О. Г. Вендик,  
М. Д. Парнес, С. К. Тихонов**

### **АНАЛОГОВЫЙ ФАЗОВРАЩАТЕЛЬ С-ДИАПАЗОНА ПО ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПОВЕРХНОСТНОГО МОНТАЖА**

*Описан аналоговый фазовращатель на полупроводниковых варикапах с фазовым сдвигом  $0...360^\circ$  и шириной полосы рабочих частот 8 %. Рассмотрена специальная схема трансформации волновых сопротивлений, позволившая использовать варикапы с достаточно низкой добротностью. Полученное значение модуляции амплитуды в различных фазовых состояниях является приемлемым. Фазовращатель предназначен для работы в составе фазированной антенной решетки (ФАР).*

**Радар, фазированная антенная решетка, электронное сканирование, фазовращатель, поверхностный монтаж, варикап**

Современные радиолокаторы и системы связи требуют не только технического совершенствования устройств, повышения их надежности и технологичности – немаловажен фактор стоимости и конкурентоспособности. Один из путей достижения этих целей – применение дешевых комплектующих и автоматизация процесса монтажа, что, в свою очередь, приводит к необходимости использования новых схемотехнических решений при проектировании устройств.

Аналоговые фазовращатели в составе ФАР имеют ряд преимуществ по сравнению с дискретными [1], [2]. В дискретных фазовращателях фазовые сдвиги больше  $180^\circ$  получают сложением фазовых сдвигов нескольких младших разрядов, соответственно их фазовые ошибки складываются. Таким образом, суммарная фазовая ошибка может достигать  $\pm 20...25^\circ$ . В аналоговых фазовращателях эта

ошибка может быть существенно уменьшена. Кроме того, поскольку в аналоговом фазовращателе вносимый фазовый сдвиг является непрерывной функцией управляющего напряжения, с помощью микроконтроллеров можно реализовать схему с индивидуальным управлением каждым фазовращателем. В каждый из микроконтроллеров занесена информация о том, какое напряжение необходимо подать на управляющий элемент, чтобы данный фазовраща-

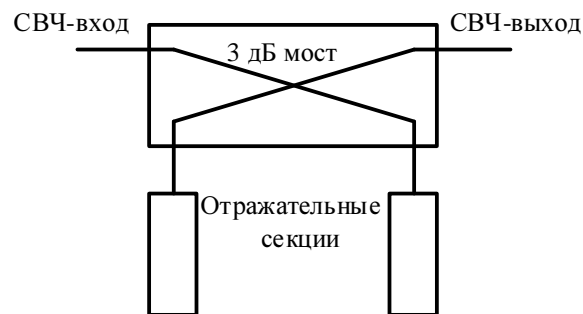


Рис. 1

тель на данной частоте вносил требуемый фазовый сдвиг. Сигналом управления в таком случае является цифровой код частоты и фазового состояния, подаваемый на целую группу фазовращателей. Это позволит свести фазовую ошибку к минимуму. В микроконтроллер также может быть внесена информация об изменении фазового сдвига в зависимости от температуры.

Для создания проходного фазовращателя выбрана схема с двумя отражательными фазовращателями, подключенными к плечам гибридного моста [3], [4] (рис. 1). При этом авторы отказались от классической схемы из двух последовательно включенных каскадов, сдвигающих фазу на  $180^\circ$  каждый, из-за большого значения модуляции амплитуды, так как резонансный минимум коэффициента передачи такого фазовращателя проходит через область рабочих частот при изменении управляющего напряжения. При невысоких значениях добротности варикапов этот минимум достаточно глубок. Вместо двух последовательно включенных каскадов, сдвигающих фазу на  $180^\circ$  каждый, была предложена схема отражательной секции (рис. 2), которая обеспечивает фазовый сдвиг  $0...360^\circ$  с помощью одного каскада, при этом ключевым моментом проектирования является минимизация модуляции амплитуды отраженной волны в различных фазовых состояниях.

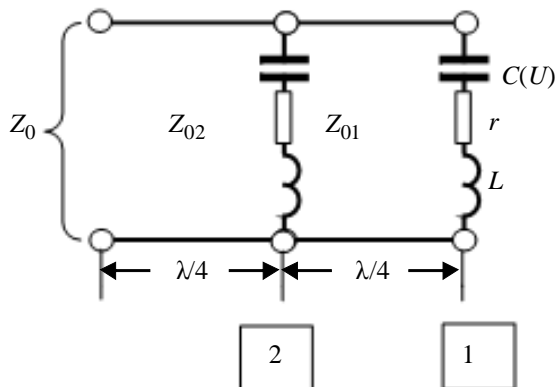


Рис. 2

Как видно из рис. 2, кроме двух резонансных контуров отражательная секция содержит 2 четвертьволновых трансформатора. Первый трансформатор с волновым сопротивлением  $Z_{01}$  обеспечивает диапазон управления фазой от  $0$  до  $360^\circ$ , а второй трансформатор с сопротивлением  $Z_{02}$  служит для преобразования входного сопротивления по отношению к сопротивлению подводящей линии  $Z_0 = 50$  Ом. При этом коэффициент отражения на входе секции максимален, что обеспечивает доста-

точно малые потери отраженной волны и, в конечном счете, позволяет уменьшить модуляцию амплитуды. В данном фазовращателе использовались варикапы с диапазоном емкостей  $1,6...0,4$  пФ, коэффициент перекрытия 4. Последовательное сопротивление  $r$ , определяющее добротность варикапа, равно  $2,1$  Ом.

Данная схема была промоделирована и скорректирована с учетом отличий схемотехнического расчета от реальной электродинамической конструкции, как-то: мест соединений полосковых линий разной ширины, распределенной индуктивности, металлизированных отверстий и т. п. Результаты компьютерного моделирования приведены на рис. 3 и 4.

В ходе работы был спроектирован, изготовлен и испытан аналоговый фазовращатель с управляемым фазовым сдвигом  $0...360^\circ$ , средним уровнем потерь  $5,5$  дБ и модуляцией амплитуды волны не более  $\pm 0,8$  дБ. Измеренные фазовые и амплитудные характеристики макета, изготовленного на органической фольгированной подложке Taconic RF-60A, приведены на рис. 5 и 6 соответственно. Полученные параметры приемлемы для работы фазовращателя в составе фазированной антенной решетки.



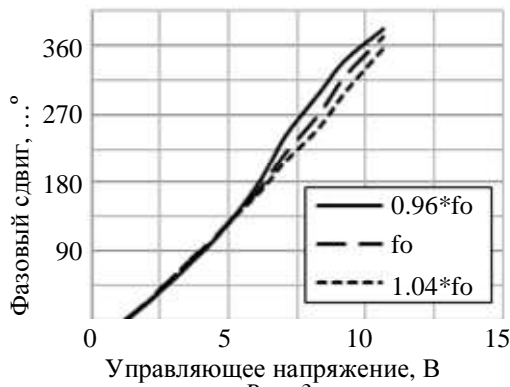


Рис. 3

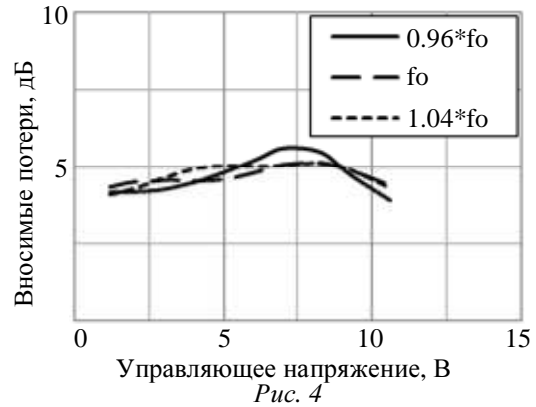


Рис. 4

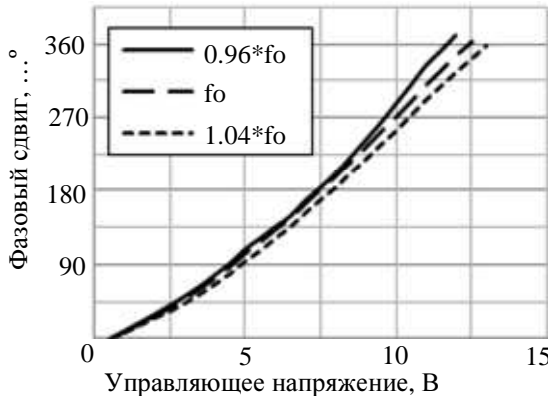


Рис. 5

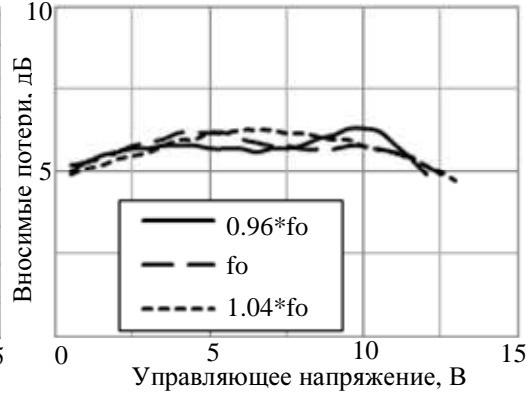


Рис. 6

Достаточно невысокая стоимость использованных варикапов делает его коммерчески конкурентоспособным. Фотография макета фазовращателя приведена на рис. 7. Найденные схемотехнические решения могут быть использованы для проектирования модуля на основе твердотельной полупроводниковой технологии ММІС. На данный момент фазовращатель, дополненный малошумящим усилителем и устройством защиты приемника, внедрен в серийное производство в составе модуля полуактивной фазированной антенной решетки по технологии поверхностного монтажа SMD.

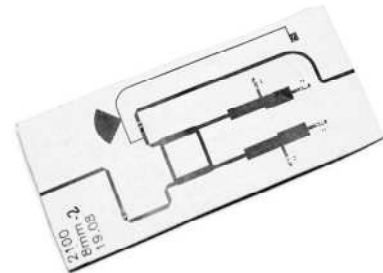


Рис. 7

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

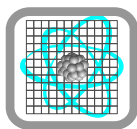
1. Хижа Г. С., Вендик И. Б., Серебрякова Е. А. СВЧ-фазовращатели и переключатели. М.: Радио и связь, 1984.
2. Вендик О. Г., Парнес М. Д. Антенны с электрическим сканированием (Введение в теорию) / под ред. Л. Д. Бахраха. М.: Сайнс-Пресс, 2002.
3. A Low-Cost Ultra Low Profile Phased Array System for Mobile Satellite Reception Using Zero-Knowledge Beamforming Algorithm. / P. Mousavi, Mo. Fakharzadeh, S. Hamidreza Jamali et al. // IEEE transactions on antennas and propagation. 2008. Vol. 56, №.12.
4. Малорацкий Л. Г. Микроминиатюризация элементов и устройств СВЧ. М.: Сов. радио, 1976.

A. I. Zadorozhnyy, O. G. Vendik, M. D. Parnes, S. K. Tikhonov

### C-BAND ANALOG PHASE SHIFTER BASED ON SMD TECHNOLOGY

*To achieve a moderate insertion loss level, low cost, and low profile, an analogue phase-shifter has been designed. The phase shifter based on varactor diodes operates in C-band providing phase shift 0...360°. To realize a low value of amplitude modulation for different phase states, the two-stage scheme of impedance transformation was used. This approach is acceptable by using low Q-factor diodes.*

**Radar, phased array antenna, electronic steering, phase shifter, SMD, varactor**



УДК 537.611.43

Ю. В. Богачев, Я. Ю. Марченко, Б. П. Николаев

## ИССЛЕДОВАНИЯ ЯМР КОНТРАСТИРУЮЩИХ СВОЙСТВ СУПЕРПАРАМАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА ЖЕЛЕЗА

*Приведены результаты исследований ЯМР контрастирующих свойств суперпарамагнитных наночастиц оксида железа в средах, моделирующих условия диагностики МРТ организма. Определены релаксационные эффективности  $r_i$  наночастиц оксида железа в дистиллированной воде и системах «биополимер – вода» в высоком и низком магнитном полях. Получены данные об усилении негативного контрастирующего действия наночастиц оксида железа в модельных средах биологических жидкостей и гелевых структур тканей.*

**Магнитно-резонансная томография (МРТ), времена релаксации, суперпарамагнитные наночастицы оксида железа, контраст магнитно-резонансных изображений, ядерный магнитный резонанс (ЯМР)**

Молекулярная магнитно-резонансная томография (МРТ) основывается на том, что специальные молекулы – маркеры служат источником контраста на изображениях. Контраст в МРТ является результатом различия в сигнале ядерного магнитного резонанса (ЯМР) от смежных пикселей или вокселей, интенсивность сигнала в наибольшей степени зависит от протонной плотности, времени спин-решеточной релаксации  $T_1$ , времени спин-спиновой релаксации  $T_2$  и времени эффективной поперечной релаксации  $T_2^*$  [1].

Так как  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_2^*$  являются основными параметрами контраста магнитно-резонансных (МР) изображений, именно эти параметры могут быть изменены специальным контрастирующим агентом. Суперпарамагнитные наночастицы оксида железа все чаще используются в разработке контрастирующих агентов МРТ из-за их сильного влияния на времена релаксации  $T_2$  и  $T_2^*$ . Дополнительный интерес представляет мониторинг магнитных наночастиц оксида железа методом МРТ при их включении в стволовые клетки, адресной доставке лекарств в опухоли, в сортировке клеток и ДНК [2], [3].

Целью исследований, результаты которых представлены в настоящей статье, являлась оптимизация требований, предъявляемых к условиям наблюдения оптимального контраста магнитно-резонансных изображений при использовании суперпарамагнитных наночастиц оксида железа путем моделирования внутренней среды организма человека модельными системами плазмы крови и полисахаридных гелей.

*Объекты исследований* – суперпарамагнитные наночастицы оксида железа в модельных средах: в дистиллированной воде; в 2 %-м геле «агар-агар» (смесь молекул воды и биомакромолекул полисахаридов агарозы и агаропектина); в водном растворе (50 г/л) альбумина (смесь воды и простых, растворимых в воде белков). В дальнейшем последние две смеси для упрощения иногда будем называть системой «биополимер – вода».

*Приборные средства измерений:* Фурье-спектрометр ЯМР СХР-300 (Брукер, Германия) с магнитным полем 7.1 Тл. Все измерения осуществлялись при комнатной температуре в стандартных стеклянных ампулах диаметром 5 мм без вращения. Для стабилизации поля использовали сигнал дейтериевого резонанса тяжелой воды.

Использовали ЯМР-релаксометр «Спин Трэк» с магнитным полем 0.33 Тл. Резонансная частота на ядрах протонов – 14 МГц.

Концентрация наночастиц оксида железа оценивалась по содержанию железа спектрофотометрическим методом в миллимолях на литр [ммоль/л].

*Параметры импульсных последовательностей для исследований in vitro.* Для получения  $^1\text{H}$  ЯМР-спектров использовалась одноимпульсная последовательность (длительность  $90^\circ$ -го импульса 0.5 мкс; длительность паузы между  $90^\circ$ -ми импульсами 3 с; количество повторений 8).

Для измерения  $T_1$  использовалась импульсная последовательность «инверсия–восстановление»  $180^\circ$ – $\tau$ – $90^\circ$  (длительность  $90^\circ$ -го импульса 4.6 мкс; длительность  $180^\circ$ -го импульса 9.2 мкс; длительность пауз между  $180^\circ$ -ми и  $90^\circ$ -ми импульсами: от 1 мкс до 10 с; экспериментальных точек 16; длительность паузы между  $180^\circ$ -ми импульсами 10 с).

Для измерения времени спин-спиновой релаксации  $T_2$  применяли модифицированную импульсную последовательность Карра–Парселла (длительность  $90^\circ$ -го импульса 4.6 мкс; длительность  $180^\circ$ -го импульса 9.2 мкс; эховремя от 1 мкс до 7 мс для разных образцов; 512 эхосигналов).

Скорость релаксации  $R_2^*$  вычислялась по ширине линии спектра ( $R_2^* = \pi\Delta\nu_{1/2}$ ), где  $\Delta\nu_{1/2}$  – ширина спектральной линии на половине высоты. Измерения проводились только на частоте 300 МГц, использовалась одноимпульсная последовательность (длительность  $90^\circ$ -го импульса 0.5 мкс, пауза между импульсами 3 с, количество накоплений от 4 до 32 в зависимости от уровня шумов).

**Экспериментальные результаты.** Все спектры протонного резонанса имели вид одиночной линии ЯМР воды. Изменения вида спектров при варьировании водных дисперсионных растворов касались только формы линии, которая полностью характеризовалась единственным параметром – шириной линии ЯМР на половине высоты.

Поскольку ширина линии ЯМР протонов воды пропорциональна скорости релаксации, то оптимальным для определения параметров контрастирующих свойств МР-изображений является изучение экспериментальных зависимостей скоростей релаксации протонов воды в зависимости от концентрации наночастиц в водном растворе.

Полученные экспериментальные значения скоростей релаксации  $R_2^*$ ,  $R_2$ ,  $R_1$  протонов в различных средах при разных концентрациях суперпарамагнитных наночастиц оксида железа представлены в табл. 1 (для частоты ЯМР 300 МГц) и табл. 2 (для частоты ЯМР 14 МГц).

Таблица 1

$C(Fe^{3+})$ , ммоль/л	2 %-й гель «агар-агар» с наночастицами оксида железа			Вода дистиллированная с наночастицами оксида железа			Водный раствор альбумина (50 г/л) с наночастицами оксида железа		
	$R_2^*$ , $c^{-1}$	$R_2$ , $c^{-1}$	$R_1$ , $c^{-1}$	$R_2^*$ , $c^{-1}$	$R_2$ , $c^{-1}$	$R_1$ , $c^{-1}$	$R_2^*$ , $c^{-1}$	$R_2$ , $c^{-1}$	$R_1$ , $c^{-1}$
0.5	$345 \pm 10$	$208 \pm 6$	$0.95 \pm 0.02$	$345 \pm 10$	$49 \pm 1$	$0.72 \pm 0.02$	$345 \pm 10$	$92 \pm 3$	$0.87 \pm 0.03$
1	$729 \pm 22$	$474 \pm 14$	$1.56 \pm 0.05$	$537 \pm 16$	$78 \pm 2$	$1.02 \pm 0.03$	$653 \pm 20$	$172 \pm 5$	$1.10 \pm 0.03$
2	$1341 \pm 40$	$870 \pm 26$	$2.5 \pm 0.1$	$691 \pm 21$	$126 \pm 4$	$1.69 \pm 0.05$	$1000 \pm 30$	$287 \pm 9$	$1.64 \pm 0.05$
3	$2148 \pm 64$	$1466 \pm 44$	$4.0 \pm 0.1$	$729 \pm 22$	$220 \pm 7$	$2.61 \pm 0.08$	$1303 \pm 40$	$459 \pm 14$	$2.47 \pm 0.07$
5	$3988 \pm 120$	$2564 \pm 77$	$6.9 \pm 0.2$	$1162 \pm 35$	$435 \pm 13$	$4.9 \pm 0.2$	$1815 \pm 54$	$788 \pm 24$	$4.2 \pm 0.1$
8	$5872 \pm 176$	$3636 \pm 109$	$9.7 \pm 0.3$	$1570 \pm 47$	$690 \pm 21$	$7.7 \pm 0.2$	$2490 \pm 75$	$1299 \pm 39$	$7.1 \pm 0.2$
10	$8356 \pm 250$	$5236 \pm 157$	$13.8 \pm 0.4$	$1840 \pm 55$	$841 \pm 25$	$10.8 \pm 0.3$	$3140 \pm 94$	$1613 \pm 48$	$8.9 \pm 0.3$

Таблица 2

$C(Fe^{3+})$ , ммоль/л	2 %-й гель «агар-агар» с наночастицами оксида железа		Вода дистиллированная с наночастицами оксида железа		Водный раствор альбумина (50 г/л) с наночастицами оксида железа	
	$R_2$ , $c^{-1}$	$R_1$ , $c^{-1}$	$R_2$ , $c^{-1}$	$R_1$ , $c^{-1}$	$R_2$ , $c^{-1}$	$R_1$ , $c^{-1}$
0.5	$184 \pm 6$	$17.5 \pm 0.5$	$8.3 \pm 0.2$	$0.76 \pm 0.02$	$99 \pm 3$	$12.7 \pm 0.4$
1	$385 \pm 12$	$39 \pm 1$	$15.4 \pm 0.5$	$2.83 \pm 0.08$	$166 \pm 5$	$18.7 \pm 0.6$
2	$700 \pm 21$	$66 \pm 2$	$78 \pm 2$	$7.9 \pm 0.2$	$284 \pm 7$	$42 \pm 1$
3	$1099 \pm 33$	$119 \pm 4$	$133 \pm 4$	$18.7 \pm 0.6$	$443 \pm 13$	$63 \pm 2$
5	$2000 \pm 60$	$200 \pm 6$	$222 \pm 7$	$41 \pm 1$	$746 \pm 22$	$100 \pm 3$
8	$2967 \pm 89$	$333 \pm 10$	$400 \pm 12$	$67 \pm 2$	$1247 \pm 37$	$172 \pm 5$
10	$4000 \pm 120$	$455 \pm 14$	$526 \pm 16$	$91 \pm 3$	$1605 \pm 48$	$213 \pm 6$

По результатам измерений были построены графики зависимости скоростей продольной  $R_1$  и поперечной  $R_2$  ядерной магнитной релаксации протонов воды от концентрации суперпарамагнитных наночастиц оксида железа в дистиллированной воде (рис. 1 и 2), в геле «агар-агар» (рис. 3 и 4), в растворе альбумина (рис. 5 и 6) для двух частот ЯМР: 300 и 14 МГц.

По результатам измерений были также построены графики зависимостей скорости эффективной спин-спиновой (поперечной)  $R_2^*$  ядерной магнитной релаксации протонов воды от концентрации суперпарамагнитных наночастиц оксида железа в дистиллированной воде, в геле «агар-агар» и в растворе альбумина (рис. 7) для частоты ЯМР 300 МГц.

Как видно из рис. 1–7, концентрационные зависимости соответствуют линейной зависимости общего вида  $R_i = r_i C + A$ , где  $C$  – концентрация магнитных наночастиц, ммоль/л;  $r_i$  – коэффициент релаксационной эффективности;  $A$  – константа, определяемая скоростью релаксации протонов воды в отсутствие суперпарамагнитных наночастиц. Анализ концентрационных зависимостей позволяет определить  $r_i$  как производную функции экспериментальной зависимости  $R_i = f(C)$  и вычислить этот коэффициент [л/(ммоль · с)] по соотношению  $r_i = 1/C \cdot T_i$ .

В результате проведенных исследований были определены релаксационные эффективности (релаксивности) суперпарамагнитных наночастиц оксида железа в дистиллированной воде, геле «агар-агар» и водном растворе альбумина (табл. 3).

Таблица 3

Релаксационные эффективности наночастиц оксида железа, л/(ммоль · с)	2 %-й гель «агар-агар»	Дистиллированная вода	Водный раствор альбумина, 50 г/л	Частота, МГц
$r_2^*$	$817 \pm 25$	$153 \pm 5$	$277 \pm 8$	300
$r_2$	$508 \pm 15$	$87 \pm 3$	$162 \pm 5$	
$r_1$	$1.30 \pm 0.04$	$1.05 \pm 0.03$	$0.86 \pm 0.03$	
$r_2$	$395 \pm 12$	$54 \pm 2$	$159 \pm 5$	14
$r_1$	$45 \pm 1$	$9.6 \pm 0.3$	$21.4 \pm 0.6$	

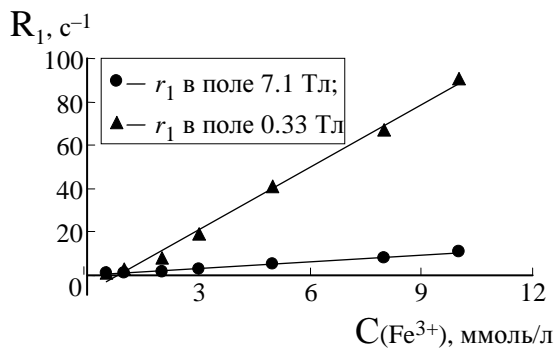


Рис. 1

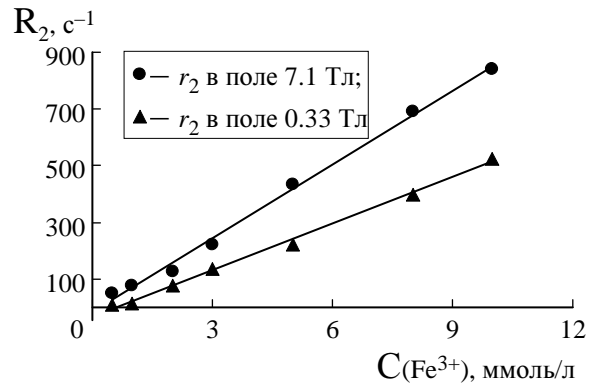


Рис. 2

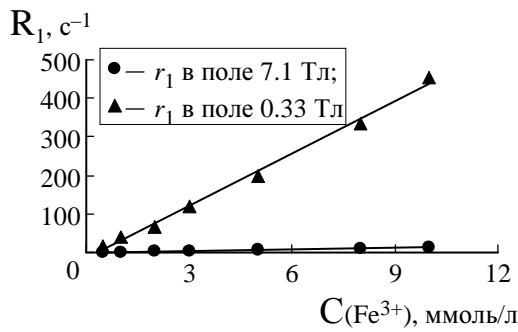


Рис. 3

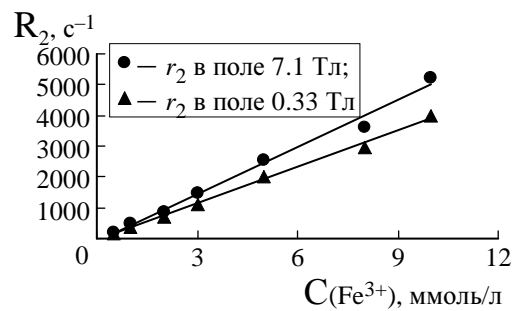


Рис. 4

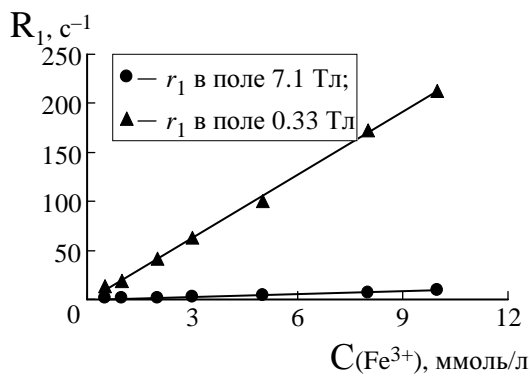


Рис. 5

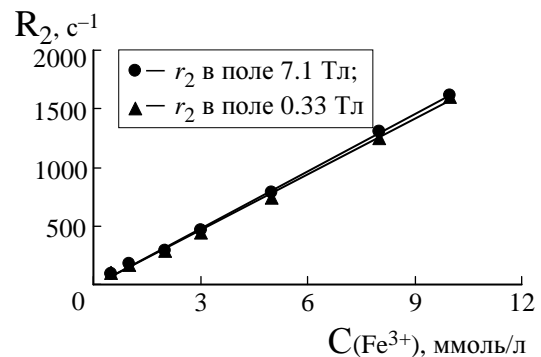


Рис. 6

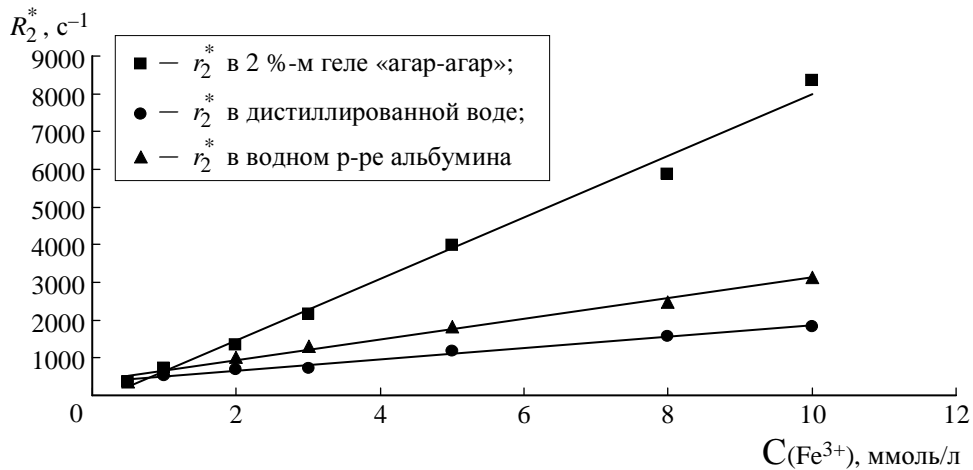


Рис. 7

Анализ данных табл. 3 показывает следующее:

– релаксационные эффективности  $r_1$  для суперпарамагнитных наночастиц оксида железа в дистиллированной воде и системах «биополимер – вода» повышаются в более низком магнитном поле, достигая наибольших значений  $r_1$  в геле «агар-агар». Вместе с тем абсолютные значения релаксационных  $r_1$  значительно меньше абсолютных значений релаксационных  $r_2$  и  $r_2^*$  для более высокого магнитного поля  $B_0$ , особенно в системах «биополимер – вода»;

– релаксационная эффективность  $r_2$  для суперпарамагнитных наночастиц оксида железа в дистиллированной воде и системах «биополимер – вода» наоборот уменьшается в более низком магнитном поле, хотя и незначительно;

– наибольшее абсолютное значение релаксационной эффективности зафиксировано для  $r_2^*$  в геле «агар-агар» в магнитном поле 7.1 Тл, что свидетельствует о наличии у суперпарамагнитных наночастиц оксида железа свойств  $T_2^*$  негативных контрастирующих агентов, которые усиливаются при повышении индукции магнитного поля  $B_0$ ;

– наночастицы оксида железа сильно сокращают времена релаксации  $T_2$  и  $T_2^*$  протонов систем «биополимер – вода» при одновременном слабом влиянии на  $T_1$ .

Измеренные значения коэффициентов релаксационной эффективности наночастиц оксида железа в целом соответствуют диапазону значений коммерческих контрастирующих препаратов суперпарамагнитной природы [4]. Сокращение времен магнитной релаксации протонов воды  $T_2$  и  $T_2^*$  в присутствии суперпарамагнитных наночастиц оксида железа объясняется ускоренной релаксацией спинов в неоднородном магнитном поле, индуцируемом магнитными моментами суперпарамагнитных наночастиц или их кластеров [5], [6]. Диффузия молекул воды возле магнитных центров приводит к усреднению локальных магнитных полей, испытываемых спином за время прецессии. В приближении полного диффузионного усреднения можно ожидать сильного отклонения соотношения времен релаксации  $T_2/T_1$  от 1 [7]. Данные табл. 1 свидетельствуют о выполнении условий  $T_2/T_1 > 1$  и  $T_2^* > T_2$ , что согласуется с механизмом неоднородного уширения линий за счет сильного искажения магнитного поля наночастицами. В соответствии с предполагаемым механизмом релаксационного действия наночастиц следует ожидать уменьшения релаксационной эффективности при уменьшении магнитного момента частиц и сужения области искажения магнитного поля возле центра за счет уменьшения зоны доступа протонов воды. Согласно современным представлениям коллоидная стабильность наночастиц оксида железа поддерживается адсорбцией поверхностных молекул [8]. Находясь в окружении молекул альбумина, магнитные наночастицы адсорбируют белок, что ведет к увеличению эффективного гидродинамического диаметра частицы и, следовательно, экранированию магнитного центра для сближения с молекулами воды. Экранирование магнитных наночастиц должно вызывать уменьшение релаксационной эффективности  $r_2$  [9], которое, однако, не наблюдалось в эксперименте. Для согласования результатов эксперимента с теоретическими ожиданиями следует предположить агрегацию первичных суперпарамагнитных наночастиц оксида железа в кластеры с большим суммарным магнитным моментом [10]. В этом случае при неизменности содержания наночастиц в суспензии (количество железа) происходит наблюдаемое ускорение спин-спиновой релаксации. По-видимому, сходные

процессы агрегации происходят также в геле «агар-агар» при взаимодействии с группами полисахарида. Формирование крупных ферритмагнитных кластеров в геле вызывает еще более сильные эффекты релаксационного уширения линии ЯМР воды.

Известно [1], что увеличение релаксационной эффективности магнитных наночастиц коррелирует с контрастирующей способностью препаратов на их основе в методе МРТ. Исследование модельных сред показывает, что попадание суперпарамагнитных наночастиц в плазму крови и их дальнейшая трансляция в цитоплазму клеток могут сопровождаться формированием кластеров, которые усиливают контраст визуализируемых томограмм тканей. Возрастание магнетизма на отдельных участках накопления оксида железа, однако, может вызывать артефактные искажения резонанса отдаленных вокселей, что нужно принимать во внимание для корректной неинвазивной диагностики МРТ. Первичные ЯМР томографические исследования мышечной ткани с введением суперпарамагнитных наночастиц оксида железа подтвердили справедливость сделанных заключений [11], [12].

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы» (государственный контракт № П1169 от 03.06.2010 г.).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ринк П. А. Магнитный резонанс в медицине. М.: ГЭОТАР-МЕД, 2003.
2. Bulte J. W. M., Kraitchman D. L. Iron oxide MR contrast agents for molecular and cellular imaging // *NMR in Biomedicine*. 2004. Vol. 17. P. 484–499.
3. Molecular imaging and targeted drug delivery with a novel, ligand-directed paramagnetic nanoparticle technology / G. M. Lanza, D. R. Abendschein, X. Yu et al. // *Acad Radiol*. 2002. Vol. 9. Suppl. 2. P. S330–S331.
4. Gupta A. K., Gupta M. Synthesis and surface engineering of iron oxide nanoparticles for biomedical applications // *Biomaterials*. 2005. Vol. 26. P. 3995–4021.
5. Brooks R. A. T(2)–shortening by strongly magnetized spheres: a chemical exchange model // *Magn. Reson. Med*. 2002. Vol. 47. P. 388–391.
6. Gillis P., Moiny F., Brooks R. A. On T(2)–shortening by strongly magnetized spheres: a partial refocusing model // *Magn. Reson. Med*. 2002. Vol. 47. P. 257–263.
7. Superparamagnetic colloid suspensions: water magnetic relaxation and clustering / A. Roch, Y. Gossuin, R. N. Muller, P. Gillis // *J. Magn. Mater*. 2005. Vol. 293. P. 532–539.
8. Cytokine adsorption/release on uniform magnetic nanoparticles for localized drug delivery / R. Mejias, R. Costo, A. G. Roca et al. // *J. of Controlled Release*. 2008. Vol. 130. P. 168–174.
9. De Haan H. W., Paquet C. Enhancement and Degradation of the R2 Relaxation Rate Resulting From the Encapsulation of magnetic Particles with Hydrophilic Coatings // *Magn. Reson. Med*. 2011. Vol. 66. P. 1759–1766.
10. Clusters of Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles Encapsulated in a Hydrogel: A Particle Architecture Generating a Synergistic Enhancement of the T2 Relaxation / C. Paquet, H. W. de Haan, D. M. Leek et al. // *ACS Nano*. 2011. Vol. 5, № 4. P. 3104–3112.
11. The study of magnetic porous glass microcarriers by NMR relaxometry analysis / Ya. Yu. Marchenko, B. P. Nikolaev, L. Yu. Yakovleva et al. // *B. of abstr. International Symposium and Summer School, June 27 – July 1, 2011. «Nuclear Magnetic Resonance in Condensed Matter» 8th meeting: «NMR in Life Sciences»*, Saint Petersburg, 2011.
12. Magnetic Cellulose Microbeads as effective relaxation agent for MRI contrast Enhancement / Ya. Yu. Marchenko, B. P. Nikolaev, L. Yu. Yakovleva et al. // *Euromar 2011 Magnetic Resonance Conference. The B. of Abstr. Göttingen: Guvillier Verlag, 2011. P. 241.*

*Yu. V. Bogachev, Ya. Yu. Marchenko, B. P. Nikolaev*

#### *CONTRAST PROPERTIES NMR INVESTIGATIONS OF SUPERPARAMAGNETIC FERRUM OXIDE NANOPARTICLES*

*The results of NMR research of contrast properties of superparamagnetic ferrum oxide nanoparticles in model MRI diagnostics samples are presented. Relaxation efficiencies of ferrum oxide nanoparticles are determined for distilled water and «biopolymer – water» systems in high and low magnetic fields. The data of negative contrast properties amplification are received for ferrum oxide nanoparticles in model biological liquids and gel tissue structures.*

**Magnetic Resonance Imaging (MRI), relaxation times, superparamagnetic ferrum oxide nanoparticles, magnetic resonance imaging contrast, Nuclear Magnetic Resonance (NMR)**

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛЬТ-ФАРАДНЫХ И ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК DHFET НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР AlGaN / GaN

*Проведено исследование и моделирование вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик транзистора с двойным ограничением двумерного электронного газа (DHFET), созданного на основе гетероструктур AlGaN / GaN. Показано, что разработанная модель позволяет проводить наиболее точный расчет характеристик транзисторов на гетероструктурах AlGaN и омических контактов к ним. Особенно высокое совпадение результатов моделирования и экспериментов наблюдается при напряжениях на затворе, близких к режиму отсечки. Погрешность проведенного расчета не превышает 5 %, в то время как для общепринятых методов анализа характеристик DHFET погрешность может составлять 200 % и более.*

### AlGaN, омический контакт, DHFET-транзистор, моделирование характеристик

В последние годы разрабатываются различные виды гетероструктур на основе переходов AlGaN / GaN. Одним из самых перспективных направлений является создание гетероструктур с двойным ограничением канала. В таких структурах отсутствуют недостатки их предшественников, такие как деградация гетероструктуры и коллапс тока. Последний эффект был обусловлен уменьшением тока стока под действием напряжения сток-исток, вызванным вылетом высокоэнергетичных электронов в нижние слои гетероструктуры. Введение второго барьера позволило избежать растекания тока из слоя, содержащего квантовую яму. Также срок службы транзисторов на основе таких структур значительно увеличен. На данный момент подтвержденный срок работы усилителей с подобными транзисторами составил 3000 ч.

Точность описания вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик (ВФХ и ВАХ соответственно) может значительно влиять на результаты расчётов различных нелинейных схем, в частности усилителей мощности. Используемые в настоящее время модели ВФХ, применяющие для расчёта схем методы гармонического баланса, представляют собой выражения для содержащегося в такой емкости заряда, зависящего от напряжения. Для емкости, нелинейно зависящей от приложенного напряжения, в общем виде можно написать следующее выражение:  $C = dq(V) / dV$ . В литературе предлагается несколько функций для аппроксимации такой зависимости. Модели, предложенные в работах [1]–[3], как будет показано далее, являются недостаточно точными при напряжениях, близких к напряжению отсечки. Проведенное моделирование позволило получить наиболее точные функции описания ВФХ и ВАХ транзисторов на основе гетероструктур AlGaN / GaN.

Исследуемые гетероструктуры были изготовлены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на SiC и сапфире. Размер контакта Шоттки составлял 70×100 мкм. Измерения проводились на пластине с помощью зондовой станции «Зонд-А5» и анализатора ВФХ HP4280B. В литературе предлагается несколько функций для аппроксимации такой зависимости. Модели, предложенные в работах [2], [3], являются недостаточно точными при напряжениях, близких к напряжению отсечки. Использование выражения, предложенного



в работе [2], может приводить погрешность до 300 %, а выражения, предложенного в работе [3], до 700 % в диапазонах напряжений, близких к отсечке. Это связано с использованием симметричной функции для описания области перегиба, в результате кривая в области напряжений вблизи отсечки расходится с экспериментальными данными. ВФХ транзистора на гетероструктурах AlGaN / GaN можно разделить на три области (рис. 1) в зависимости от характера поведения характеристики [1]. Таким образом, ёмкость такого конденсатора можно записать как:

$$C_{\Sigma} = C_1 + C_2 + C_3.$$

Область I обусловлена наличием между затвором и слоем 2DEG легированной области AlGaN с высокой концентрацией свободных носителей. При подаче отрицательного смещения на электрод с барьером Шотки толщина обедненного слоя увеличивается, следовательно, уменьшается ёмкость, которую можно аппроксимировать следующей функцией:

$$C_1 = C_{\text{AlGaN}} e^{\beta(V_{\text{gs}} - V_{\text{bi}})},$$

где  $C_{\text{AlGaN}}$  – ёмкость барьера при напряжении смещения, равном нулю;  $V_{\text{gs}}$  – напряжение смещения;  $V_{\text{bi}}$  – высота барьера Шотки;  $\beta$  – эмпирический коэффициент, связанный с профилем легирования слоя AlGaN.

При дальнейшем увеличении напряжения зависимость переходит в область II. Здесь ёмкость связана с глубиной залегания слоя 2DEG, т. е. возникает конденсатор, одной обкладкой которого служит электрод катода, а другой – слой двумерного электронного газа. При дальнейшем росте потенциала (вплоть до порогового) ёмкость перехода меняется незначительно, что объясняется искривлением зон в области гетероперехода. Поэтому за основу взято выражение, полученное в работе [3].

Для более точного описания примем:

$$C_2 = C_{2\text{DEG}} \frac{\left\{1 + \text{th} \left[ \delta_1 (V_{\text{gs}} - V_{\text{th}}) \right] \right\} \left\{1 + \text{th} \left[ \delta_2 (V_{\text{gs}} - V_{\text{th}}) \right] \right\}}{4} (1 + \alpha V_{\text{gs}}),$$

где  $C_{2\text{DEG}}$  – ёмкость, создаваемая двумерным электронным газом;  $V_{\text{th}}$  – напряжение отсечки;  $\delta_1$  и  $\delta_2$  – эмпирические коэффициенты, описывающие поведение двумерного электронного газа при напряжениях катода, близких к отсечке;  $\alpha$  – коэффициент, описывающий поведение ВФХ на пологой части характеристики и связанный с выдавливанием областью объёмного заряда свободных электронов с высокими энергиями из-под катодной области гетероперехода.

При подаче смещения больше напряжения отсечки наибольший вклад вносит ёмкость, связанная с геометрическими ёмкостями электродов и ёмкостью, создаваемой зарядом свободных носителей в объёме гетероструктуры:

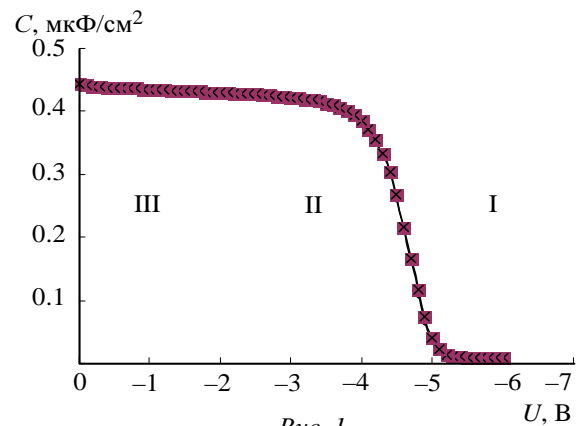


Рис. 1

$$C_3 = C_{\text{par}} (1 + \alpha V_{\text{gs}}),$$

где  $C_{\text{par}}$  – сумма двух ёмкостей: паразитной ёмкости, обусловленной наличием геометрических емкостей электродов, и ёмкости, обусловленной наличием свободных электронов в объёме гетероструктуры.

Зависимость объёмного пространственного заряда от напряжения можно выразить как интеграл от суммарной ёмкости:  $Q_{\Sigma} = \int C_{\Sigma} dV_{\text{gs}}$ . В аналитическом виде выражение для  $Q_{\Sigma}$  можно записать как

$$Q_{\Sigma} \approx \frac{C_{\text{AlGaN}}}{\beta} e^{\beta(V_{\text{gs}} - V_{\text{bi}})} + \frac{C_{2\text{DEG}}}{4} (2V_{\text{gs}} + A_1 + \arctg[\text{th}(V_{\text{gs}} - V_{\text{th}})] - A_2) (1 + \alpha V_{\text{gs}}) + C_{\text{par}} V_{\text{gs}} (1 + \alpha V_{\text{gs}}),$$

где

$$A_1 = \frac{\ln\left\{\text{ch}\left[\delta_1(V_{\text{gs}} - V_{\text{th}})\right]\right\}}{\delta_1} + \frac{\ln\left\{\text{ch}\left[\delta_2(V_{\text{gs}} - V_{\text{th}})\right]\right\}}{\delta_2},$$

$$A_2 = \frac{\arctg\left[\sqrt{\delta_1} \text{th}(V_{\text{gs}} - V_{\text{th}})\right]}{\sqrt{\delta_1}} + \frac{\arctg\left[\sqrt{\delta_2} \text{th}(V_{\text{gs}} - V_{\text{th}})\right]}{\sqrt{\delta_2}}.$$

Результаты моделирования (рис. 2) показывают очень высокую сходимость расчёта с экспериментальными данными во всём диапазоне напряжений (погрешность не более 5%). Это дает возможность использовать предложенную модель для расчета зависимости поверхностной концентрации двумерного электронного газа от глубины (рис. 3). Видно, что результаты моделирования распределения концентрации также находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными.

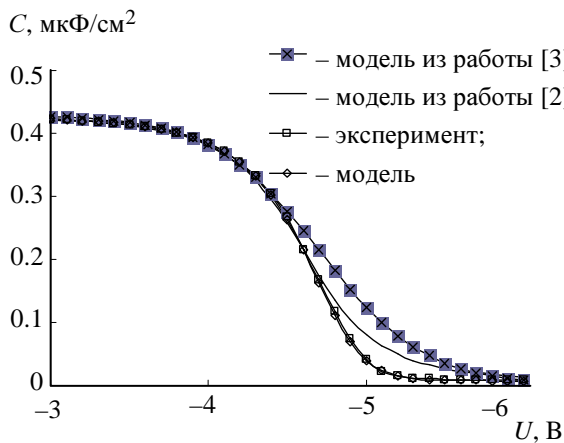


Рис. 2

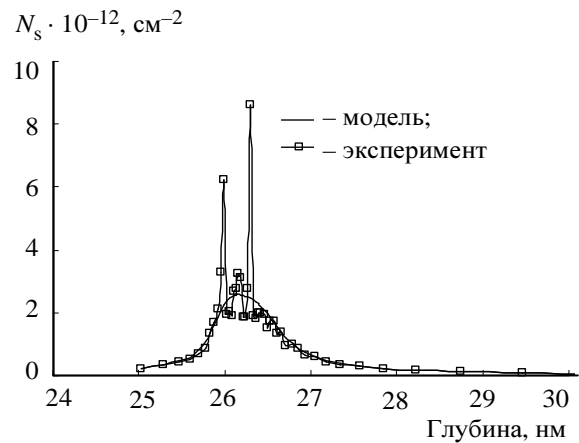


Рис. 3

Не менее важной задачей является исследование и моделирование ВАХ структур на основе твердых растворов AlGaIn. Поскольку значительное влияние на параметры токопередачи в СВЧ-приборах оказывают характеристики омических контактов, в работе были исследованы свойства таких контактов к *n*-AlGaIn с различной долей Al. Для этого были созданы методом молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота в металлбогатенных условиях слои AlGaIn толщиной порядка 1 мкм. После предварительной

очистки поверхности методом вакуумного термического напыления [4] были нанесены металлические контакты на основе слоя титана с алюминиевым подслоем. Для получения омической характеристики необходимо проводить отжиг в бескислородной среде. Было проведено несколько серий экспериментов, в которых менялись температура и продолжительность отжига.

Для определения параметров контактов был проведен расчет их сопротивления на основе исследования ВАХ и их последующего моделирования. Для расчета сопротивления использовалась TLM-методика, базирующаяся на измерении параметров структур с переменным расстоянием между контактными площадками. Методом фотолитографии был создан набор омических контактов квадратной формы, размерами  $400 \times 400$  мкм (рис. 4). Расстояние между контактами 1 и 2 равнялось 100 мкм, между 2 и 3 – 50 мкм, между 3 и 4 – 25 мкм, между 4 и 5 – 10 мкм, между 5 и 6 – 5 мкм. Для каждого зазора измерялись ВАХ, которые использовались для расчета удельного сопротивления контакта (рис. 5). Исходя из определенного при 5 В значения сопротивления, рассчитывалась зависимость сопротивления от расстояния между контактами. Контактное сопротивление определялось из аппроксимации полученных характеристик до пересечения с осью сопротивления. Для большинства контактов на основе твердых растворов AlGaIn было достигнуто контактное сопротивление порядка  $1 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2$ .

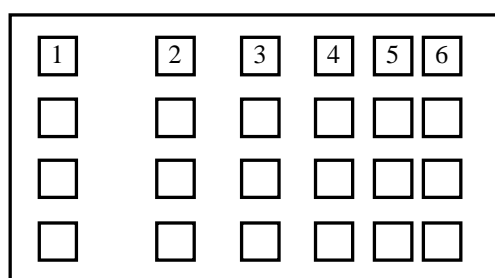


Рис. 4

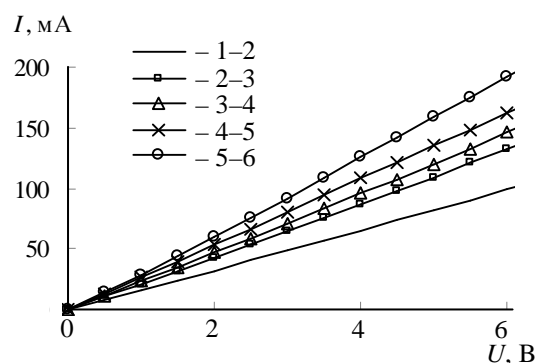


Рис. 5

Разработанная модель позволяет с высокой точностью моделировать ВФХ и ВАХ гетероструктур AlGaIn / GaN с погрешностью не более 5 % во всём диапазоне приложенных напряжений, а также определять их рабочие параметры, что может быть использовано в Spice-моделях полевых транзисторов с барьером Шотки, а также для более точных расчётов распределения поверхностной концентрации двумерного электронного газа по глубине в гетероструктуре и его поведения под действием смещающего потенциала.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Measurement of drift mobility in AlGaIn/GaN heterostructure field-effect transistor / X. Z. Dang, P. M. Asbeck, E. T. Yu et al. // Appl. phys. lett. 1999. Vol. 74, № 25. P. 3890.
2. GaAs FET Device and Circuit Simulation in SPICE / H. Statz, P. Newman, I. W. Smith et al. // IEEE Trans. Electron Devices. 1987. Vol. ED-34. P. 160.
3. Angelov I., Zirath H., Rorsman N. A new empirical nonlinear model for HEMT and MESFET devices // IEEE transaction on MTT. 1992. Vol. 40, № 12. P. 2258.
4. Ламкин И. А., Тарасов С. А., Феоктистов А. О. Оптимизация технологии получения омических контактов к эпитаксиальным слоям p-GaN // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. № 5. С. 14–17.

B. V. Kalinin, I. A. Lamkin, C. A. Tarasov

*SIMULATION OF CAPACITANCE-VOLTAGE AND CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS  
FOR DHFET BASED ON HETEROSTRUCTURES ALGAN / GAN*

*In this paper we study and modeling of capacitance-voltage and capacitance-voltage characteristics of a transistor with a double limit of two-dimensional electron gas (DHFET), established on the basis of heterostructures AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>. It is shown that the developed model allows the most accurate calculation of the characteristics of transistors on AlGa<sub>N</sub> heterostructures and ohmic contacts to them. Especially high between the results of simulation and experiment is observed when the gate voltage close to the cutoff. The error of the calculations does not exceed 5 %, whereas conventional methods for analyzing the characteristics of DHFET the error may be 200 % or more.*

**AlGa<sub>N</sub>, ohmic contact, DHFET-transistor, modeling of the characteristics**



УДК 681

*Н. А. Молдовян, Р. Я. Аль-Рахми*

## **ПОДХОДЫ К СИНТЕЗУ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ БЛОЧНЫХ ШИФРОВ**

*Описано построение блочных шифров (БШ) на основе алгебраических операций, что позволяет добиться высокой производительности, хороших статистических свойств и стойкости к атакам на основе известных и специально подобранных текстов.*

**Блочный шифр, шифрование данных, алгебраические операции, полиномиальное умножение, конечные поля, неприводимые многочлены, бинарные полиномы, статистические свойства**

Современные БШ, как правило, используют подстановочные и перестановочные операции преобразования входных данных, например DES [1], Serpent и AES [2]. Для эффективной аппаратной реализации предложены шифры, основанные на использовании операций преобразования, зависящих от преобразуемых данных [3], [4] и выполняемых с помощью подстановочно-перестановочных сетей (например, RC5 [5], SPECTR-N64 [6], Cobra-64 [7]). При построении скоростных программных шифров используются операции выборки подключей в зависимости от преобразуемых данных [8]. Использование алгебраических операций в качестве примитивов БШ представляет интерес для разработки алгоритмов шифрования, используемых для обеспечения контролируемой загрузки ЭВМ [9] в средствах защиты информации от несанкционированного доступа. Это связано с тем, что при соответствующем построении программный код, реализующий алгебраический БШ, может иметь достаточно малый размер. Шифры, в которых основным криптографическим примитивом являются алгебраические операции, называются алгебраическими. Наиболее известным алгебраическим БШ является алгоритм шифрования IDEA [1], в котором в качестве базового примитива применена операция умножения по модулю простого числа  $2^{16} + 1$ . Шифр IDEA относится к БШ, обладающим достаточно высокой производительностью как при аппаратной, так и при программной реализации. Это показывает, что алгебраические блочные шифры могут представлять интерес в качестве шифров универсального назначения [10].

В настоящей статье рассматриваются подходы к разработке алгебраических БШ, обеспечивающие достаточно высокую производительность и компактность при программной реализации и различных вариантах аппаратной реализации, и разрабатывается 64-битовый БШ, использующий вычисления в конечном поле двоичных многочленов.

**Операции умножения в различных алгебраических структурах как примитив алгоритмов шифрования.** Значительный интерес для синтеза алгебраических БШ представляют операции умножения в различных алгебраических структурах: кольцах вычетов по модулю, простых конечных полях, конечных кольцах и полях многочленов [11], конечных кольцах матриц [10] и конечных кольцах и полях, заданных в явной векторной форме [12]. Все эти виды операций умножения обладают хорошим лавинным эффектом и могут быть выполнены с помощью стандартных арифметических операций, реализуемых как элементарные команды микропроцессора. Перечисленные типы операций умножения обладают следующими достоинствами для применения в качестве криптографических примитивов:

1. Достаточная простота описания шифров и компактность кода при программной и микропрограммной реализации.

2. Использование элементарных команд контроллеров и микропроцессоров, выполняемых за малое число машинных тактов.

3. Обеспечение хороших рассеивающих и перемешивающих свойств при выполнении достаточно малого числа алгебраических операций.

4. Возможность выбора конечных полей, над которыми задается используемая в шифре алгебраическая структура, что обеспечивает удобство программной, микропрограммной и аппаратной реализации при различных вариантах размера входного блока данных, а также достаточно высокую производительность шифров.

5. Возможность эффективного распараллеливания операций умножения в кольцах многочленов, векторов и матриц.

6. Возможность построения скоростных шифров, обладающих высокой стойкостью к атакам на основе известных и специально подобранных текстов, комбинированием операций из различных алгебраических структур.

7. Возможность разработки шифров с простой процедурой расширения секретного ключа, а также шифров, свободных от использования такой процедуры.

Особый интерес представляет использование вычислений в конечных полях двоичных многочленов  $GF(2^s)$ . Это связано с достаточно низкой временной сложностью операций сложения и умножения двоичных многочленной при программной и аппаратной реализации.

**Использование вычислений в конечных полях двоичных многочленов.** Операция умножения в конечных полях двоичных многочленов определяется как умножение многочленов по модулю неприводимого двоичного многочлена и реализуется в общем случае с помощью двух арифметических операций – умножения двух многочленов и деления полученного результата на заданный неприводимый многочлен. Данные арифметические операции обеспечивают выраженный лавинный эффект при изменении любого бита операндов, в роли которых выступают подблоки данных и подключи. Однако временная сложность операции деления существенно превышает сложность операции умножения, поэтому при проектировании алгебраических блочных шифров следует выбирать специальные значения модуля, позволяющие устранить операцию деления. Последнее возможно при выборе в качестве модуля двоичных многочленов с малым числом ненулевых ко-

эффициентов. Минимальное число ненулевых коэффициентов в неприводимом двоичном многочлене равно трем. В общем виде такие многочлены записываются в виде  $f(x) = x^s + x^k + 1$ , где  $s$  и  $k$  – натуральные числа. При использовании умножения по модулю вида  $\mu(x) = x^s + x^k + 1$  размер подблоков данных выбирается равным  $s$  бит. Любой возможный  $s$ -битовый блок данных интерпретируется как элемент двоичного поля  $GF(2^s)$ , причем различным подблокам данных соответствуют различные элементы поля  $GF(2^s)$ , т. е. наблюдается взаимно-однозначное соответствие множеств возможных значений подблоков данных и двоичных многочленов степеней  $z < s$ . Выполнение одной операции умножения по модулю  $x^s + x^k + 1$  требует одного арифметического умножения двоичных многочленов и нескольких операций сложения многочленов.

Действительно, арифметическое умножение двух многочленов  $\alpha(x)$  и  $\beta(x)$  дает многочлен  $\gamma(x)$ , степень которого не превышает значения  $2s - 2$ , который можно интерпретировать как конкатенацию двух многочленов  $\varepsilon(x)$  и  $\delta(x)$  поля  $GF(2^s)$ , т. е.

$$\alpha(x)\beta(x) = \delta(x) \parallel \varepsilon(x) = x^s \delta(x) + \varepsilon(x).$$

Тогда произведение  $\alpha(x)\beta(x)$  можно записать в виде

$$\begin{aligned} \alpha(x)\beta(x) &= x^s \delta(x) + \varepsilon(x) = x^s \delta(x) + x^k \delta(x) + \delta(x) - x^k \delta(x) - \delta(x) + \varepsilon(x) = \\ &= \delta(x)\mu(x) - x^k \delta(x) - \delta(x) + \varepsilon(x) \Rightarrow \\ &\Rightarrow \alpha(x)\beta(x) \equiv -x^k \delta(x) - \delta(x) + \varepsilon(x) \pmod{\mu(x)}; \\ -x^k \delta(x) - \delta(x) + \varepsilon(x) &= \delta'(x) \parallel \varepsilon'(x) = \delta'(x)\mu(x) - x^k \delta'(x) - \delta'(x) + \varepsilon'(x) \Rightarrow \\ &\Rightarrow \alpha(x)\beta(x) \equiv -x^k \delta'(x) - \delta'(x) + \varepsilon'(x) \pmod{\mu(x)}, \end{aligned}$$

где многочлен  $\rho(x) = -x^k \delta(x) - \delta(x) + \varepsilon(x)$  имеет степень не выше значения  $k + (s - 1)$ , многочлен  $\varepsilon'(x)$  имеет степень не выше значения  $(s - 1)$ , многочлен  $\rho'(x) = -x^k \delta'(x) - \delta'(x) + \varepsilon'(x)$  имеет степень не выше значения  $2k$ . Из приведенных соотношений следует, что при условии  $2k < s$  операция умножения многочленов по модулю  $\mu(x) = x^s + x^k + 1$  может быть выполнена за одно арифметическое умножение многочленов, две операции циклического сдвига на  $k$  бит, которые реализуют умножение на многочлен  $x^k$ , и 4 операции поразрядного сложения соответствующих коэффициентов многочленов (заметим, что в случае двоичных многочленов операция вычитания совпадает с операцией сложения).

Этот результат обуславливает интерес к неприводимым двоичным трехчленам вида  $\mu(x) = x^s + x^k + 1$ , для которых справедливо соотношение  $2k < s$ . Трехчлены такого типа могут быть найдены в известных таблицах неприводимых двоичных многочленов [11] или достаточно легко сгенерированы с помощью специально разработанной компьютерной программы, причем для случая очень больших значений степени  $s$  (до 1024 бит и более). Примеры таких многочленов представлены в табл. 1.

Таблица 1

$k$	$s$	$k$	$s$	$k$	$s$	$k$	$s$	$k$	$s$
7	1023	41	1044	412	1849	211	1708	57	1782
43	1023	10	1047	13	1860	113	1719	81	1782
294	1025	9	1135	27	1860	611	1719	105	1782
306	1025	99	1180	11	1866	39	1722	245	1782
35	1026	99	1831	9	1950	839	1722	585	1782
98	1029	53	1838	17	1953	623	1767	11	1820
116	1031	66	1841	35	1953	607	1770	45	1820
21	1039	49	1849	70	1953	117	1774	9	1825

**Реализация блочного шифра.** Рассмотрим конкретный 64-битовый блочный шифр на основе операции умножения по модулю неприводимого многочлена  $\eta(x) = x^{32} + x^8 + 1$ , сгенерированного с помощью компьютерной программы, реализующей специально разработанный тест на неприводимость. Входной блок данных  $T$  представим в виде конкатенации двух 32-битовых подблоков данных  $A$  и  $B$ :  $T = (A, B)$ . В качестве секретного ключа используются четыре 32-битовых подключа  $K_1, K_2, K_3, K_4$ . Подблоки данных и подключи интерпретируются как двоичные многочлены – элементы поля  $GF(2^{33})$ , над которыми выполняется операция суммирования многочленов (суммирование коэффициентов при одинаковых степенях переменной по модулю 2) и операция умножения по модулю многочлена  $\eta(x)$ . Обратные значения подключей  $K_1^{-1}, K_2^{-1}, K_3^{-1}, K_4^{-1}$  вычисляются на этапе предвычислений. Процедура шифрования описывается следующей последовательностью шагов преобразования:

1. Установить число раундов шифрования  $r = 3$  и значение счетчика  $i = 0$ .
2. Преобразовать входной блок данных в соответствии с формулой

$$T \leftarrow \text{Crypt}^{(e)}(T, Q_{1+4i}, Q_{2+4i}, Q_{3+4i}, Q_{4+4i}).$$

3. Прирастить значение счетчика:  $i \leftarrow i + 1$ .
4. Если  $i \neq r$ , то перейти к шагу 2. В противном случае СТОП.

Значение  $e = 1$  соответствует режиму зашифровывания, а  $e = 0$  – режиму расшифровывания. Функция шифрования  $\text{Crypt}^{(1)}$  описывается следующим алгоритмом (« $\leftarrow$ » – операция присваивания; « $X \lll z$ » – операция циклического сдвига битовой строки  $X$  на  $z$  бит; « $\leftrightarrow$ » – операция обмена значениями):

1.  $(a_1, a_2, a_3, a_4) \leftarrow ((a_1, a_2, a_3, a_4) + Q_{2+4i}) Q_{1+4i} \bmod \eta(x)$ .
2.  $(b_1, b_2, b_3, b_4) \leftarrow ((b_1, b_2, b_3, b_4) + Q_{3+4i}) Q_{2+4i} \bmod \eta(x)$ .
3.  $(a_1, a_2) \leftrightarrow (b_1, b_2)$ .
4.  $(a_1, a_2, a_3, a_4) \leftarrow (a_1, a_2, a_3, a_4) \lll 11$ .
5.  $(a_1, a_2, a_3, a_4) \leftarrow ((a_1, a_2, a_3, a_4) Q_{3+4i} \bmod \eta(x)) + Q_{4+4i}$ .
6.  $(b_1, b_2, b_3, b_4) \leftarrow (b_1, b_2, b_3, b_4) \lll 11$ .
7.  $(b_1, b_2, b_3, b_4) \leftarrow ((b_1, b_2, b_3, b_4) Q_{4+4i} \bmod \eta(x)) + Q_{1+4i}$ .



Функция шифрования Срут<sup>(0)</sup> описывается следующим алгоритмом (заметим, что сложение двоичных многочленов представляет собой операцию-инволюцию, т. е. операцию, обратную к самой себе):

$$1. (b_1, b_2, b_3, b_4) \leftarrow ((b_1, b_2, b_3, b_4) + Q_{1+4i}) Q_{4+4i}^{-1} \text{ mod } \eta(x).$$

$$2. (b_1, b_2, b_3, b_4) \leftarrow (b_1, b_2, b_3, b_4) \ggg 11.$$

$$3. (a_1, a_2, a_3, a_4) \leftarrow ((a_1, a_2, a_3, a_4) + Q_{4+4i}) Q_{3+4i}^{-1} \text{ mod } \eta(x).$$

$$4. (a_1, a_2, a_3, a_4) \leftarrow (a_1, a_2, a_3, a_4) \ggg 11.$$

$$5. (a_1, a_2) \leftrightarrow (b_1, b_2).$$

$$6. (b_1, b_2, b_3, b_4) \leftarrow ((b_1, b_2, b_3, b_4) Q_{2+4i}^{-1} \text{ mod } \eta(x)) + Q_{3+4i}.$$

$$7. (a_1, a_2, a_3, a_4) \leftarrow ((a_1, a_2, a_3, a_4) Q_{1+4i}^{-1} \text{ mod } \eta(x)) + Q_{2+4i}.$$

Расписание использования секретного ключа представлено в табл. 2.

Таблица 2

$e$	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5$	$Q_6$	$Q_7$	$Q_8$	$Q_9$	$Q_{10}$	$Q_{11}$	$Q_{12}$
1	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_2$	$K_3$	$K_1$	$K_4$	$K_3$	$K_4$	$K_1$	$K_2$
0	$K_3$	$K_4$	$K_1$	$K_2$	$K_2$	$K_3$	$K_1$	$K_4$	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$

Приведенный выше алгоритм шифрования ориентирован на применение с 32-битовыми микропроцессорами. Для случая 64-битовых микропроцессоров легко записать аналогичный алгоритм блочного шифрования, в котором входной блок данных имеет размер 128 бит, обеспечивая повышение производительности в 2 раза за счет использования умножения по модулю  $\mu(x) = x^{64} + x^{18} + 1$ . При программной реализации данного алгоритма обеспечивается скорость шифрования не менее 20 Мбит/с для современных массовых 32-разрядных микропроцессоров. Исследование статистических свойств данного алгоритма показало, что при выполнении одного раунда шифрования ( $r = 1$ ) он уже удовлетворяет стандартным требованиям. Два дополнительных раунда шифрования добавлены для получения существенного «запаса прочности» по безопасности. Стойкость к атакам на основе известных и специально подобранных текстов достигается применением операций преобразования, относящихся к различным алгебраическим структурам, включающих операцию модульного умножения, обеспечивающую хорошие рассеивающие и перемешивающие свойства шифрующего преобразования.

Таким образом, использование алгебраических операций при синтезе блочных шифров позволяет добиться высокой производительности, хороших статистических свойств и стойкости к атакам на основе известных и специально подобранных текстов. Данные шифры представляют интерес для применений, связанных с программной и/или аппаратной реализацией криптографических преобразований. Полученные результаты также показывают,

что благодаря выраженному лавинному эффекту алгебраические операции перспективны и для построения криптографических алгоритмов других типов, например скоростных программных хеш-функций итеративного типа.

В настоящей статье обосновывается общий подход к проектированию блочных шифров на основе алгебраических операций. Каждый конкретный случай потребует проведения ряда специальных работ независимыми исследователями, затрагивающих рассмотрение его стойкости к разнообразным методам криптоанализа, что представляет предмет самостоятельного изучения.

Полученные результаты по разработке блочного шифра на основе операций модульного умножения двоичных многочленов и исследования его свойств показывают, что использованный подход представляет также интерес для разработки программно-ориентированных хеш-функций, которые широко востребованы практически для реализации механизмов контроля целостности информации. Задача разработки хеш-функций такого типа также составляет предмет самостоятельного исследования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schneier B. Applied Cryptography: Protocols, Algorithms, and Source Code (Second Edition). N. Y.: John Wiley & Sons, 1996.
2. Pieprzyk J., Hardjono T., Jennifer S. Fundamentals of Computer Security. Springer-Verlag, 2003.
3. Moldovyan A. A., Moldovyan N. A., Sklavos N. Controlled Elements for Designing Ciphers Suitable to Efficient VLSI Implementation // Telecommunication Systems. 2006. Vol. 32. P. 149-163.
4. Sklavos N., Koufopavlou O., Moldovyan A. A. Encryption and data dependent permutations: implementation cost and performance evaluation // Lecture Notes in Computer Science. 2003. Vol. 2776. P. 337-348.
5. Fast ciphers for cheap hardware: differential analysis of SPECTR-H64 / N. D. Goots, B. V. Izotov, A. A. Moldovyan, N. A. Moldovyan // Proc. of the Intern. workshop «Methods, Models, and Architectures for Network Security». Berlin: Springer-Verlag, 2003. Vol. 2776. P. 449-452.
6. Rivest R. L. The RC5 Encryption Algorithm // 2d Intern. workshop «Fast Software Encryption». Springer-Verlag LNCS, 1995. Vol. 1008. P. 86-96.
7. Sklavos N., Koufopavlou O. High Speed Networking Security: Design and Implementation of Two New DDP-Based Ciphers // Mobile Networks and Applications. 2005. Vol. 10. P. 237-249.
8. Moldovyan A. A., Moldovyan N. A. Software Encryption Algorithms for Transparent Protection Technology // Cryptologia. 1998. Vol. XXII, № 1. P. 56-68.
9. Алексеев Л. Е., Молдовян А. А., Молдовян Н. А. Алгоритмы защиты информации в СЗИ НСД «СПЕКТР-Z» // Вопросы защиты информации. 2000. № 3. С. 63-68.
10. Молдовян Н. А., Аль-Рахми Р. Я. Синтез блочных шифров на основе операций матричного умножения // Вопросы защиты информации. 2011. № 2. С. 2-8.
11. Болотов А. А., Гашков С. Б., Фролов А. Б. Элементарное введение в эллиптическую криптографию. Протоколы криптографии на эллиптических кривых. М.: КомКнига, 2006.
12. Направления применения конечных векторных пространств в криптографии / Е. С. Дернова, А. А. Костина, Н. А. Молдовян, П. А. Молдовяну // Вопросы радиоэлектроники. Сер. общетехническая. 2009. Вып. 2. С. 164-174.

*N. A. Moldovyan, Ramzi Yahya Al-Rahmi*

#### *APPROACHES TO SYNTHESIS OF THE ALGEBRAIC BLOCK CIPHERS*

*It is considered construction of the block ciphers based on using the algebraic operations. The use of the polynomial multiplication is discussed in detail and used in construction of the block cipher. While data block encryption the 32-bit data subblocks are interpreted as binary polynomials. The rotation operation is used as auxiliary operation that distract the algebraic attacks.*

**Block cipher, data encryption, algebraic operations, polynomial multiplication, finite fields, irreducible polynomials, binary polynomials, statistic properties**

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАНИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ЛИНИИ

*Показана возможность построения на основе исходного алгоритма различных вариантов моделей процесса планирования в технологической линии. Предложенный метод моделирования создал предпосылки для моделирования процедуры перехода на выпуск новой продукции, при этом позволил сформулировать условие целесообразности такого перехода.*

**Автоматизированное управление, динамический спрос, согласование экономических интересов, статическое линейное программирование, динамический спрос, статический синтез, планирование производства**

Планирование производства как динамический процесс характеризуется трехуровневой структурой [1]. Отличительной ее особенностью является взаимодействие структурных элементов уровней  $h = 3$  (руководство) и  $h = 1$  (начальники цехов) с уровнем  $h = 2$  (диспетчер) по вертикали и взаимодействие элементов уровня  $h = 2$  по горизонтали (технологическая цепочка).

Процесс такого многоуровневого планирования в теоретическом плане рассмотрен в работе [1]. Однако прикладное моделирование выполнено преимущественно для отдельных структурных элементов. В то же время требуется математическая модель для процедуры взаимодействия элементов и прежде всего по горизонтали. Описанию такой модели и посвящена настоящая статья.

**Постановка задачи.** В качестве основы для прикладной модели цепочки принята модель отдельного элемента. Математическое описание отдельного элемента уровня  $h = 2$  с использованием задачи линейного программирования имеет вид

$$\mathbf{DN} \leq \mathbf{X} \leq \mathbf{DV}, \quad (1)$$

$$\mathbf{BN} \leq \mathbf{AX} \leq \mathbf{BV}, \quad (2)$$

$$\mathbf{G} = \mathbf{C} \times \mathbf{X} \rightarrow \max,$$

где  $\mathbf{X}$  – вектор искомого плана;  $\mathbf{DN}$ ,  $\mathbf{DV}$  – векторы нижнего и верхнего ограничений на план;  $\mathbf{A}$  – матрица норм расходов ресурсов;  $\mathbf{C}$  – вектор прибыли от единицы плановой продукции;  $\mathbf{BN}$ ,  $\mathbf{BV}$  – векторы нижней и верхней границ ресурсов. Выходом является вектор  $\mathbf{X}$ , входом – вектор  $\mathbf{V} = (\mathbf{BN}, \mathbf{BV})$ . Трудности числового моделирования элемента заключаются в специфике задачи.

Для числового моделирования отдельного автономного элемента использован алгоритм статистического синтеза Р. Габасова [2].

Алгоритм состоит из следующих шагов:

Шаг 1. Задание размерности задачи

$$\begin{aligned} \mathbf{DN}[1..N] &\leq \mathbf{X}[1..N] \leq \mathbf{DV}[1..N], \\ \mathbf{BN}[1..M] &\leq \mathbf{AX}[1..M] \leq \mathbf{BV}[1..M], \\ \mathbf{A}[1..M, 1..N]. \end{aligned}$$

Шаг 2. Статистический синтез числовых значений для вектора плана (выхода).  
Фрагмент программы имеет вид:

```

for j: = 1 to N do
  begin
    X[j]: = Rand1(30.0,50.0); /*X в пределах [Xmin, Xmax]/
    if X[j] < 33 then
      begin
        DN[j]: = X[j];
        DV[j]: = 50;
        DEL[j]: = Rand1(35.0,39.0);
      end;

```

где **DEL** – вектор оценок.

Шаг 3. Статистический синтез коэффициентов матрицы **A** по схеме, аналогичной использованной на шаге 2. Фрагмент программы имеет вид:

```

if AX[i] < -5 then
  begin
    BN[i]: = AX[i];
    BV[i]:=10;
    Y[i]: = Rand1(10.0,20.0);
  end;

```

Шаг 4. Определение необходимых ресурсов и коэффициентов целевой функции по алгоритму, представленному следующей программой 1:

```

CX: = 0;
for j: = 1 to N do
  begin
    C[j]: = DEL[j];
    for i: = 1 to M do
      C[j]: = C[j] + A[i, j]*Y[i];
    CX: = CX + C[j]*X[j];
  end;

```

где **Y** – вектор потенциалов.

Далее используем модифицированный алгоритм, в котором все перечисленные параметры неотрицательны,  $\mathbf{DN} = \mathbf{BN} = 0$ , что наблюдается в организационно-экономических системах. Назовем модифицированный алгоритм исходным.

Заметим, что исходный алгоритм в определенной мере является антиподом задаче статического линейного программирования (СЛП). В этой задаче часто приходится – при несовместности ограничений – определять дополнительное количество ресурсов  $F$  ( $F = (f_s, s = 1, N)$ ). Приходится решать дополнительную трудоемкую оптимизационную задачу с ограничениями (1) и (2) при ресурсах  $BV1 = (BV + F)$  и целевой функции  $G1 = EF$ , где  $E$  – единичная матрица соответствующего размера. Исходный алгоритм позволяет при сохранении свойства оптимальности решить задачу проще: в режиме диалога задаются значения  $DV$ ,  $A$ ,  $C$ ,  $X$  и алгоритм определяет минимальное значение  $BV1$ .

**Решение задачи.** Исходный алгоритм реализован на языке программирования Pascal и позволяет строить различные варианты технологической цепочки. Рассмотрим некоторые из них.

*Вариант 1.* В нем описанные модели соединяются последовательно от последнего элемента к первому с учетом условия

$$(\mathbf{BN}, \mathbf{BV})_k = (\mathbf{DN}, \mathbf{DV})_{k-1}, \quad (3)$$

где  $k = 1, K$  – номер элемента.

Дополнительно программа элемента трансформирована так, чтобы все числовые значения были строго неотрицательны и неограниченны.

Значение плана  $\mathbf{X}$  для последнего элемента и матрицы  $\mathbf{A}$  для каждого элемента цепочки генерируются случайным образом в заданном диапазоне (например: [0...20]).

Фрагмент программы:

Write ('M='); readln(M);

If k = 1 then begin

Write ('N='); readln(N);

end;

Из условия (3) также следует закономерность «передачи» размерностей: для первой задачи размерности  $M_1, N_1$  и для последующих задач размерности  $N_k = M_{k-1}, M_k$  задаются вручную.

Недостатком варианта является быстрое нарастание значений коэффициентов матрицы  $\mathbf{A}$  и целевой функции, что приводит к слишком большому значению целевой функции и сложности задания реальных условий. К тому же условие (3) должно быть задано точно, а не интервально. Кроме того, необходимо вручную вводить план на каждом шаге (учитывая прямые ограничения  $\mathbf{DN}, \mathbf{DV}$ ).

*Вариант 2.* Для устранения названных недостатков введены условия

$$(0, \mathbf{BV})_k = (0, \mathbf{DV})_{k-1}, \mathbf{BV}_k = \mathbf{DV}_{k-1}, \mathbf{X}_k = \mathbf{B}_{k-1} = \mathbf{A}_{k-1}\mathbf{X}_{k-1}.$$

Матрица  $\mathbf{A}$  для каждого элемента генерируется случайным образом, для последнего элемента значения плана вводятся в режиме диалога.

Перечисленные варианты характеризуют статический процесс планирования.

*Вариант 3.* Учтем временную динамическую составляющую. Для этого введем понятие временных интервалов  $r = 1, R$ , на которых работает цепочка элементов. Программно интервалы вводятся циклами, число которых задается в режиме диалога.

На каждом интервале  $r$  вручную вводится план  $\mathbf{X}$  для последнего элемента для корректировки роста числовых значений коэффициентов и для каждого элемента в цепочке  $L$  раз задаются коэффициенты матрицы  $\mathbf{A}$ , которые остаются неизменными на всех интервалах времени.

Кроме того, для всех интервалов с индексом  $r > 1$  при переходе от элемента к элементу вводится для корректировки плана составляющая  $\Delta\mathbf{B}$  дополнительных ресурсов

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{B}_{k-1} + \Delta\mathbf{B} = \mathbf{A}_{k-1}\mathbf{X}_{k-1} + \Delta\mathbf{B}.$$

*Вариант 4.* Вариант 2 позволяет синтезировать процесс планирования для более высокого уровня иерархии ( $h = 3$ , руководство).

Для этого сохраняются значения ресурсов (входа)  $\mathbf{V}_1$  и плана (выходов)  $\mathbf{X}_K$  технологической цепочки, а эквивалентная матрица  $\mathbf{A} = \mathbf{A}_1\mathbf{A}_2\dots\mathbf{A}_K$ , где  $K$  – количество элементов в технологической линии. Коэффициенты вектора целевой функции  $\mathbf{C}$  определяются из выражений программы 1.

*Вариант 5.* Рассмотренные варианты позволяют имитировать процесс горизонтального согласования экономических интересов элементов по следующему алгоритму:

Шаг 1. В соответствии с вариантом 4 находятся параметры  $\mathbf{V}_1, \mathbf{X}_K, \mathbf{A}, \mathbf{C}$  в предположении, что интересы согласованы.

Шаг 2. Изменяются в диалоговом режиме коэффициенты целевой функции для получения «несогласованного» элемента. Не снижая общности, этим элементом может быть первый элемент.

Шаг 3. Находятся по предложенному алгоритму значения целевых функций  $\mathbf{G}_k^{(1)}$  ( $k = K, 1$ ) от конца цепочки к началу.

Шаг 4. Определяются с помощью задач ДЛП значения целевых функций  $\mathbf{G}_k^{(2)}$  ( $k = 1, K$ ) при «движении» от начала цепочки к концу.

Шаг 5. Вычисляются значения  $\Delta \mathbf{G}_k = \mathbf{G}_k^{(1)} - \mathbf{G}_k^{(2)}$ .

Далее в соответствии с работой [1] используется либо метод равновесия по Нэшу, либо метод многокритериальной оптимизации.

*Вариант 6.* Данный метод моделирования позволяет строить модель процедуры перехода на выпуск новой продукции. Для этого на интервале  $s$  ( $1 \leq s \leq R$ ) следует изменить размерности матриц и векторов и их числовые параметры. Одновременно создаются предпосылки для оценки целесообразности перехода на выпуск новой продукции путем сравнения значений целевых функций до и после перехода.

**Результаты реализации.** Результаты решения задачи моделирования даже для небольшой размерности элементов достаточно объемны. В связи с этим приведем лишь один пример для варианта 3.

Построенная программа TIME\_INT.EXE работает следующим образом. Первоначально задаются параметры в режиме диалога.

Vvedite chislo vremennyh intervalov //Приглашение ввести число временных интервалов, на которых будет решаться последовательность задач

Vvedite chislo reshaemyh zadach //Приглашение ввести число задач в цепочке

Vvedite razmernost zadachi #1

$\mathbf{N}$  = //Ввод числа прямых ограничений

$\mathbf{M}$  = //Ввод числа основных ограничений

Vvedite plan //Ввод плана

$\mathbf{X}[1]$  =

$\mathbf{X}[2]$  =

...

Vvedite  $\mathbf{dB}$  dlya zadachi #2 //Ввод изменения вектора  $\mathbf{B}$  для интервалов более одного

$\mathbf{dB}[1]$  =

$\mathbf{dB}[2]$  =

...

Vvedite matricu  $\mathbf{A}$  //Ввод матрицы  $\mathbf{A}$

$\mathbf{A}[1,1]$  =

$\mathbf{A}[1,2]$  =

...

Далее следуют вычисления, и результаты помещаются в файлы. Файлы отчета (результатов) по задачам носят имена OUT\_1\_1.TXT, OUT\_1\_2.TXT ..., где первое число – номер временного интервала, а второе число – номер задачи в цепочке.

Результаты решения представлены в табл. 1 и 2. В отчетах присутствуют следующие дополнительные обозначения: CX – оптимальное значение целевой функции; Xopt – оптимальный план; **B** – вектор **AX**.

Таблица 1

OUT_1_1.TXT	OUT_1_2.TXT
3<==N	2<==N
2<==M	4<==M
C, CX=1031.40	C, CX=77746.00
108.30 111.30 92.40	1541.00 1256.00
DN	DN
0.00 0.00 0.00	0.00 0.00
DV	DV
4.00 4.00 4.00	26.00 30.00
BN	BN
0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 0.00
BV	BV
26.00 30.00	172.00 142.00 190.00 164.00
A	A
1.00 4.00 2.00	2.00 4.00
5.00 2.00 3.00	2.00 3.00
X	5.00 2.00
4.00 4.00 4.00	4.00 2.00
Xopt	X
2.00 4.00 4.00	26.00 30.00
B	Xopt
26.00 30.00	26.00 30.00
	B
	172.00 142.00 190.00 164.00

Таблица 2

OUT_2_1.TXT	OUT_2_2.TXT
C, CX=2562.50	C, CX=43630.40
431.20 491.00 383.10	1153.70 960.70
DN	DN
1.00 0.00 0.00	15.00 18.00
DV	DV
3.00 2.00 3.00	190.00 190.00
BN	BN
15.00 18.00	0.00 0.00 0.00 0.00
BV	BV
190.00 190.00	134.00 109.00 135.00 118.00
A	A
1.00 4.00 2.00	2.00 4.00
5.00 2.00 3.00	2.00 3.00
X	5.00 2.00
3.00 2.00 3.00	4.00 2.00
Xopt	X
1.00 2.00 3.00	190.00 190.00
B	Xopt
15.00 18.00	17.00 25.00
	B
	134.00 109.00 135.00 118.00

Возможности предложенной модель далеко не исчерпаны и требуется ее дальнейшее исследование, в том числе совместно со статической и динамической задачами линейного программирования. Кроме того, интерфейс пользователя (ввод и вывод) обладает опреде-

ленными неудобствами в силу слабых графических возможностей языка Pascal. Требуется совершенствовать интерфейс, для чего модель следует реализовать на языках программирования, обладающих лучшими графическими возможностями.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Советов Б. Я., Цехановский В. В., Чертовской В. Д. Теория адаптивного автоматизированного управления. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009.
2. Альсевич В. В., Габасов Р., Глушенков В. С. Оптимизация линейных экономических моделей. Статистические задачи. Минск: Изд-во БГУ, 2000.

*V. D. Chertovske, V. V. Tsehanovsky, S. A. Frolov*

### MODELING OF THE PROCESS OF PLANNING TECHNOLOGICAL PRODUCTION LINE

*The possibility of construction on the basis of the original algorithm of different models of the planning process in the technological line. The proposed method for modeling created the preconditions for the simulation procedure transition to release of new products, at the same time made it possible to formulate the condition feasibility of such a transition.*

**Automated management, dynamic demand, harmonization of economic interests, static linear programming, dynamic demand, static synthesis, production planning**

УДК 519.81

*Е. А. Бурков, В. Н. Соколов*

## ПОСТРОЕНИЕ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ТРЕНАЖЕРНО-ОБУЧАЮЩИХ СИСТЕМ

*Рассмотрено определение коэффициентов относительной значимости элементов иерархии показателей качества тренажерно-обучающих систем с помощью модифицированного для решения задач группового выбора метода анализа иерархий.*

### Тренажеры, метод анализа иерархий, экспертные оценки

Возникновение, развитие и выход на первый план сложных технических систем сделали необходимым использование и, следовательно, обучение высококвалифицированных специалистов, обладающих требуемыми знаниями и навыками по управлению этими системами. Данная необходимость обусловлена тем, что ошибка в управлении подобными системами может вызвать глобальные негативные экономические, экологические и другие последствия, вплоть до катастрофы. Наиболее эффективными и перспективными средствами обучения квалифицированных специалистов являются тренажерно-обучающие системы (ТОС), являющиеся особым классом автоматизированных систем. Они позволяют выработать и закрепить необходимые для управления сложными техническими системами навыки. Разработка ТОС представляет собой сложный процесс, требующий больших финансовых затрат, поэтому необходим контроль качества на каждом из этапов разработки, включая составление технического задания. Оценка качества таких систем и определение требований к ним на стадии разработки осложняются неполнотой и/или неопределенностью имеющейся информации и представляет собой неструктурированную или слабоструктурированную задачу. Для ее решения целесообразно использовать методы экспертного оценивания, которые в настоящее время широко применяются во многих областях человеческой деятельности, требующих принятия сложных решений.



ТОС должна в полном объеме воспроизводить следующие основные этапы деятельности оператора при управлении реальными объектами: 1) обнаружение и опознание объекта; 2) идентификация объекта; 3) принятие решения; 4) реализация решения; 5) контроль исполнения.

Анализ этапов деятельности оператора показывает, что для формирования и совершенствования профессиональных навыков оператора с помощью ТОС необходимо создать такую информационную модель воспроизводимых условий в реальном масштабе времени, чтобы зрительное восприятие и моторная реакция оператора не отличались от таковых в реальных условиях [1].

Чтобы удовлетворять психологическим и дидактическим требованиям, исключающим приобретение и перенос на объект управления отрицательных навыков, ТОС должна иметь следующие обязательные части [2]: 1) конструктивную (точную копию рабочего места оператора); 2) программную (адекватную модель оборудования и процессов); 3) дидактическую (рабочее место инструктора с программой оценки и контроля действий оператора и прочих не менее важных сервисных программ). Кроме того, ТОС должна содержать следующие обязательные элементы: 1) рабочее место оператора; 2) моделирующее устройство; 3) рабочее место инструктора; 4) устройства контроля и оценки действий оператора.

Целесообразность применения для оценки качества ТОС методов экспертного оценивания обусловлена тем, что пока только человек способен к решению нечетко сформулированных задач, генерированию идей, созданию абстрактных образов, предвидению неучтенных событий, действию в условиях неполной и неточной информации.

Одной из наиболее сложных и важных задач методологии экспертного оценивания является рациональный отбор квалифицированных экспертов, участие которых в экспертизе не приведет к снижению достоверности ее результатов. На рис. 1 приведена иерархия показателей экспертной компетентности, от которых зависит эффективность участия эксперта в экспертизе, и указана относительная значимость элементов [3]–[5].

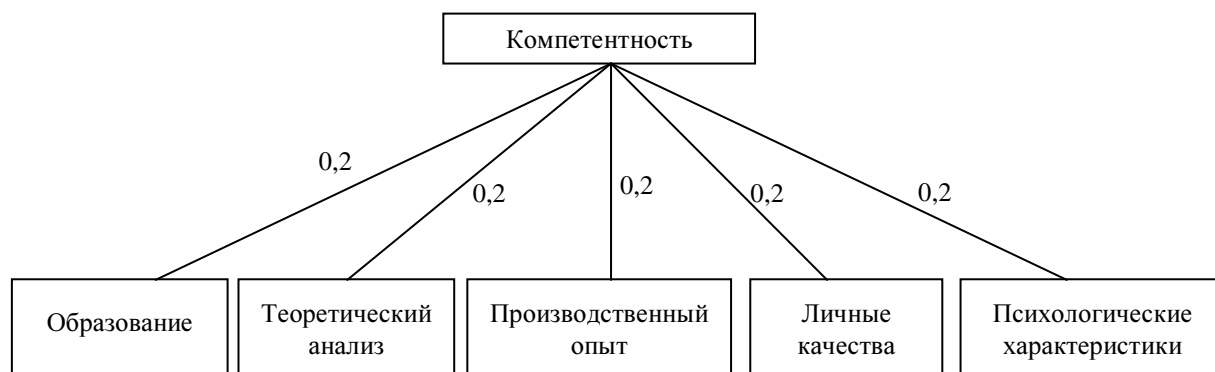


Рис. 1

Декомпозиция элементов второго уровня иерархии показателей компетентности экспертов, изображенной на рис. 1, приведена в табл. 1. Компетентность каждого конкретного эксперта оценивалась непосредственно лицом, заинтересованным в проведении экспертизы, являющимся главой конструкторского бюро по разработке ТОС и обладающим информацией о профессиональных и личных качествах экспертов. Обобщенный коэффициент компетентности каждого эксперта вычислялся в виде суммы произведений от-

носительных значимостей показателей компетентности на соответствующие значения оценок по этим показателям, выставленные рассматриваемому эксперту. Оценки компетентности девяти приглашенных экспертов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели компетентности		Вес	Номер эксперта								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
Образование	Ученое звание	0,100	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Ученая степень	0,100	0,25	0,40	0,00	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00
Теоретический анализ	Публикации	0,060	0,30	0,21	0,12	0,21	0,06	0,21	0,21	0,12	0,00
	Ссылки на работы	0,100	0,50	0,50	0,20	0,35	0,10	0,50	0,35	0,20	0,00
	Коммуникативность	0,040	0,20	0,20	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,06
Производственный опыт	Опыт работы	0,060	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,12
	Стаж по специальности	0,100	0,50	0,20	0,35	0,50	0,35	0,50	0,50	0,35	0,00
	Квалификация	0,040	0,20	0,20	0,20	0,20	0,12	0,20	0,20	0,20	0,06
Личные качества	Разносторонность	0,068	0,20	0,20	0,20	0,10	0,20	0,20	0,20	0,20	0,33
	Оригинальность	0,066	0,20	0,20	0,20	0,20	0,10	0,20	0,20	0,20	0,33
	Уровень карьеры	0,066	0,33	0,33	0,20	0,20	0,20	0,33	0,20	0,20	0,00
Психологические характеристики	Особенности памяти	0,068	0,34	0,34	0,34	0,34	0,20	0,20	0,34	0,34	0,10
	Логические способности	0,066	0,33	0,33	0,33	0,33	0,20	0,33	0,33	0,33	0,33
	Интуиция	0,066	0,33	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,33
Компетентность		1,000	0,32	0,26	0,19	0,22	0,15	0,27	0,23	0,19	0,11

На основании полученных коэффициентов обобщенной компетентности экспертов было принято решение об исключении эксперта под номером 9 из состава формируемой экспертной группы, так как его компетентность была признана недостаточной для участия в экспертизе. Была сформирована экспертная группа, в которую вошли эксперты под номерами 1–8.

В результате опроса и консультаций со специалистами в области разработки и эксплуатации ТОС были определены состав и структура иерархии показателей качества, верхние 4 уровня которой приведены на рис. 2.

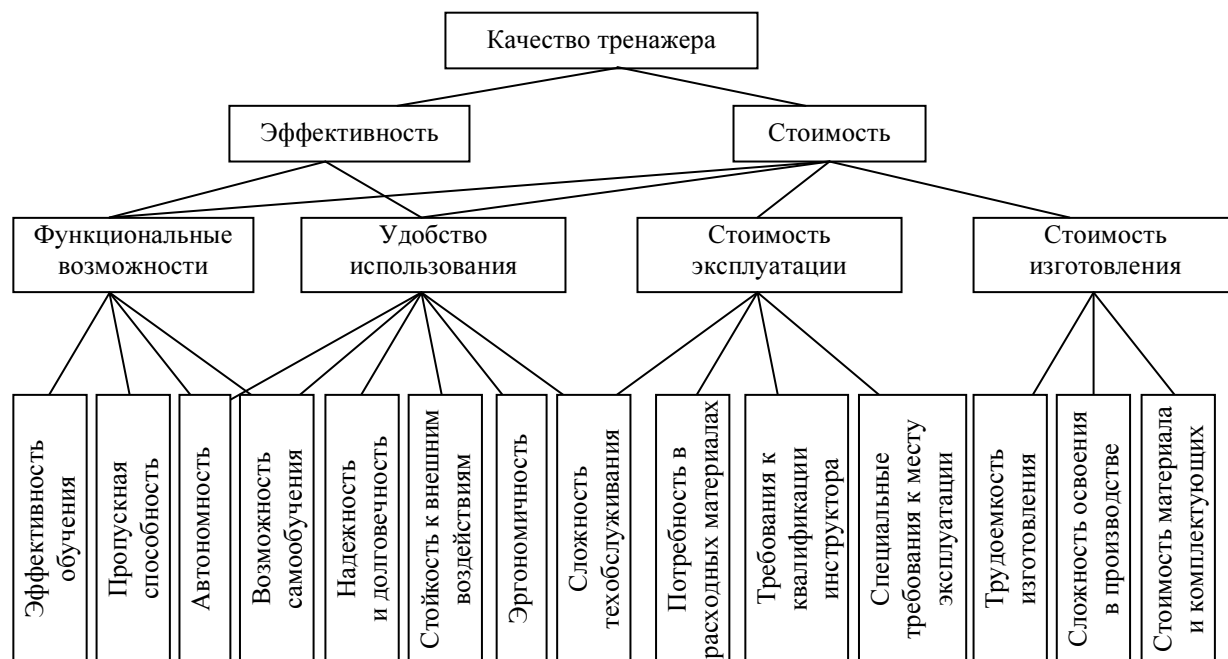


Рис. 2

Декомпозиция элементов 4-го уровня иерархии показателей качества ТОС на элементы 5-го уровня представлена в табл. 2. Общее число элементов иерархии равно 66 (включая корневой элемент).

В качестве способа опроса экспертов об относительной значимости элементов иерархии было выбрано заочное анкетирование, т. е. прямая связь между экспертами при формировании и выставлении оценок была не предусмотрена. Данная форма опроса экспертов была выбрана как наиболее отвечающая следующим требованиям, предъявленным к процедуре опроса экспертов: 1) сведение к минимуму фактора суггестии, проявляющегося при непосредственном общении экспертов и не позволяющего получить индивидуальное мнение каждого эксперта в чистом виде; 2) упрощение организационной составляющей процедуры получения экспертных мнений; 3) сокращение сроков проведения опроса экспертов.

Задача экспертов заключалась в формировании матриц парных сравнений путем парного сравнения элементов иерархии показателей качества ТОС друг с другом по вербально-числовой шкале отношений, используемой в методе анализа иерархий [6], относительно степени их воздействия на вышележащий элемент, с которым они связаны дугами. В результате описанной процедуры опроса восьми предварительно отобранных экспертов было получено 152 матрицы парных сравнений.

После опроса восьми экспертов каждому из 19 декомпозируемых элементов верхних уровней иерархии показателей качества ТОС соответствовало 8 матриц парных сравнений элементов нижележащих уровней иерархии относительно степени их воздействия на рассматриваемый элемент, связанный дугами с этими нижележащими элементами. Чтобы вычислить весовые коэффициенты, отражающие относительную значимость элементов иерархии, для каждого из 19 декомпозируемых элементов верхних уровней иерархии был осуществлен переход от восьми индивидуальных матриц парных сравнений к одной обобщенной матрице парных сравнений, вычисляемой агрегированием восьми индивидуальных матриц парных сравнений в соответствии с процедурой модификации метода анализа иерархий для решения задач группового выбора, предложенной в [7]:

$$\bar{\mathbf{B}} = \prod_{k=1}^m \mathbf{B}_k^{q_k} = (\bar{b}_{ij})_{i=1, j=1}^{n, n},$$

$$\bar{b}_{ij} = \sum_{k=1}^m q_k \sqrt[m]{\prod_{k=1}^m b_{kij}^{q_k}},$$

где  $\bar{\mathbf{B}}$  – обобщенная матрица парных сравнений, получаемая агрегированием индивидуальных матриц парных сравнений  $\mathbf{B}_k$ ;  $q_k$  – степень, в которую возводится каждый элемент  $b_{kij}$  матрицы  $\mathbf{B}_k$ , значение которой определяется обобщенной компетентностью  $k$ -го эксперта;  $m$  – число экспертов;  $n$  – размер матрицы парных сравнений, определяемый числом сравниваемых элементов иерархии.

При выполнении агрегирования индивидуальных матриц парных сравнений учитывались: 1) компетентность каждого из экспертов, сформировавших матрицы парных сравнений; 2) согласованность экспертных мнений, представленных в виде матриц парных сравнений (при этом использовался критерий согласованности парных сравнений, приведенный в [7]).

Учитывая большой объем вычислений, связанный с агрегированием индивидуальных матриц парных сравнений и получением обобщенной матрицы для каждого из 19 декомпозируемых элементов верхних уровней иерархии показателей качества, анализ и обработка экспертной информации осуществлялись с помощью специально разработанного программного модуля оценки качества тренажеров, проходящего апробацию в ОАО «Центральное конструкторское бюро аппаратостроения» (г. Тула). Результаты обработки, представляющие собой локальные и глобальные коэффициенты относительной значимости элементов иерархии показателей качества ТЭС, сведены в табл. 2.

Таблица 2

Элемент-предок	Элемент-потомок	Локальный приоритет потомка	Глобальный приоритет потомка
Качество тренажера	Эффективность	0,698	0,698
Качество тренажера	Стоимость	0,302	0,302
Эффективность	Функциональные возможности	0,656	0,628
Эффективность	Удобство использования	0,344	0,329
Стоимость	Функциональные возможности	0,563	0,628
Стоимость	Удобство использования	0,295	0,329
Стоимость	Стоимость эксплуатации	0,041	0,012
Стоимость	Стоимость изготовления	0,101	0,030
Функциональные возможности	Эффективность обучения	0,357	0,224
Функциональные возможности	Пропускная способность	0,224	0,141
Функциональные возможности	Автономность	0,246	0,268
Функциональные возможности	Возможности режима самообучения	0,172	0,187
Удобство использования	Автономность	0,344	0,268
Удобство использования	Стойкость к внешним воздействиям	0,085	0,028
Удобство использования	Надежность и долговечность	0,136	0,045
Удобство использования	Эргономичность	0,097	0,032
Удобство использования	Сложность технического обслуживания	0,097	0,034
Удобство использования	Возможности режима самообучения	0,240	0,187
Стоимость изготовления	Стоимость материалов и комплектующих	0,458	0,014
Стоимость изготовления	Сложность освоения в производстве	0,201	0,006
Стоимость изготовления	Трудоемкость изготовления	0,340	0,010
Стоимость эксплуатации	Сложность технического обслуживания	0,615	0,040
Стоимость эксплуатации	Потребность в расходных материалах	0,092	0,001
Стоимость эксплуатации	Требования к квалификации инструктора	0,206	0,002
Стоимость эксплуатации	Специальные требования к месту эксплуатации	0,087	0,001
Эффективность обучения	Полнота и качество воспроизведения учебной информации	0,252	0,056
Эффективность обучения	Полнота и качество реализации алгоритма боевой работы	0,257	0,058
Эффективность обучения	Полнота и качество контроля за процессом обучения	0,187	0,042
Эффективность обучения	Адаптивность учебных программ	0,304	0,218
Пропускная способность	Адаптивность учебных программ	0,326	0,218
Пропускная способность	Возможность обучения группы операторов	0,099	0,014
Пропускная способность	Возможность работы от автономного источника питания	0,216	0,114
Пропускная способность	Возможность работы в режиме самообучения	0,110	0,016
Пропускная способность	Безотказность	0,249	0,062

Элемент-предок	Элемент-потомок	Локальный приоритет потомка	Глобальный приоритет потомка
Автономность	Возможность работы от автономного источника питания	0,310	0,114
Автономность	Питание от стандартной электросети	0,690	0,185
Возможности режима самообучения	Адаптивность учебных программ	0,554	0,218
Возможности режима самообучения	Самообучение при теоретическом обучении	0,164	0,031
Возможности режима самообучения	Самообучение при тренировках	0,282	0,053
Эргономичность	Дизайн	0,171	0,005
Эргономичность	Качество композиционного решения	0,214	0,007
Эргономичность	Качество производственного исполнения	0,275	0,009
Эргономичность	Учет психофизиологических возможностей человека	0,147	0,005
Эргономичность	Обеспечение комфортных условий деятельности	0,194	0,006
Стойкость к внешним воздействиям	Стойкость к воздействию повышенных температур	0,253	0,007
Стойкость к внешним воздействиям	Стойкость к воздействию пониженных температур	0,238	0,007
Стойкость к внешним воздействиям	Тропикоустойчивость	0,144	0,004
Стойкость к внешним воздействиям	Стойкость к воздействию ударов и вибраций	0,208	0,006
Стойкость к внешним воздействиям	Стойкость к воздействию электромагнитных полей	0,157	0,004
Надежность и долговечность	Безотказность	0,599	0,185
Надежность и долговечность	Ремонтопригодность	0,100	0,004
Надежность и долговечность	Технический ресурс	0,109	0,005
Надежность и долговечность	Энергопотребление	0,080	0,004
Надежность и долговечность	Гарантии поставщика	0,112	0,005
Сложность технического обслуживания	Массогабаритные характеристики	0,118	0,005
Сложность технического обслуживания	Полнота и достаточность комплектов ЗИП	0,132	0,005
Сложность технического обслуживания	Требования к квалификации обслуживающего персонала	0,199	0,008
Сложность технического обслуживания	Возможность восстановления ПО без вызова изготовителя	0,191	0,008
Сложность технического обслуживания	Требования к условиям эксплуатации	0,109	0,004
Сложность технического обслуживания	Блочность и модульность конструкции	0,252	0,013
Потребность в расходных материалах	Потребность в подзарядке аккумуляторов и замене батарей	0,356	0,001
Потребность в расходных материалах	Потребность в ГСМ	0,241	0,001
Потребность в расходных материалах	Потребность в расходных материалах для ЭВМ	0,402	0,001
Стоимость материалов и комплектующих	Стоимость материалов	0,323	0,004
Стоимость материалов и комплектующих	Стоимость комплектующих	0,397	0,006
Стоимость материалов и комплектующих	Стоимость блоков и узлов по межзаводской кооперации	0,280	0,004
Трудоемкость изготовления	Блочность и модульность конструкции	0,324	0,013
Трудоемкость изготовления	Серийность производства	0,161	0,002
Трудоемкость изготовления	Средняя точность изготовления	0,096	0,001
Трудоемкость изготовления	Средняя чистота обработки	0,099	0,001
Трудоемкость изготовления	Коэффициент использования материалов	0,118	0,001

Элемент-предок	Элемент-потомок	Локальный приоритет потомка	Глобальный приоритет потомка
Трудоемкость изготовления	Потребность в новых техпроцессах	0,202	0,004
Сложность освоения в производстве	Потребность в новых техпроцессах	0,375	0,004
Сложность освоения в производстве	Потребность в приобретении нового оборудования	0,222	0,001
Сложность освоения в производстве	Потребность в специальной оснастке	0,157	0,001
Сложность освоения в производстве	Потребность в квалификации исполнителей	0,245	0,002

Построенная иерархия показателей качества используется в ОАО «Центральное конструкторское бюро аппаратостроения» при экспертном оценивании качества разрабатываемых ТОС.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Магид С. И. Нормативно-технические требования и современная реализация тренажеров для обеспечения надежности оперативного персонала на электроэнергетических объектах // Энергосбережение и водоподготовка. 2005. № 6. С. 23–34.
2. Магид С. И. Технические и программные средства для обучения персонала – стандарты, нормы и реализация // Теплоэнергетика. 2001. № 10. С. 29–32.
3. Бурков Е. А., Падерно П. И., Пахарьков Г. Н. Экспертиза: системные проблемы и пути их решения при выборе медицинской аппаратуры // Биотехносфера. 2010. № 2. С. 6 – 14.
4. Пельц Д., Эндриус Ф. Ученые в организациях. М.: Прогресс, 1973.
5. Шибанов Г. П. Количественная оценка деятельности человека в системах человек–техника. М.: Машиностроение, 1983.
6. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993.
7. Бурков Е. А., Евграфов В. Г., Падерно П. И. Критерий согласованности парных сравнений // Информационно-управляющие системы. 2011. № 3. С. 57–60.

*E. A. Burkov, V. N. Sokolov*

#### CREATION OF HIERARCHY OF INDICATORS OF QUALITY OF TRAINING SYSTEMS

*The paper considers the determination of the coefficients of the relative importance of the elements of a hierarchy of indicators of quality of training systems using the analytic hierarchy process modification for solving problems of group choice.*

**Simulators, analytic hierarchy process, expert estimations**

УДК 519.81

*П. И. Падерно, А. В. Смирнов*

## **ОЦЕНКА БЕЗОШИБОЧНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ФРАГМЕНТОВ АЛГОРИТМОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ ОШИБОК**

*Описывается функциональная структура «рабочая операция – контроль функционирования», в которой возможны ошибки различных типов и их обнаружение. Получены необходимые аналитические выражения.*

**Различные типы ошибок, рабочая операция, многомерный контроль**

Предлагается новый подход к оценке безошибочности отдельных фрагментов алгоритмов дискретной деятельности, отличающийся от традиционного [1], [2] возможностью существования различных видов ошибок в деятельности оператора, их многомерного кон-

троля и исправления. Рассмотрен фрагмент дискретной деятельности, содержащий многомерный контроль, при котором контрольная операция анализирует результаты всех ранее проведенных действий (рабочих операций). Результатами контроля могут являться следующие исходы (события):

$B_0$  – контроль признал выполнение проверяемой (контролируемой) операции правильным;  $B_1$  – контроль признал, что в выполненной рабочей операции допущена ошибка типа  $A_1$ ;  $B_2$  – контроль признал, что в выполненной рабочей операции допущена ошибка типа  $A_2$ , и т. д., вплоть до последней  $B_k$  – контроль признал, что в выполненной рабочей операции допущена ошибка типа  $A_k$  (рис. 1).

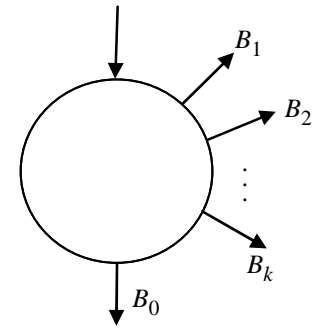


Рис. 1

Характеристики правильности и ошибочности контроля могут быть представлены в виде следующей матрицы:

$$V = \begin{pmatrix} V_{00} & V_{01} & \dots & V_{0j} & \dots & V_{0k} \\ V_{10} & V_{11} & \dots & V_{1j} & \dots & V_{1k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ V_{i0} & V_{i1} & \dots & V_{ij} & \dots & V_{ik} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ V_{k0} & V_{k1} & \dots & V_{kj} & \dots & V_{kk} \end{pmatrix} = (V_{ij}),$$

где  $V_{ij}$  – вероятности того, что совершенная ошибка типа  $A_i$  была в результате контрольной операции признана ошибкой типа  $A_j$  ( $i, j = 0, 1, \dots, k$ ). При этом необходимо отметить тот факт, что диагональные элементы матрицы  $V$  достаточно близки к 1, т. е. вероятность правильного распознавания ошибок достаточно велика. Среднее время проведения зависит, по-видимому, от результатов контроля, так как оно возрастает, если предполагается серьезная ошибка в рабочей операции. В данном случае будем считать время контроля известным и равным  $T_{V_k}$ .

**Рабочая операция с возможными различными ошибками и многомерным контролем.**

Рассмотрим типовой случай, когда после завершения рабочей операции, в процессе выполнения которой могут произойти различные ошибки, производится соответствующий многомерный контроль (рис. 2). Пусть известны вектор вероятностей ошибок для рабочей операции  $\beta = (\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k)$ , матрица вероятностей ошибок для многомерного контроля  $V$  и соответствующие временные характеристики, отражающие среднее время выполнения рабочей операции  $T_{P_k}$  и среднее время выполнения операции контроля  $T_{V_k}$ .

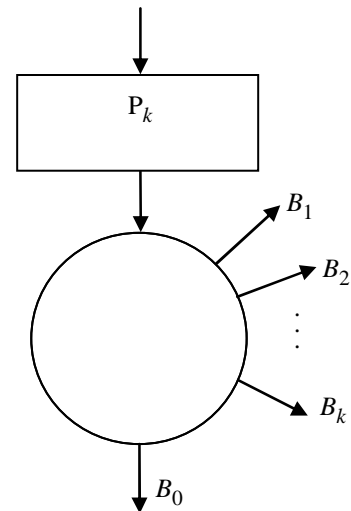


Рис. 2

Вероятностный вектор  $\gamma = (\gamma_0, \gamma_1, \dots, \gamma_k)$ , отражающий вероятности исходов  $B_0, B_1, \dots, B_k$  соответственно, может быть найден по следующей формуле:  $\gamma = \beta V$  или, в более развернутом виде:

$$\gamma_i = \sum_{j=0}^k \beta_j V_{ji}, i = 0, 1, \dots, k.$$

Введем в рассмотрение набор условных вероятностей:

$$\alpha_j = \frac{\beta_j V_{ji}}{\gamma_i} = \frac{\beta_j V_{ji}}{\sum_{i=0}^k \beta_j V_{ji}}, j = 0, 1, \dots, k,$$

которые означают правильное распознавание ошибки  $j$ -го типа при условии, что контроль установил факт совершения ошибки  $j$ -го типа.

**Процесс устранения ошибок.** Пусть по результатам контроля принято решение о том, что при выполнении рабочей операции возникли ошибки  $j$ -го типа (исход  $B_j$ ). Тогда выполняется следующий набор операций. Результат контрольной операции проверяется (подтверждается). В случае подтверждения результата (исхода  $B_j$ ) производится комплекс операций, направленных на устранение допущенных ошибок, после чего основной процесс продолжается. Если проверка не подтвердила полученного результата, то производится заключительный контроль (полный контроль), который практически не принимает во внимание результаты предыдущего контроля и не делает ошибок. Далее устраняются выявленные ошибки и продолжается основной процесс. При этом по умолчанию будем предполагать, что предыдущие контрольные операции не внесли (ни положительных, ни отрицательных) изменений в результат рабочей операции.

На рис. 3 представлен фрагмент блок-схемы процесса подтверждающего контроля и последующих операций.

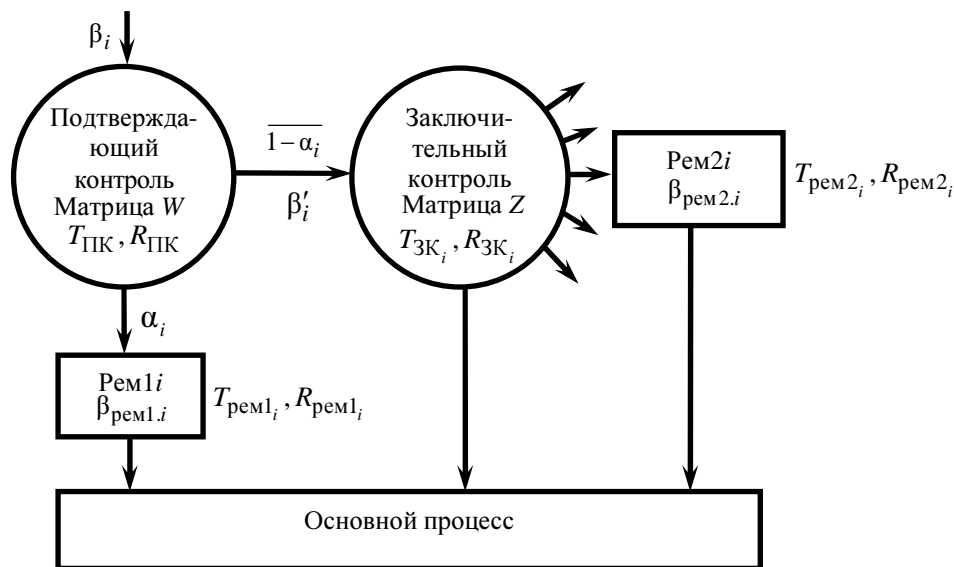


Рис. 3



После приведения к типовой функциональной структуре получим временные и ресурсные характеристики:

$$T = T_{\text{ПК}} + \alpha_i T_{\text{рем}1_i} + (1 - \alpha_i) \left[ T_{\text{ЗК}} + \sum_{i=1}^k \beta'_i T_{\text{рем}2_i} \right],$$

$$R = R_{\text{ПК}} + \alpha_i R_{\text{рем}1_i} + (1 - \alpha_i) \left[ R_{\text{ЗК}} + \sum_{i=1}^k \beta'_i R_{\text{рем}2_i} \right].$$

Рассмотрим упрощенную (без ПК) структуру «рабочая операция с возможными различными ошибками и двумя типами контроля: контроль безошибочности (КБ) и заключительный контроль (ЗК)»:

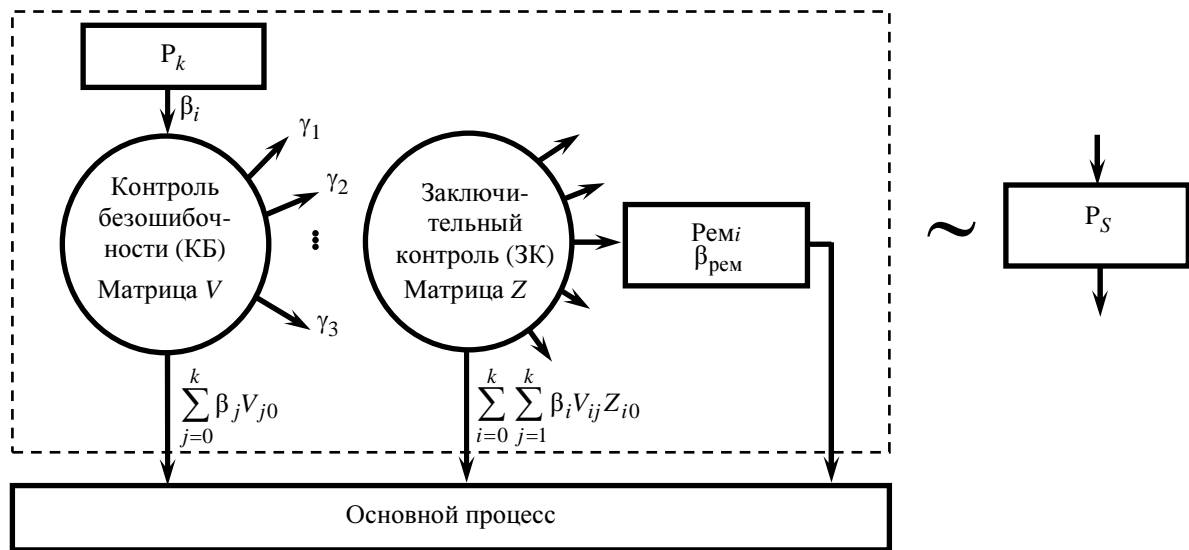


Рис. 4

Считаем, что ошибки расположены по значимости, т. е. при ремонте ошибки с большим номером происходит ремонт ошибок и с меньшими номерами. Предполагаем, что предыдущие контрольные и ремонтные операции не вносят (ни положительных, ни отрицательных) изменений в результат рабочей операции. Заключительный контроль не принимает во внимание результаты КБ.

На рис. 5 представлен алгоритм работы этой структуры, состоящий из следующих блоков:

1. Рабочая операция.
2. Контроль безошибочности.
3. Операция безошибочна?
4. Заключительный контроль.
5. Операция безошибочна?
6. Ремонт.

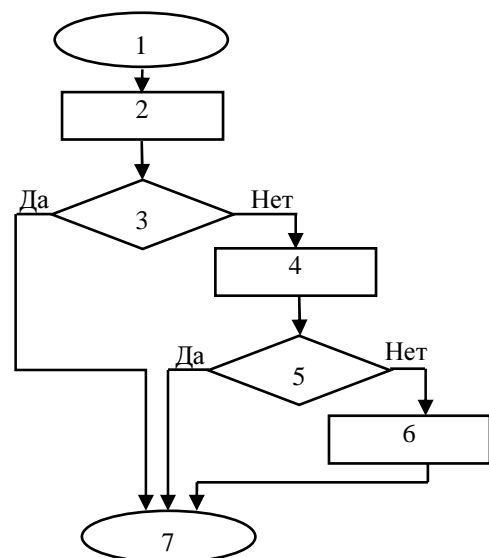


Рис. 5

7. Основная операция.

Возьмем случай с двумя типами ошибок:

1. Контроль безошибочности:

$$\beta = (\beta_0, \beta_1, \beta_2),$$

$$V = \begin{pmatrix} V_{00} & V_{01} & V_{02} \\ V_{10} & V_{11} & V_{12} \\ V_{20} & V_{21} & V_{22} \end{pmatrix}.$$

Проводим контроль:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Хорошо} \qquad \text{Брак} \\ \gamma_0 = \beta_0 V_{00} + (\beta_1 V_{10} + \beta_2 V_{20}), \\ \gamma_1 = \beta_1 V_{11} + \beta_0 V_{01} + \beta_2 V_{21}, \\ \gamma_2 = \beta_2 V_{22} + \beta_0 V_{02} + \beta_1 V_{12}. \end{array} \right\} \text{Идут на подтверждающий контроль}$$

2. Заключительный контроль.

На входе:  $\gamma = (\gamma'_0, \gamma'_1, \gamma'_2)$ , где  $\gamma'_0 = \beta_0 V_{01} + \beta_0 V_{02}$ ,  $\gamma'_1 = \beta_1 V_{11} + \beta_1 V_{12}$ ,  $\gamma'_2 = \beta_2 V_{22} + \beta_2 V_{21}$ ;

$$Z = \begin{pmatrix} Z_{00} & Z_{01} & Z_{02} \\ Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{20} & Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix}, \text{ причём } Z_{00}, Z_{11}, Z_{22} \text{ очень близки к единице.}$$

Следует отметить, что даже при такой схеме контроля, заключительного контроля и системе исправления ошибок в основной процесс может быть включена операция с невыявленными ошибками. Таким образом, данная блок-схема может быть агрегирована до одной рабочей операции  $P_S$ , характеристики которой могут быть вычислены по следующим формулам:

$$\beta_{S_0} = \beta_0 V_{00} + \overbrace{\sum_{j=1}^k \beta_0 V_{0j} Z_{00}}^{\text{С КБ}} + \overbrace{\sum_{j=1}^k \sum_{n=1}^k \beta_0 V_{0j} Z_{0n}}^{\text{Когда не было ошибок. С ЗК без ремонта}} + \overbrace{\sum_{j=1}^k \sum_{n=1}^k \beta_0 V_{0j} Z_{0n}}^{\text{Когда не было ошибок. С ЗК после ремонта}} + \overbrace{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \sum_{m=i}^k ((\beta_{\text{рем}2.m}) \beta_i V_{ij} Z_{im})}^{\text{После удачного ремонта } i\text{-х ошибок в ЗК}},$$

$$\beta_{S_1} = \beta_1 V_{10} + \sum_{j=1}^k \beta_1 V_{1j} Z_{10} + \sum_{j=1}^k \sum_{n=1}^k ((1 - \beta_{\text{рем}2.j}) \beta_1 V_{1j} Z_{1n}),$$

.....

$$\beta_{S_i} = \beta_i V_{i0} + \overbrace{\sum_{j=1}^k \beta_i V_{ij} Z_{i0}}^{\text{С КБ}} + \overbrace{\sum_{j=1}^k \sum_{n=1}^k ((1 - \beta_{\text{рем}2.n}) \beta_i V_{ij} Z_{in})}^{\text{Из ЗК без ремонта}} + \overbrace{\sum_{j=1}^k \sum_{n=1}^k ((1 - \beta_{\text{рем}2.n}) \beta_i V_{ij} Z_{in})}^{\text{Из ЗК с неудавшемся ремонтом}} + \overbrace{\sum_{j=1}^k \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^i ((\beta_{\text{рем}2.n}) \beta_i V_{ij} Z_{in})}^{\text{Из ЗК с ремонтом меньшей значимости}}.$$

Для большей наглядности на рис. 6 представлены граф состояний данной структуры и ее таблица вероятностей.

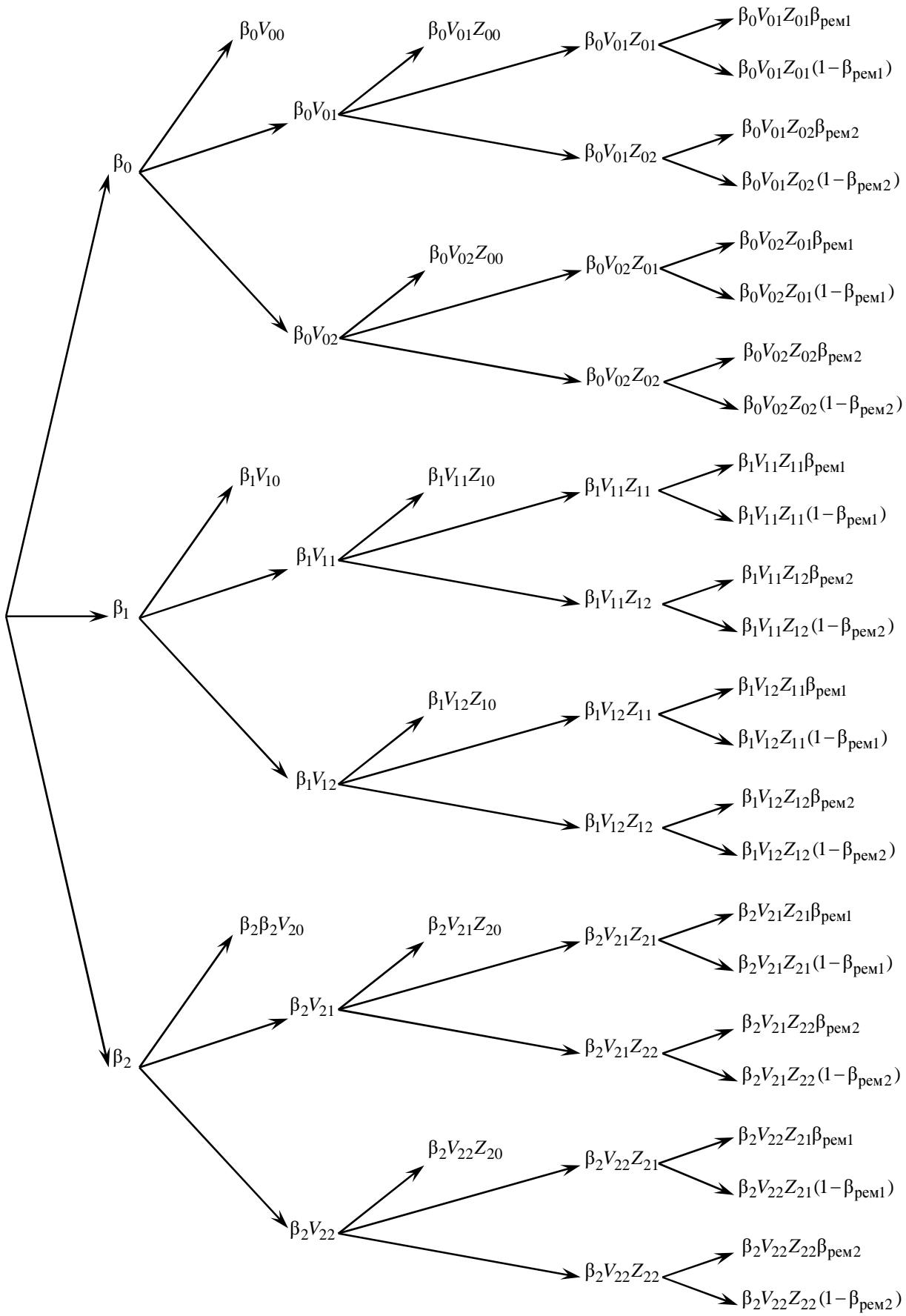


Рис. 6

Описание вероятностей функциональной структуры

Состояние		Описание		
β <sub>0</sub> Ошибка не было	β <sub>0</sub> V <sub>00</sub>		Контроль признал безошибочность. Возобновляется Основная операция (ε 0) (правильно)	
	β <sub>0</sub> V <sub>01</sub> Контроль признал ошибку 1-го типа	β <sub>0</sub> V <sub>01</sub> Z <sub>00</sub>		ЗК признал безошибочность. Без ремонта (ε 0) (правильно)
		β <sub>0</sub> V <sub>01</sub> Z <sub>01</sub>	β <sub>0</sub> V <sub>01</sub> Z <sub>01</sub> β <sub>рем1</sub>	ЗК признал ошибку 1-го типа. Элемент был отремонтирован (ε 0)
			β <sub>0</sub> V <sub>01</sub> Z <sub>01</sub> (1 - β <sub>рем1</sub> )	ЗК признал ошибку 1-го типа. Элемент не был отремонтирован (ε 0)
		β <sub>0</sub> V <sub>01</sub> Z <sub>02</sub>	β <sub>0</sub> V <sub>01</sub> Z <sub>02</sub> β <sub>рем2</sub>	ЗК признал ошибку 2-го типа. Элемент был отремонтирован (ε 0)
	β <sub>0</sub> V <sub>01</sub> Z <sub>02</sub> (1 - β <sub>рем2</sub> )		ЗК признал ошибку 1-го типа. Элемент не был отремонтирован (ε 0)	
	β <sub>0</sub> V <sub>02</sub> Контроль признал ошибку 2-го типа	β <sub>0</sub> V <sub>02</sub> Z <sub>00</sub>		ЗК признал безошибочность. Без ремонта (ε 0) (правильно)
		β <sub>0</sub> V <sub>02</sub> Z <sub>01</sub>	β <sub>0</sub> V <sub>02</sub> Z <sub>01</sub> β <sub>рем1</sub>	ЗК признал ошибку 1-го типа. Элемент был отремонтирован (ε 0)
			β <sub>0</sub> V <sub>02</sub> Z <sub>01</sub> (1 - β <sub>рем1</sub> )	ЗК признал ошибку 1-го типа. Элемент не был отремонтирован (ε 0)
		β <sub>0</sub> V <sub>02</sub> Z <sub>02</sub>	β <sub>0</sub> V <sub>02</sub> Z <sub>02</sub> β <sub>рем2</sub>	ЗК признал ошибку 2-го типа. Элемент был отремонтирован (ε 0)
β <sub>0</sub> V <sub>02</sub> Z <sub>02</sub> (1 - β <sub>рем2</sub> )	ЗК признал ошибку 2-го типа. Элемент был отремонтирован (ε 0)			
β <sub>1</sub> Была ошибка 1-го типа	β <sub>1</sub> V <sub>10</sub>		Контроль признал безошибочность. Возобновляется Основная операция (ε 1) (брак)	
	β <sub>1</sub> V <sub>11</sub> Контроль признал ошибку 1-го типа	β <sub>1</sub> V <sub>11</sub> Z <sub>10</sub>		ЗК признал безошибочность. Без ремонта (ε 1) (брак)
		β <sub>1</sub> V <sub>11</sub> Z <sub>11</sub>	β <sub>1</sub> V <sub>11</sub> Z <sub>11</sub> β <sub>рем1</sub>	ЗК признал ошибку 1-го типа. Элемент был отремонтирован (ε 0)
			β <sub>1</sub> V <sub>11</sub> Z <sub>11</sub> (1 - β <sub>рем1</sub> )	ЗК признал ошибку 1-го типа. Элемент не был отремонтирован (ε 1)
		β <sub>1</sub> V <sub>11</sub> Z <sub>12</sub>	β <sub>1</sub> V <sub>11</sub> Z <sub>12</sub> β <sub>рем2</sub>	ЗК признал ошибку 2-го типа. Элемент был отремонтирован (ε 0)
	β <sub>1</sub> V <sub>11</sub> Z <sub>12</sub> (1 - β <sub>рем2</sub> )		ЗК признал ошибку 1-го типа. Элемент не был отремонтирован (ε 1)	
	β <sub>1</sub> V <sub>12</sub> Контроль признал ошибку 2-го типа	β <sub>1</sub> V <sub>12</sub> Z <sub>10</sub>		ЗК признал безошибочность. Без ремонта (ε 2) (брак)
		β <sub>1</sub> V <sub>12</sub> Z <sub>11</sub>	β <sub>1</sub> V <sub>12</sub> Z <sub>11</sub> β <sub>рем1</sub>	ЗК признал ошибку 1-го типа. Элемент был отремонтирован (ε 0)
			β <sub>1</sub> V <sub>12</sub> Z <sub>11</sub> (1 - β <sub>рем1</sub> )	ЗК признал ошибку 1-го типа. Элемент не был отремонтирован (ε 1)
		β <sub>1</sub> V <sub>12</sub> Z <sub>12</sub>	β <sub>1</sub> V <sub>12</sub> Z <sub>12</sub> β <sub>рем2</sub>	ЗК признал ошибку 2-го типа. Элемент был отремонтирован (ε 0)
β <sub>1</sub> V <sub>12</sub> Z <sub>12</sub> (1 - β <sub>рем2</sub> )	ЗК признал ошибку 2-го типа. Элемент не был отремонтирован (ε 1)			
β <sub>2</sub> Была ошибка 2-го типа	β <sub>2</sub> V <sub>20</sub>		Контроль признал безошибочность. Возобновляется Основная операция (ε 2) (брак)	
	β <sub>2</sub> V <sub>21</sub> Контроль признал ошибку 1-го типа	β <sub>2</sub> V <sub>21</sub> Z <sub>20</sub>		ЗК признал безошибочность. Без ремонта (ε 2) (брак)
		β <sub>2</sub> V <sub>21</sub> Z <sub>21</sub>	β <sub>2</sub> V <sub>21</sub> Z <sub>21</sub> β <sub>рем1</sub>	ЗК признал ошибку 1-го типа. Элемент не был отремонтирован (ε 2), так как рем1 не ремонтирует ошибку 2-го типа
			β <sub>2</sub> V <sub>21</sub> Z <sub>21</sub> (1 - β <sub>рем1</sub> )	ЗК признал ошибку 1-го типа. Элемент не был отремонтирован (ε 2)
		β <sub>2</sub> V <sub>21</sub> Z <sub>22</sub>	β <sub>2</sub> V <sub>21</sub> Z <sub>22</sub> β <sub>рем2</sub>	ЗК признал ошибку 2-го типа. Элемент был отремонтирован (ε 0)
	β <sub>2</sub> V <sub>21</sub> Z <sub>22</sub> (1 - β <sub>рем2</sub> )		ЗК признал ошибку 2-го типа. Элемент не был отремонтирован (ε 2)	
	β <sub>2</sub> V <sub>22</sub> Контроль признал ошибку 2-го типа	β <sub>2</sub> V <sub>22</sub> Z <sub>20</sub>		ЗК признал безошибочность. Без ремонта (ε 2) (брак)
		β <sub>2</sub> V <sub>22</sub> Z <sub>21</sub>	β <sub>2</sub> V <sub>22</sub> Z <sub>21</sub> β <sub>рем1</sub>	ЗК признал ошибку 1-го типа. Элемент не был отремонтирован (ε 2), так как рем1 не ремонтирует ошибку 2-го типа
			β <sub>2</sub> V <sub>22</sub> Z <sub>21</sub> (1 - β <sub>рем1</sub> )	ЗК признал ошибку 1-го типа. Элемент не был отремонтирован (ε 2)
		β <sub>2</sub> V <sub>22</sub> Z <sub>22</sub>	β <sub>2</sub> V <sub>22</sub> Z <sub>22</sub> β <sub>рем2</sub>	ЗК признал ошибку 2-го типа. Элемент был отремонтирован (ε 0)
β <sub>2</sub> V <sub>22</sub> Z <sub>22</sub> (1 - β <sub>рем2</sub> )	ЗК признал ошибку 2-го типа. Элемент не был отремонтирован (ε 2)			

Подведем итоги. Проанализирована и обоснована необходимость учета различных типов ошибок при выполнении алгоритмов деятельности ввиду неодинаковости их последствий для функционирования системы в целом и предложен подход к аналитической оценке вероятностей этих ошибок.

2. Проведенная оценка фрагмента алгоритма деятельности с рабочей операцией, в которой возможны ошибки различных видов, и многомерным контролем показала, что новый подход применим и позволяет получить необходимые результаты.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Информационно-управляющие человеко-машинные системы. Исследование, проектирование, испытание: Справ / Под общей ред. А. И. Губинского, В. Г. Евграфова. М.: Машиностроение, 1993.
2. Падерно П. И., Попечителей Е. П. Надежность и эргономика биотехнических систем // Под общей ред. проф. Е. П. Попечителя. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2007.

*P. I. Paderno, A. V. Smirnov*

#### ESTIMATION OF CORRECTNESS EXECUTION FRAGMENTS OF ALGORITHMS FOR DIFFERENT TYPES OF ERRORS

*The analysis of the execution typical functional structure "working operation" was conducted - control of the functioning, in which different types of mistakes are possible and detection of those errors. Necessary analytical expressions were found.*

**Different types of errors, work operation, multidimensional control**

УДК 004-027.21; 004:510.67

*Б. А. Аль-Таяр, М. М. Музанна, С. А. Яковлев*

### ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕТЕЙ ДОСТАВКИ КОНТЕНТА

*Рассматриваются основные методы доставки, используемые в сетях доставки контента, а также проанализированы процессы доставки. Описан выбор критериев эффективности сетей доставки контента.*

**Сеть доставки контента, эффективность сети связи, суррогатные серверы**

Пользователи Интернета склонны использовать его для «ресурсоемких» приложений (которые включают такой контент, как видео, аудио по запросу и распределенные базы данных), и в то же время все больше приложений (таких, как электронная торговля, электронное обучение и т. д.) опираются на него. В связи с этим сети доставки контента CDN (Content Distribution Networks – CDN) все чаще используются для распространения данных в современном Интернете, предоставляя чувствительный баланс между затратами для веб-контент-провайдеров и качеством услуг для веб-клиентов [1].

Сеть доставки контента CDN представляет собой множество серверов, называемых суррогатными серверами (СС), связанных собственными или арендуемыми высокоскоростными каналами связи и размещенных по возможности ближе к потребителям информации. Сеть CDN является наложенной сетью, которая функционирует на верхних уровнях сети, используя стандартные протоколы Интернета для передачи данных. Такая сеть имеет централизованное управление и в ней возможно использование любых технологий и протоколов, в том числе частных, что позволяет добиться большей эффективности по сравнению с публичной сетью Интернет.

В основе CDN лежит 2 принципа: 1) перемещение источников информации на ближайшие к пользователям узлы сети; 2) совместное использование серверов CDN.

Применение первого принципа позволяет минимизировать расстояние, на которое приходится передавать информацию по каналам публичной сети для того, чтобы избежать влияния присущих этой сети недостатков. Для реализации этого принципа, как правило, требуется создание дорогостоящей инфраструктуры, включающей большое количество взаимосвязанных серверов по всей сети Интернет.

Применение второго принципа позволяет снизить стоимость услуг CDN для отдельных поставщиков информации, а также обеспечить более эффективное использование сети. Поэтому публичные CDN являются независимыми коммерческими операторами, предоставляющими услуги множеству поставщиков информации [2].

При предоставлении услуг по доставке контента важно контролировать показатели потоков информации, циркулирующих в системе. В контексте доставки контента показателями потоков в системе являются объем передаваемой информации и данных, скорость передачи в каналах связи, число необходимых запросов на получение и передачу требуемого контента, количество запросов за определенное время в течение суток. Перечисленные показатели потоков в сети в значительной степени зависят от применяемого метода доставки контента и его развития в ходе этого процесса, который в дальнейшем будет называться процессом доставки контента. Рассмотрим информационные потоки в ходе двух наиболее известных методов (политик аутсорсинга контента) доставки информации в практике CDN:

- потоки доставки контента только из пограничных СС;
- потоки доставки контента из пограничных СС и взаимодействие с партнерскими серверами.

Основной поток составляют запросы, поступающие от пользователей на СС и запрашиваемый пользователями контент. Процессы движения потоков информации при использовании первого и второго методов доставки показаны на рис. 2.

Сначала контент-провайдер<sup>1</sup> определяет контент или те его объекты, для которых он хотел бы использовать услуги CDN, а остальные объекты могут доставляться без участия CDN. Выбранные объекты отсылаются узлам CDN. Специально для этой цели компании, предоставляющие CDN-услуги, иногда приобретают частные компьютерные сети. В будущем эти объекты будут обновляться, заменяя устаревшие объекты в случае появления их новых версий по желанию контент-провайдера в зависимости от используемого метода выбора и обновления контента. Услуги CDN-компаний используются многими контент-провайдерами, поэтому в одном CDN-сервере будут параллельно находиться объекты контента разных контент-провайдеров, подлежащих доставке.

Первый метод доставки будем называть *некооперативной доставкой*. Разделим процесс доставки контента на 2 главных этапа:

1. Этап подготовки контента, заключающийся в следующем: а) контент-провайдер выбирает объекты контента, которые будут доставляться конечным пользователям через CDN (например, файлы изображения формата GIF или другие виды файлов); б) выбранные объекты загружаются на CDN-серверы средствами коммуникации, а остальные файлы будут загружаться прямо из самих серверов контент-провайдера.

---

<sup>1</sup> Хозяин сайта, представляющий свой контент конечным пользователям.

2. Этап доставки, заключающийся в следующем: а) конечный пользователь через свой браузер отправляет пользуясь средствами коммуникации запрос на получение контента; б) браузеру в ответ отсылается файл, содержащий базовой HTML-объект от сервера контент-провайдера, URL-адрес которого был определен при отправке запроса; в) браузер конечного пользователя обрабатывает HTML-страницу и находит в ней ссылки (измененные контент-провайдером (рис. 1) таким образом, чтобы они предварялись URL-адресом CDN-компании, серверы которой будут обслуживать клиентов) на объекты изображения формата GIF [3]; г) браузер осуществляет DNS-поиск CDN-хоста, при этом запросы передаются от корневого сервера имен полномочному серверу имен CDN-хоста; д) последний извлекает IP-адрес хоста, сделавшего запрос, и на основе специальной внутренней карты Интернета возвращает IP-адрес CDN-сервера, который более других подходит для обслуживания запроса; е) браузеру возвращается ответ с IP-адресом CDN-сервера, и он перенаправляет свой запрос с использованием полученного IP-адреса; ж) запрос обрабатывается и обслуживается CDN-сервером, а любой последующий запрос, адресованный хосту, адрес которого есть в первой части ссылки на объект, будет автоматически обслуживаться этим же CDN-сервером, поскольку IP-адрес этого хоста окажется в DNS-кеше либо на стороне клиента, либо на стороне локального сервера имен; з) в случае отсутствия запрошенных объектов на самом ближайшем CDN-сервере запрос перенаправляется на основной сервер контент-провайдера и оттуда загружаются требуемые объекты.

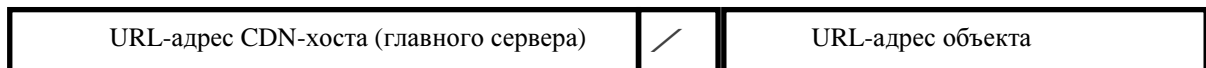


Рис. 1

На основании описанной процедуры и рис. 2, иллюстрирующего схему работы двух методов доставки контента, можно создать критерий оптимизации, который позволяет проанализировать время, затрачиваемое на доставку контента. Обозначим через  $t_1 - t_2$ ,  $t_1 - t_8$  время, затрачиваемое на выполнение всех стадий в каждом из этапов подготовки и доставки контента 1 - 2, 1 - 8 соответственно. Также обозначим через переменные  $c_1 - c_2$ ,  $c_1 - c_8$  соответственно стоимость каждой стадии в процессах подготовки и доставки контента. Тогда общая стоимость доставки

$$C_d = \sum_{i=1}^{N=2} c_{1i}t_{1i} + \sum_{i=1}^{N=8} c_{2i}t_{2i}. \quad (1)$$

Чтобы сократить стоимость доставки, показатель (1) должен быть минимизирован:

$$C_d = \min \left( \sum_{i=1}^{N=2} c_{1i}t_{1i} + \sum_{i=1}^{N=8} c_{2i}t_{2i} \right). \quad (2)$$

В правой части выражения (2) для удобства рассмотрения показано условное разбиение стоимости затрат функциональных этапов:  $c_{1i}t_{1i}$  - затраты на подготовку контента и  $c_{2i}t_{2i}$  - затраты на обслуживание пользователей.

Второй метод доставки назовем *кооперативной доставкой*. При этом методе повторяются все шаги первого метода, кроме последнего. В случае отсутствия контента на ближайшем сервере запрос направляется не на основной сервер контент-провайдера, а на со-

седние серверы. Очевидно, что главное из преимуществ второго метода заключается в уменьшении вероятности того, что основной сервер попадет в “flash crowd events” (ситуация, когда очень много пользователей одновременно хотят получить доступ к контенту).

Чтобы сформулировать необходимые требования к CDN, определим критерии доставки контента, наиболее показательные для CDN: допустимое время для доставки ( $t_{dd}$ ) – время доставки контента, за которое качество обслуживания не ухудшается (оно находится в пределах от реального времени до определенного интервала времени, после которого качество обслуживания резко ухудшается); время доставки контента ( $t_d$ ) – время, затрачиваемое на доставку данных до конечного пользователя. При этом для обеспечения качества обслуживания справедливо следующее соотношение:

$$t_{dd} \geq t_d. \quad (3)$$

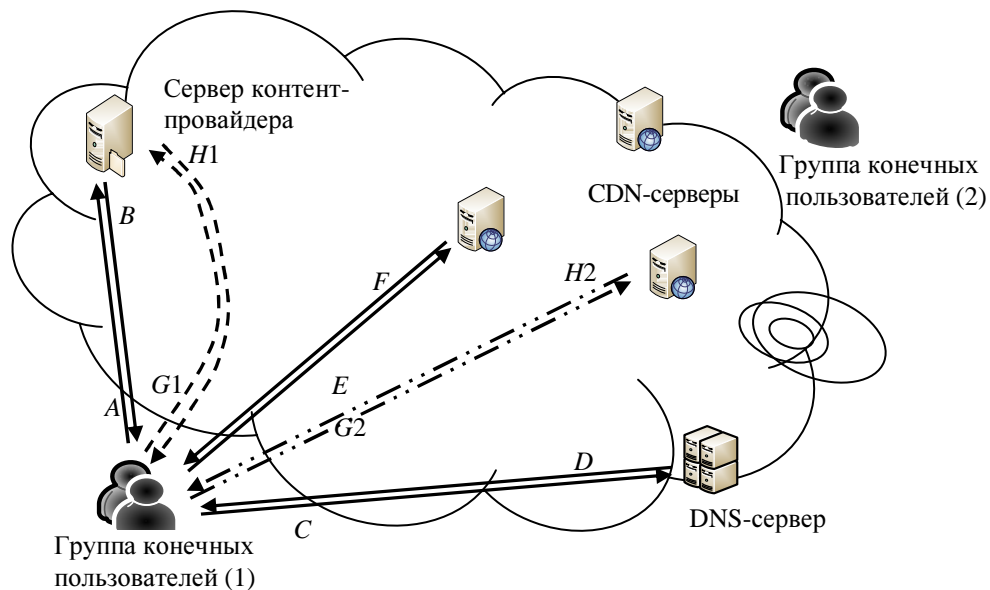


Рис. 2

На рис. 2:  $A$  – запрос контента;  $B$  – HTML-код со ссылками;  $C$  – DNS-запрос;  $D$  – ответ с IP-адресом CDN-сервера;  $E$  – запрос к ближайшему CDN-серверу;  $F$  – получение запрошенного контента. В случае отсутствия объектов контента (cache miss) на CDN-сервере: при некооперативной доставке запрос  $G1$  отправляется первичному (основному) серверу,  $H1$  – получение запрошенного контента от первичного сервера; при кооперативной доставке запрос отправляется соседним CDN-серверам,  $H2$  – получение запрошенного контента от соседних CDN-серверов.

Выражение (3) позволяет косвенно оценить качество доставки данных. Практика передачи и доставки данных указывает на тот факт, что чем меньше времени тратится на доставку контента до адресата, тем больше и качественнее услуг может быть внедрено и предоставлено клиентам. Зададимся дополнительными критериями эффективности CDN, а именно эффективностью внедрения услуг по доставке  $\mu$ . Установим связь между этим показателем и временем доставки контента  $\mu = \sigma t_d^{-1}$  ( $\sigma$  – некоторая постоянная, зависящая от вида услуги), а также стоимостью доставки  $C_d$ , рассчитываемой как сумма затрат при прохождении информации в каждом  $i$ -м этапе доставки. Формально ее значение находится по формуле (1).

Применим представленные критерии для решения задачи поиска оптимального метода доставки контента в случае передачи данных, требующих высокого приоритета качества обслуживания в интересах внедрения CDN для нашего региона.



Начальные условия задачи следующие. Регион, для которого будут предоставлены услуги по доставке контента, состоит из четырех зон  $Z_j (j = 1..4)$ , и для обслуживания пользователей региона  $CC$  размещены в точках  $P_1, P_2, P_3, P_4$ . Эти точки соответствуют следующим городам-миллионникам: Каир, Рабат, Дамаск, Сана. Допустим, что среднестатистическое количество запросов, обслуживание которых осуществляется суррогатными серверами данной CDN за определенный интервал времени, составляет: [2000, 800, 1000, 500], а также каждый из  $CC$  способен обслуживать запросы в качестве  $R_i = [1500, 3000, 1400, 300]$ . Каждая точка будет обслуживать запросы, поступающие от зоны ее ответственности, т. е. из страны, в которой она находится, и соседних стран. Примерное требуемое время в миллисекундах для доставки контента пользователям в их зоны представлено в таблице, обслуживание пользователей своей зоны происходит значительно быстрее.

Точки размещения СС	Зоны			
	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$
$P_1$	20	40	30	29
$P_2$	34	30	44	48
$P_3$	40	37	20	30
$P_4$	35	38	33	17

Расчеты проводились с использованием среды моделирования MathCad 11i [4], и были получены следующие результаты. Минимально возможные временные расходы на обслуживание запросов, поступающих от предполагаемых зон, суррогатными CDN-серверами при использовании сети доставки контента составляют 101 с. Соответственно, несложно догадаться, что обслуживание всех пользователей из одного удельного сервера с техническими характеристиками, как у суррогатных серверов без использования CDN, потребовало бы больше времени. Если нет требования по обеспечению качества обслуживания, т. е. пока выполняется соотношение  $t_{dd} \geq t_d$ , то можно доставлять весь контент традиционным способом из одного веб-сервера, не используя услуги CDN.

Результаты моделирования методов доставки контента с использованием критериев допустимого времени доставки контента, эффективности внедрения, стоимости доставки и времени доставки контента позволяют оценить оптимальные характеристики доставки контента.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Replication Based on Objects Load under a Content Distribution Network / G. Pallis, K. Stamos, A. Vakali et al. // Proc. of ICDE Workshops, 2006.
2. Пешков Л. А. Эволюция сетей доставки информации // IV Междунар. семинар «Информационные сети, системы и технологии», М., 2003. С. 66–69.
3. Джеймс Ф. Куроуз, Кит В. Росс. Компьютерные сети. Многоуровневая архитектура Интернета. СПб.: Питер, 2004.
4. Дьяков В. П. Энциклопедия Mathcad 2001i и Mathcad 11. М.: СОЛОН-Пресс, 2004. С. 506–517.

*B. A. Al-Tayar, M. M. Muthanna, S. A. Yakovlev*

#### ESTIMATION OF CONTENT DELIVERY NETWORKS EFFICIENCY

*This paper presents a review of the basic content delivery methods used in content delivery networks. The processes of delivery by cooperative and uncooperative methods are described. The efficiency criteria of content delivery networks are selected too.*

**Content delivery network, efficiency of CDN, surrogate servers**

## ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА КАК ЗАДАЧА РАЗМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

*Многие прикладные задачи размещения объектов могут быть сведены к классическим задачам планирования эксперимента (ПЭ). К числу таких задач относятся, например, рационализация сети метеостанций, планирование сети сейсмических станций и др. В статье приводятся алгоритмы Федорова построения точных D-, A- и P-оптимальных планов, адаптированные для решения данных задач.*

**Планирование эксперимента, сеть станций, критерии D- и A- оптимальности, информационная матрица, главные компоненты**

В различных прикладных областях исследования возникает так называемая задача о размещении. К числу таковых относятся, например, задача рационального размещения сети метеостанций, являющаяся классической задачей метеорологии и океанологии [1], [2], и задача оптимизации сейсмических сетей [3]. В последнее время в мировой литературе наметился подход к решению этих задач с помощью методов планирования эксперимента [4]–[6]. Цель данной статьи – дать строгое алгоритмическое обоснование данного подхода на основе использования для решения задачи о размещении алгоритмов Федорова построения точных оптимальных планов [7].

### Алгоритмы Федорова построения точных планов.

1. Предположим, что измерения  $y \in R^n$  описываются регрессионной моделью

$$M(y | x) = \eta(x, \beta), \quad Dy = \sigma^2 I,$$

где  $\eta(x, \beta)$  – функция отклика и  $\beta \in R^m$  – векторный параметр, подлежащий оцениванию. Предполагаем, что функция  $\eta(x, \beta)$  представима в виде линейной комбинации известных базисных функций  $f^T = (f_1, f_2, \dots, f_m)$  с коэффициентами  $\beta^T = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m)$ , т. е.

$$\eta(x, \beta) = f^T(x)\beta = \sum_{j=1}^m \beta_j f_j(x), \quad x \in X \subset R^k.$$

Совокупность точек

$$\varepsilon(N) = \{x_i \in X, \quad i = 1, \dots, N\}, \quad (1)$$

в которых проводятся измерения, называется ненормированным планом эксперимента. Если некоторые из точек  $x_i$  совпадают и при этом  $r_i$  – число измерений в каждой из них, то для (1) используем запись

$$\xi(N) = \left\{ \begin{array}{cccc} x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ p_1 & p_2 & \dots & p_n \end{array} \right\}, \quad p_i = \frac{r_i}{N}, \quad \sum_{i=1}^n p_i = 1,$$

где  $\xi(N)$  – нормированный план эксперимента с узлами  $x_i$  и весами  $p_i$ ;  $r_i$  – количество измерений в  $i$ -й точке плана.

Если параметр  $\beta$  оценивается по методу наименьших квадратов, то дисперсия его оценки  $\hat{\beta}$  имеет вид  $\mathbb{D}\hat{\beta} = M^{-1}(\varepsilon(N)) = D(\varepsilon(N))$ , где

$$M(\varepsilon(N)) = \sigma^{-2} \sum_{i=1}^N f(x_i) f^T(x_i) = \sigma^{-2} FF^T$$

– информационная матрица Фишера. Таким образом, появляется возможность улучшить качество оценивания  $\beta$  за счет выбора оптимального плана эксперимента  $\varepsilon^*(N)$  или, что эквивалентно,  $\xi^*(N)$ . Планы  $\varepsilon(N)$  и  $\xi(N)$  называют точными, в отличие от непрерывных планов, которые в данной статье не рассматриваются.

Наиболее востребованными в теории ПЭ и приложениях являются критерии  $D$ - и  $A$ -оптимальности, определяемые соответственно как

$$|M(\varepsilon^*(N))| = \max_{\varepsilon(N)} |M(\varepsilon(N))|, \quad \text{tr } D(\varepsilon^*(N)) = \min_{\varepsilon(N)} \text{tr } D(\varepsilon(N)). \quad (2)$$

Критерии (2) сравнивают эксперименты в пространстве параметров. Рассматриваемый далее критерий экстраполяции в точку осуществляет сравнение планов эксперимента и в пространстве контролируемых переменных  $X \subset R^k$ .

2. Федоровым в [7] предложен алгоритм построения точных  $D$ -оптимальных планов, в котором на каждой итерации измерение из некоторой точки  $x := x_j \in \varepsilon(N)$  переносится в произвольную точку  $y \in X$ , т. е. меняется только одна точка плана.  $D$ -алгоритм Федорова аналогичен покоординатному спуску, но движение точки  $x \rightarrow y$  на каждой итерации осуществляется не в направлении градиента этой точки, а в некотором другом направлении.

Пусть  $\varepsilon(N) = \{x_1, \dots, x_N\}$  – произвольный невырожденный план. Обозначим

$$d(x, y) := \text{cov}(\hat{\eta}(x), \hat{\eta}(y)) = f^T(x) D(\varepsilon(N)) f(y)$$

– ковариация оценок функции регрессии в точках  $x, y \in X$ . Функцию

$$\Delta_D(x, y) = d(y) - d(x) - [d(x)d(y) - d^2(x, y)], \quad x, y \in X,$$

назовем  $D$ -функцией Федорова. Справедлива

**Теорема 1.** (Федоров [7, с. 175]) Пусть  $\varepsilon^*(N) = \{x_1^*, \dots, x_N^*\}$ ,  $\varepsilon(N) = \{x_1, \dots, x_N\}$  –  $D$ -оптимальный и произвольный планы соответственно. Справедливы утверждения:

- для узлов  $x_j^* \in \varepsilon^*(N)$  и  $y \in X$  выполняются неравенства  $\Delta_D(x_j^*, y) \leq 0$ ;
- для узлов  $x_j \in \varepsilon(N)$  произвольного плана  $\varepsilon(N)$  существуют  $y \in X$ , такие, что

$$\Delta_D(x_j, y) \geq 0. \quad (3)$$

Утверждения теоремы 1 означают, что неравенства, противоположные (3), – необходимые условия оптимальности некоторого плана  $\varepsilon(N)$ . Если же выполняется хотя бы одно из неравенств (3), то заменой узлов  $x_{j_s} \rightarrow y_s$ , такой, что

$$\max_{i \leq j \leq N} \max_{y \in X} \Delta(x_j, y) = \Delta(x_{j_s}, y_s),$$

достигается выполнение неравенства  $\Delta(y_s, y) \leq 0$  для всех  $y \in X$  во вновь получаемом плане. На такой последовательной замене точек основан  $D$ -алгоритм Федорова поточечного построения точных  $D$ -оптимальных планов [7, с. 177].

**Пример 1.**  $D$ -алгоритм Федорова. Рассмотрим регрессионную модель вида

$$\eta(x, \beta) = \beta_1 + \beta_2 x + \beta_3 x^2 + \beta_4 x^3, \quad \lambda(x) \equiv 1, \quad -1 \leq x \leq 1,$$

для которой построим точный  $D$ -оптимальный план  $\varepsilon^*(10)$ . В качестве начального выбора равномерный план  $\varepsilon_0(10)$  вида

$$x_i = -1 + \frac{2(i-1)}{9}, \quad i = 1, \dots, 10, \quad |M(\varepsilon_0(10))| = 19.5131.$$

Крайние точки  $x_1 = -1, x_{10} = 1$  остаются неподвижными. На каждой итерации перемещается одна точка плана. Траектории движения точек плана по итерациям представлены в табл. 1 ( $s$  – номер итерации). Запись  $x_k(y)$  означает, что на соответствующей итерации точка плана  $x_k$  перемещается в точку  $y \in X$ .

Таблица 1

$s$	1	2	3	4	5
Узел	$x_5(-1)$	$x_9(+1)$	$x_2(-1)$	$x_6(-0.4588)$	$x_4(0.4288)$
$ M(\varepsilon_s(10)) $	27.2605	37.5826	41.3571	44.3433	45.2243
$s$	6	7	8	9	10
Узел	$x_3(-0.4517)$	$x_8(0.4819)$	$x_7(0.4385)$	$x_8(0.4527)$	$x_4(0.4449)$
$ M(\varepsilon_s(10)) $	46.3576	46.6750	47.1117	47.1540	47.1659
$s$	11	12	13	14	15
Узел	$x_6(-0.4470)$	$x_3(-0.4477)$	$x_7(-0.4460)$	$x_8(0.4482)$	$x_4(0.4471)$
$ M(\varepsilon_s(10)) $	47.1803	47.1819	47.1846	47.1855	47.1858
$s$	16	17	18	19	20
Узел	$x_6(-0.4471)$	$x_3(-0.4472)$	$x_7(0.4469)$	$x_8(0.4473)$	$x_7(0.4471)$
$ M(\varepsilon_s(10)) $	47.1858	47.1858	47.1858	47.1859	47.1859

Суммируя результаты в табл. 1, заключаем, что  $D$ -оптимальный план имеет вид

$$\varepsilon^*(10) = \left\{ \begin{array}{l} x_1 = -1, \quad x_2 = -0.4471, \quad x_3 = 0.4471, \quad x_4 = 1 \\ n_1 = 3, \quad n_2 = 2, \quad n_3 = 3, \quad n_4 = 2 \end{array} \right\}, \quad |M(\varepsilon^*(10))| = 47.1859.$$

Если от ненормированного плана  $\varepsilon^*(10)$  перейти к нормированному плану  $\xi^*(10)$  с весами  $p_i = n_i/10$  и вычислить  $|D(\xi^*(N))| = N^m |M(\varepsilon^*(10))|$ , то для  $N = 10, m = 4$  получим  $|D(\xi^*(10))| = 211.92$ , что полностью совпадает с результатом Федорова [7, с. 179].

**3.** Аналогично предыдущему может быть развит  $A$ -алгоритм Федорова построения  $A$ -оптимальных планов. Пусть  $\varepsilon(N) = \{x_1, \dots, x_N\}$  – произвольный невырожденный план. Обозначим

$$\varphi(x) := f^T(x)D^2(\varepsilon(N))f(x), \quad \varphi(x, y) := f^T(x)D^2(\varepsilon(N))f(y). \quad (4)$$

По аналогии с  $d(x, \varepsilon(N))$  функции (4) также будем называть функциями дисперсии. Функцию

$$\Delta_A(x, y) = [1 + d(y)]\varphi(x) - 2d(x, y)\varphi(x, y) - [1 - d(x)]\varphi(y), \quad x, y \in X,$$

назовем *A-функцией Федорова*. Справедлива

**Теорема 2.** (Федоров [7, с. 181]) Пусть  $\varepsilon^*(N) = \{x_1^*, \dots, x_N^*\}$ ,  $\varepsilon(N) = \{x_1, \dots, x_N\}$  – *A-оптимальный* и произвольный планы соответственно. Справедливы следующие утверждения:

– если  $x_j^* \in \varepsilon^*(N)$ , то  $\Delta_A(x_j^*, y) \leq 0$  для всех  $j = 1, \dots, N$ ;

– для узлов  $x_j \in \varepsilon(N)$  произвольного плана  $\varepsilon(N)$  существуют  $y \in X$ , такие, что

$$\Delta_A(x_j, y) \geq 0.$$

**Пример 2.** *A-алгоритм Федорова*. Рассмотрим ту же кубическую модель регрессии, что и в примере 1. Вычисления представлены в табл. 2 ( $N = 10$ ,  $\text{tr } D(\varepsilon_0(10)) = 5.34639$ ).

Таблица 2

$s$	1	2	3	4	5
Узел $\text{tr } D(\varepsilon_s(10))$	$x_2(-0.5170)$ 4.92316	$x_9(0.4964)$ 4.51616	$x_5(-0.4624)$ 4.27443	$x_6(0.4285)$ 4.10643	$x_3(-0.4442)$ 4.06835
$s$	6	7	8	9	10
Узел $\text{tr } D(\varepsilon_s(10))$	$x_8(0.4530)$ 4.03514	$x_7(0.4312)$ 4.01203	$x_4(-0.4140)$ 3.99671	$x_2(-0.4355)$ 3.97838	$x_9(0.4385)$ 3.96895
$s$	11	12	13	14	15
Узел $\text{tr } D(\varepsilon_s(10))$	$x_5(-0.4421)$ 3.96780	$x_6(0.4371)$ 3.96760	$x_3(-0.4422)$ 3.96759	$x_8(0.4403)$ 3.96714	$x_7(0.4385)$ 3.96700
$s$	16	17	18	19	20
Узел $\text{tr } D(\varepsilon_s(10))$	$x_4(-0.4367)$ 3.96564	$x_2(-0.4365)$ 3.96564	$x_9(0.4373)$ 3.96564	$x_5(-0.4376)$ 3.96558	$x_6(0.4375)$ 3.96558
$s$	21	22	23	24	25
Узел $\text{tr } D(\varepsilon_s(10))$	$x_3(-0.4385)$ 3.96555	$x_8(0.4382)$ 3.96553	$x_7(0.4382)$ 3.96553	$x_4(-0.4382)$ 3.96553	$x_2(-0.4379)$ 3.96552

Округляя результаты, представленные в табл. 2, заключаем, что *A-оптимальный* план имеет вид

$$\varepsilon^*(10) = \left\{ \begin{array}{l} x_1 = -1, \quad x_2 = -0.4379, \quad x_3 = 0.4379, \quad x_4 = 1 \\ n_1 = 1, \quad n_2 = 4, \quad n_3 = 4, \quad n_4 = 1 \end{array} \right\}, \quad \text{tr } D(\varepsilon^*(10)) = 3.96552.$$

**4.** С *A-критерием* тесно связан *P-критерий* экстраполяции в точку  $x_0$ , согласно которому план  $\varepsilon^*(N)$  минимизирует дисперсию прогноза  $\mathbb{D}\hat{\eta}(x_0) = d(x_0, \varepsilon(N))$  в точке  $x_0 \in Z$ , причем здесь возможен случай  $X \cap Z = \emptyset$ . Таким образом, план  $\varepsilon^*(N)$  является оптимальным для экстраполяции в точку  $x_0 \in Z$ , если

$$d(x_0, \varepsilon^*(N)) = \min_{\varepsilon(N)} d(x_0, \varepsilon(N)). \quad (5)$$

$A$ - и  $P$ - критерии объединяет то, что оба они являются линейными, но, в отличие от  $A$ -критерия,  $P$ -критерий сравнивает эксперименты в пространстве контролируемых переменных.

Функция дисперсии  $\varphi(x)$  для критерия экстраполяции в точку  $x_0 \in Z$  имеет вид

$$\varphi(x) = d^2(x, x_0, \varepsilon(N)), \quad \varphi(x, y) = d(x, x_0, \varepsilon(N))d(y, x_0, \varepsilon(N)).$$

Согласно теореме [7, с. 181, теорема 3.3.1] соответствующая критерию экстраполяции  $P$ -функция Федорова имеет вид:

$$\Delta_P(x, y) = [1 + d(y)]d^2(x, x_0) - 2d(x, y)d(x, x_0)d(y, x_0) - [1 - d(x)]d^2(y, x_0), \quad (6)$$

где  $x, y \in X$  и  $x_0 \in Z$  – точка прогноза. Функция (6) используется в алгоритме построения  $P$ -оптимальных планов точно так же, как  $D$ - и  $A$ -функции.

**Задача оптимального размещения метеостанций.** Как уже отмечалось, в метеорологии актуальна задача рационального размещения сети метеостанций, для решения которой уже давно привлекаются методы ПЭ. В свою очередь, использование методов ПЭ предполагает 2 подхода – метод спектрального анализа и метод оптимизации сети на основе оптимальной интерполяции. Первый из подходов кратко изложим, следуя [4]. Вторым подходом, изложенным в [2], представим в интерпретации авторов.

1. Метод спектрального анализа основан на представлении полей в виде разложения по определенной системе ортогональных функций. Предположим, что результаты наблюдений на  $L$  станциях  $\Omega_0 = \{\omega_1, \dots, \omega_L\}$  образуют вектор  $y = (y_1, \dots, y_L)$ , для выравнивания которого используется набор ортогональных функций  $\{f_j(\omega)\}_{j=1}^N$ ,  $N \leq L$ .

Пусть  $s_{nm}$  – ежемесячные значения сглаженных изменений метеоэлемента за  $K$  лет наблюдений,  $n = 1, \dots, N$ ,  $N = 12K$  – длина временного ряда,  $m = 1, \dots, M$  – номер метеостанции. Обозначим  $\omega_q = 2\pi q / N$  – частота  $q$ -й гармонической составляющей временного ряда  $\{s_{nm}\}$ . Разлагая  $s_{nm}$  в ряд Фурье по совокупности  $N - 1$  гармоник, можно записать

$$s_{nm} = \sum_{q=1}^{N-1} s_{nm}^{(q)}, \quad s_{nm}^{(q)} = \sum_{j=1}^M c_j^{(q)} g_{jm,n}^{(q)} = c^T g_{nm}^{(q)},$$

где  $c = (c_1^{(q)}, \dots, c_M^{(q)})$  – коэффициент Фурье (спектральный коэффициент);  $g_{nm}^{(q)} = \{g_{jm,n}^{(q)}\}_{j=1}^M$  – гармонические составляющие ряда Фурье, соответствующие частоте  $\omega_q$ , при этом  $g_{jm,n}^{(q)} = e^{i\omega_q n} f_{mj}^{(q)} = (\cos \omega_q n + i \sin \omega_q n) f_{jm}^{(q)}$ ;  $f_{jm}^{(q)}$  – значение  $j$ -й эмпирической ортогональной функции (ЭОФ), соответствующей частоте  $\omega_q$  на  $m$ -й станции.

Обозначим

$$e = (e^{i\omega_q n})_{n=1}^N, \quad S = (s_{nm})_{n,m=1}^{N,M}, \quad G_n^{(q)} = (g_{jm,n}^{(q)})_{j,m=1}^{N,M}, \quad a = S^T e.$$

Тогда  $c := c^{(q)}$  – случайный вектор, который можно представить в виде

$$c^{(q)} = G_n^{(q)} a + \varepsilon, \quad \mathbb{D}a = \Sigma_a, \quad \mathbb{D}\varepsilon = \Sigma_\varepsilon, \quad q = 1, \dots, N-1,$$

где матрица  $\Sigma_\varepsilon$  предполагается заданной, а  $\Sigma_a$  определяется рассматриваемым далее способом.

2. Зафиксируем номер гармоники  $q$  и опустим его обозначение. Пусть  $R_c$  – дисперсионная матрица вектора  $c = (c_1, \dots, c_M)$ , оцениваемая эмпирически. Представим ее в виде  $R_c = F \Sigma_a F^T$ , где  $F = \text{augment}(f_1, \dots, f_M)$  ( $\text{augment}$  – присоединение векторов  $f_j$  слева направо);  $f_j$  – ортогональные собственные векторы матрицы  $R_c$ , отвечающие ее собственным числам  $\lambda_1, \dots, \lambda_M$  (далее полагаем  $\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_M$ ), и  $\Sigma_a = \text{diag}\{\lambda_1, \dots, \lambda_M\}$ . Систему векторов  $(f_1, \dots, f_M)$  принято называть базисом ЭОФ для соответствующего коэффициента Фурье  $c^{(q)}$ .

Выполним редукцию матрицы  $R_c$  методом главных компонент [8], т. е. перейдем от ее представления с помощью базиса ЭОФ к редуцированной форме  $H = \text{augment}(f_1, \dots, f_p)$ , где значение  $p$  определяется из условия  $p \ll M$ , которое записывают также в виде

$$\sum_{i=1}^p \lambda_i^2 \gg \sum_{i=p+1}^M \lambda_i^2.$$

Формально верхнюю границу параметра  $p$  можно выбрать из условия, обеспечивающего соотношение [9]

$$\sum_{i=1}^p \lambda_i^2 \cong 0.95 \sum_{i=1}^M \lambda_i^2.$$

Нижняя граница для  $p$  выбирается экспериментально. Из выбранных собственных векторов формируется матрица редукции  $H$  размером  $M \times p$ .

3. Будем предполагать, что дисперсионная матрица  $\Sigma_\varepsilon = \mathbb{D}\varepsilon$  вектора ошибок  $\varepsilon$  известна. Тогда наилучшая линейная несмещенная оценка параметра  $a$  имеет вид

$$\hat{a} = (H^T \Sigma_\varepsilon^{-1} H + \Sigma_a^{-1})^{-1} H^T \Sigma_\varepsilon^{-1} c,$$

а дисперсионная матрица оценки  $\hat{a}$

$$\mathbb{D}\hat{a} = (H^T \Sigma_\varepsilon^{-1} H + \Sigma_a^{-1})^{-1}. \quad (7)$$

Таким образом, согласно (7) точность оценивания  $a$  зависит от матрицы  $H$ ,  $j$ -я строка которой соответствует  $j$ -й станции, и, значит, от выбора системы наблюдательных станций. К матрице  $\mathbb{D}\hat{a}$  можем предъявить любой из рассмотренных ранее критериев оптимальности с целью оптимизировать ее методами ПЭ.

4. Задача оптимального планирования заключается в нахождении совокупности станций  $\Omega_0^* = \{\omega_1^*, \dots, \omega_L^*\}$ , минимизирующих один из функционалов (2) или (5). Положим  $D = D(\Omega_0) := D\hat{a}$ ,  $f^T(\omega_i) = (f_1, \dots, f_p)$  –  $i$ -я строка матрицы  $F$ ,  $\omega_i \in \Omega$ . Для построения алгоритма оптимизации определяем функцию дисперсии  $\varphi(\omega, \Omega_0)$  в произвольной точке  $\omega \in \Omega$

при фиксированном наборе станций  $\Omega_0 \in \Omega$ ,  $|\Omega| = M > L \geq p$  – мощность множества  $\Omega$ . Для рассмотренных ранее критериев соответствующие функции дисперсии принимают вид

$$\varphi_D(\omega, \Omega_0) = d(\omega), \quad \varphi_A(\omega, \Omega_0) = f^T(\omega) D^2 f(\omega), \quad \varphi_P(\omega, \Omega_0) = d^2(\omega, \omega_0), \quad \omega \in \Omega.$$

Построение оптимального плана  $\Omega_0^*$  сводится к последовательности итераций, на каждой из которых одна из точек  $\omega_i \in \Omega_0$  заменяется на более лучшую точку  $\omega \in \Omega \supset \Omega_0$ .

5. Теперь обратимся к задаче оптимальной интерполяции. Пусть  $t$  – несмещенная оценка метеоэлемента  $f(r)$  в точке  $r_0 \in \mathbb{R}^3$ , т. е.

$$Mt = f(r_0), \quad y_i = f(r_i) + \eta_i + \xi_i, \quad i = 1, \dots, n,$$

где  $y_i$  – результат измерения элемента  $f(r_i)$  в точке  $r_i$ ;  $\eta_i$  и  $\xi_i$  – модельная (обусловленная географическим положением и климатом) и случайная (обусловленная погрешностью измерений) ошибки с нулевыми средними и дисперсиями  $\sigma_i^2 = \mathbb{M}\eta_i^2$  и  $\tau_i^2 = \mathbb{M}\xi_i^2$  соответственно. Поле норм  $f(r)$  считается заданным, а соответствующее ему случайное поле  $y(r)$  – однородным и изотропным в широком смысле [10, с. 15–17]. Последнее означает, что среднее  $\mathbb{M}y(r) = f(r)$  и корреляционная функция (КФ)  $\mu(r, s) = \mathbb{M}[y(r) - f(r)][y(s) - f(s)]$  поля  $y(r)$  для любых  $r, s \in \mathbb{R}^3$  удовлетворяют условиям:

$$f(r) = \text{const}, \quad \mathbb{M}y^2(r) < \infty, \quad \mu(r, s) = \mu(|r - s|),$$

т. е. среднее постоянно, а КФ зависит только от евклидова расстояния  $\rho = |r - s|$  между точками  $r, s \in \mathbb{R}^3$ .

Пусть  $\mu(\rho)$  – корреляционная функция однородного изотропного поля  $y(r)$ ,  $M = (\mu_{ij})$  – матрица с элементами  $\mu_{ij} = \mu(|r_i - r_j|)$ ,  $\mu_0 = (\mu_{0i})$  – вектор с координатами  $\mu_{0i} = \mu(|r_i - r_0|)$ , и пусть

$$M_0 = \begin{pmatrix} M & \mu_0 \\ \mu_0^T & 1 \end{pmatrix}.$$

Функционал

$$\varepsilon_n^2(r) = \frac{|M_0|}{|M|} = 1 - \mu_0^T M^{-1} \mu_0$$

является мерой ошибки интерполяции метеорологического поля в точке  $r_0$  (так называемая остаточная дисперсия прогноза [2, с. 121, формула (49)], [3, с. 101]) и может быть минимизирован за счет оптимального выбора пунктов наблюдений  $r_i, i = 1, \dots, K$ .

**Задача о размещении в сейсмологии.** Планирование СС для многих задач сейсмологии укладывается в рамки следующих постановок [6]: (1) в регионе имеется сеть  $k > m$  ( $m$  – число неизвестных параметров гипоцентров) сейсмических станций; необходимо выбрать из нее оптимальную подсеть  $k_1 < k$  станций для регистрации землетрясений из за-



данных очаговых зон; (2) в регионе имеется СС из  $k \geq m$  станций и имеется аппаратура еще для  $k_2$  станций; из геологических и географических соображений выбраны  $l > k_2$  пунктов для возможной установки этой аппаратуры; необходимо оптимально дополнить существующую сеть до  $k + k_2$  станций; (3) в регионе отсутствует сейсмическая сеть; необходимо построить оптимальную СС заданного числа  $k \geq m$  станций для регистрации землетрясений из заданных очагов зон. Эти задачи также могут быть решены с помощью описанных в статье алгоритмов Федорова.

Перечисленные задачи оптимизации сети станций, возникающие в метеорологии и сейсмологии, вполне укладываются в постановки задач о размещении, решаемых алгоритмами Федорова. Однако для их решения могут быть использованы и другие критерии, в том числе критерий  $E$ -оптимальности и нестатистический критерий Бурмина [6], но их реализация требует более значительных вычислительных затрат.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дроздов О. А. О принципах рационализации сети метеорологических станций // Тр. ГГО. 1961. №123. С. 33–46.
2. Гандин Л. С., Каган Р. Л. Статистические методы интерпретации метеорологических данных. Л.: Гидрометеиздат, 1976.
3. Хаттон Л., Уэрдингтон М., Мейкин Дж. Обработка сейсмических данных. Теория и практика. М.: Мир, 1989.
4. Покровский О. М. Анализ эффективности методов оптимизации наземных наблюдательных сетей // Тр. ГГО. 1989. Вып. 528. С. 82–89.
5. Покровский О. М. О методе выбора репрезентативных пунктов метеорологических наблюдений // Метеорология и гидрология. 1999. Вып. 2. С. 55–67.
6. Омельченко О. К., Гусяков В. К. Планирование сети сейсмических станций для службы предупреждения цунами // Вулканология и сейсмология. 1996. Т. 18. Вып. 2. С. 68–85.
7. Федоров В. В. Теория оптимального эксперимента. М.: Наука, 1971.
8. Рао С. Р. Линейные статистические методы и их приложения. М.: Наука, 1968.
9. Кухарев Г. А., Щеголева Н. Л. Алгоритмы двумерного анализа главных компонент для задач распознавания изображений лиц // Компьютерная оптика. 2010. Т. 34. Вып. 4. С. 545–551.
10. Леоненко Н. Н., Иванов А. В. Статистический анализ случайных полей. Киев.: Выща шк. Изд-во при Киев. ун-те, 1986.

*Yu. D. Grigoriev, Nguyen Hai Vinh*

#### *DESIGN OF EXPERIMENT AS A PROBLEM OF THE OBJECTS PLACEMENT*

*Fedorov's algorithms for construction of an exact designs experiment are considered. Algorithms by examples are illustrated. Use them for a solution of a problem of the objects placement arising in meteorology and seismology is suggested. To number of such problems the rationalisation of a meteorological stations network and the planning of a seismic stations network are relevant.*

**Design of experiment, stations network, D- and A-optimality criteria, information matrix, principal components**



УДК 681.511.26

В. В. Путов, В. Н. Шелудько, Н. К. Чьен

## СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕПРЯМЫХ И ПРЯМЫХ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ С ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НАСТРОЙКОЙ И МАЖОРИРУЮЩИМИ ФУНКЦИЯМИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВУХМАССОВЫМ НЕЛИНЕЙНЫМ УПРУГИМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ

*Рассматриваются структуры прямой и непрямой адаптивных систем с параметрической настройкой и мажорирующими функциями для управления двухмассовым нелинейным упругим электромеханическим объектом. Приводятся результаты сравнительного анализа эффективности указанных адаптивных систем управления упругим объектом в условиях параметрической и функциональной неопределенности его математического описания.*

**Упругий электромеханический объект, прямое и не прямое адаптивное управление, эталонная и настраиваемая модели, параметрическая настройка, мажорирующие функции**

**Математическая модель двухмассового нелинейного упругого электромеханического объекта с подчиненным управлением.** Рассмотрим двухмассовый упругий электромеханический объект с крутильными колебаниями, где в качестве первого диска  $J_1$  принимается момент инерции исполнительного привода с частью жестко соединенных с ним инерционных звеньев механизма, а диск  $J_2$  учитывает остальные инерционные части механической конструкции, приведенные к вращению исполнительного привода. Считаем, что диски  $J_1$  и  $J_2$  соединены упругой связью с коэффициентом упругости  $p$ , имеющей зазор в сочленении, где  $\delta$  – угловая величина, равная половине зазора (рис. 1) [1].

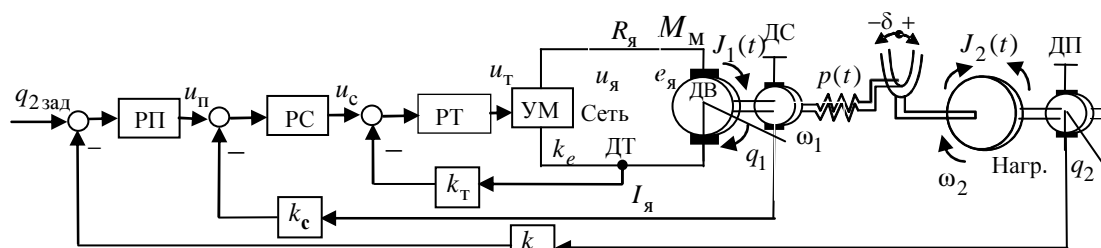


Рис. 1

Примем в качестве исходного двухмассовый упругий электромеханический объект с зазором, замкнутый по скорости  $\omega_1$  с контурным П-регулятором и являющийся внутренним контуром трехконтурной электромеханической системы, замкнутой по положению  $\varphi = q_2$  [2]. Его математическое описание представляется системой дифференциальных уравнений четвертого порядка, записанных в так называемой скоростной форме уравнений упругого объекта [1], в виде

$$\left. \begin{aligned} \dot{\omega}_2 &= J_2^{-1} f_y; \quad \dot{\omega}_1 = -J_1^{-1} f_y + J_1^{-1} k_M I_{\text{я}}; \\ \dot{m}_y &= p(\omega_1 - \omega_2); \quad \dot{I}_{\text{я}} = L_{\text{я}}^{-1} [-R_{\text{я}} I_{\text{я}} - k_e \omega_1 + k_y u_{\text{т}}]; \\ u_{\text{т}} &= \beta_{\text{т}} (u_{\text{с}} - k_{\text{т}} I_{\text{я}}); \quad u_{\text{с}} = \beta_{\text{с}} (u_{\Sigma} - k_{\text{с}} \omega_1); \\ u_{\Sigma} &= u^0 + u_a; \quad u_0 = u_{\text{п}}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $\omega_1 = \dot{q}_1$ ,  $\omega_2 = \dot{q}_2$  – угловые скорости первого и второго дисков;  $m_y$  – упругий момент, возникающий при деформации в упругой связи при отсутствии зазора;  $I_{\text{я}}$  – ток якоря;  $L_{\text{я}}$ ,  $R_{\text{я}}$  – индуктивность и активное сопротивление якорной цепи двигателя;  $k_{\text{т}}$ ,  $k_{\text{с}}$ ,  $k_{\text{п}}$  – постоянные коэффициенты передачи датчиков обратных связей по току ДТ, скорости ДС, положению ДП;  $k_e$ ,  $k_M$  – постоянные коэффициенты, определяемые конструктивными данными электрической машины;  $k_y$  – коэффициент передачи усилителя мощности УМ;  $u_{\text{т}}$ ,  $u_{\text{с}}$ ,  $u_{\text{п}}$  – выходные напряжения контурных регуляторов тока РТ, скорости РС и положения РП;  $\beta_{\text{т}}$ ,  $\beta_{\text{с}}$  – коэффициенты передачи РТ, РС;  $u_0$  – известное программное воздействие;  $u_a$  – адаптивное управление, подлежащее определению;  $M_M = k_M I_{\text{я}}$  – электромагнитный момент электрической машины;  $u_{\text{я}} = k_y u_{\text{т}}$  – напряжение якоря, а  $f_y$  – упругий момент, описываемый при учете зазора  $2\delta$  в упругой связи нелинейной функцией вида [1], т. е.

$$f_y = \begin{cases} m_y - p\delta, & m_y \geq p\delta; \\ 0, & |m_y| < p\delta; \\ m_y + p\delta, & m_y \leq -p\delta. \end{cases} \quad (2)$$

Подчеркнем, что задачу подавления нелинейных упругих деформаций, возникающих в условиях значительного изменения параметров  $J_1(t)$ ,  $J_2(t)$ ,  $p(t)$  и при дестабилизирующем влиянии зазора в упругой связи, предполагается решать в рамках контура скорости с адаптивным управлением и наблюдателем по измерению скорости  $\omega_1$  привода [1], тем самым упрощая задачу управления упругим объектом, представленным в скоростной форме, так как порядок рассматриваемых дифференциальных уравнений объекта при этом снижается на единицу по сравнению с объектом, замкнутым по положению. Далее, после построения адаптивного управления, решающего задачу подавления упругих колебаний в скоростном контуре, осуществляется замыкание контура положения с соответствующим выбором значения коэффициента передачи  $\beta_{\text{п}}$  контурного П-регулятора положения РП, как в следящей системе с жестким объектом [1], [2].

Рассмотрим объект (1), (2) с некоторыми усредненными постоянными значениями параметров:  $J_1(t) \rightarrow J_{01}$ ;  $J_2(t) \rightarrow J_{02}$ ;  $p(t) \rightarrow p_0$ .

Положим, что

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= J_{02}^{-1}; a_2 = p_0; a_3 = J_{01}^{-1}k_M; \\ a_4 &= -J_{01}^{-1}; a_5 = -L_{\text{я}}^{-1}k_y\beta_T k_c\beta_c - L_{\text{я}}^{-1}k_e; \\ a_6 &= -k_y\beta_T k_T L_{\text{я}}^{-1} - L_{\text{я}}^{-1}R_{\text{я}}; b = L_{\text{я}}^{-1}k_y\beta_T\beta_c, \end{aligned} \right\}$$

тогда линеаризованная система (1), (2) с введенными усредненными параметрами примет следующий векторно-матричный вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}u_{\Sigma}; \mathbf{y} = \mathbf{c}^T\mathbf{x}; \\ \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 0 & a_1 & 0 & 0 \\ -a_2 & 0 & a_2 & 0 \\ 0 & a_4 & 0 & a_3 \\ 0 & 0 & a_5 & a_6 \end{bmatrix}; \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ b \end{bmatrix}; \mathbf{c} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ c \\ 0 \end{bmatrix}; \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \omega_2 \\ m_y \\ \omega_1 \\ I_{\text{я}} \end{bmatrix}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $\mathbf{x}$  – вектор состояния линеаризованного объекта (3);  $\mathbf{y} = \mathbf{c}^T\mathbf{x}$  – уравнение измерения;  $c = k_c$  (здесь доступной измерению с помощью датчика скорости ДС считается первая угловая скорость  $\omega_1$ ).

Адаптивные системы с параметрической настройкой и мажорирующими функциями для управления двухмассовым нелинейным упругим электромеханическим объектом. В статье ставится задача построения адаптивных систем, обеспечивающих подавление упругих колебаний с одновременным повышением быстродействия переходных процессов в объекте (1). Рассмотрим два вида адаптивных систем с наблюдателем по измерению угловой скорости  $\omega_1$  привода: прямую адаптивную систему с эталонной моделью и непрямую адаптивную систему с настраиваемой моделью с алгоритмами параметрической настройки и мажорирующими функциями.

Опираясь на общие методы построения беспойсковых (прямых и непрямых) адаптивных систем управления нелинейными нестационарными объектами, изложенными в [3], рассмотрим построение структур адаптивных систем управления упругим объектом (1), (2).

**Прямая адаптивная система.** Прямое адаптивное управление с параметрической настройкой и эталонной моделью имеет следующий вид [4]:

$$u_{\mathbf{A}}(t) = \mathbf{k}_{\mathbf{A}}^T(t) \text{diag}\{1, \hat{m}_y, 1, 1\} \hat{\mathbf{x}} + k_{\mathbf{b}}(t)u^0(t), \quad (4)$$

где  $\tilde{\mathbf{k}}_{\mathbf{A}}(t)$  –  $(4 \times 1)$ -мерный вектор настраиваемых коэффициентов;  $\text{diag}\{1, \hat{m}_y, 1, 1\}$  – диагональная матрица мажорирующих функций;  $k_{\mathbf{b}}(t)$  – настраиваемый входной коэффициент адаптивного закона (4);  $\hat{\mathbf{x}} = (\hat{\omega}_2 \quad \hat{m}_y \quad \hat{\omega}_1 \quad \hat{I}_{\text{я}})^T$  – вектор оценки переменных состояния наблюдателя (подробности построения рассматриваются в [4]).

Алгоритмы настройки параметров адаптивного управления выражаются дифференциальными уравнениями вида

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{k}}_{\mathbf{A}}^{\mathbf{T}}(t) = -\gamma_{\mathbf{A}} \mathbf{b}_{\mathbf{M}}^{\mathbf{T}} \mathbf{P} \hat{\boldsymbol{\varepsilon}} \hat{\mathbf{x}}^{\mathbf{T}} \text{diag}\{1, \hat{m}_y, 1, 1\} - \lambda_{\mathbf{A}} \mathbf{k}_{\mathbf{A}}^{\mathbf{T}}(t); \\ \dot{k}_{\mathbf{b}}(t) = -\gamma_{\mathbf{b}} \mathbf{b}_{\mathbf{M}}^{\mathbf{T}} \mathbf{P} \hat{\boldsymbol{\varepsilon}} u^0(t) - \lambda_{\mathbf{b}} k_{\mathbf{b}}(t), \end{cases}$$

где  $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}} = \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}_{\mathbf{M}}$  –  $(4 \times 1)$ -мерный вектор ошибок – разностей между переменными состояния наблюдателя и эталонной модели;  $\mathbf{P}$  –  $(4 \times 4)$ -мерная симметричная положительно определенная матрица, единственным образом определенная из уравнения Ляпунова;  $\gamma_{\mathbf{A}}, \lambda_{\mathbf{A}}, \gamma_{\mathbf{b}}, \lambda_{\mathbf{b}}$  – положительные коэффициенты усиления настроек.

**Непрямая адаптивная система.** Для построения непрямого управления используется настраиваемая модель, уравнение которой имеет вид [5]

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}_{\mathbf{M}} \tilde{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{K}}_{\mathbf{A}}(t) \text{diag}\{1, \hat{m}_y, 1, 1\} \hat{\mathbf{x}} + [\mathbf{b}_{\mathbf{M}} + \tilde{\mathbf{k}}_{\mathbf{b}}(t)] u(t), \quad (5)$$

здесь  $\tilde{\mathbf{x}} = (\tilde{\omega}_2 \quad \tilde{m}_y \quad \tilde{\omega}_1 \quad \tilde{I}_{\mathbf{я}})^{\mathbf{T}}$  – вектор переменных состояния настраиваемой модели (5);  $\tilde{\mathbf{K}}_{\mathbf{A}}(t), \tilde{\mathbf{k}}_{\mathbf{b}}(t)$  –  $(4 \times 4)$  и  $(4 \times 1)$ -мерные матрицы настраиваемых параметров;  $\mathbf{A}_{\mathbf{M}}, \mathbf{b}_{\mathbf{M}}$  –  $(4 \times 4)$ -,  $(4 \times 1)$ -мерные постоянные матрицы ( $\mathbf{A}_{\mathbf{M}}$  – гурвицева матрица) эталонной модели.

Алгоритмы настройки и непрямого адаптивного закона управления объектом (1), (2), имеют вид

$$\begin{cases} \dot{\tilde{\mathbf{K}}}_{\mathbf{A}}(t) = \gamma_{\mathbf{A}} \mathbf{P} \boldsymbol{\varepsilon} \hat{\mathbf{x}}^{\mathbf{T}} \text{diag}\{1, \hat{m}_y, 1, 1\} - \lambda_{\mathbf{A}} \tilde{\mathbf{K}}_{\mathbf{A}}(t); \\ \dot{\tilde{\mathbf{k}}}_{\mathbf{b}}(t) = \gamma_{\mathbf{b}} \mathbf{P} \boldsymbol{\varepsilon} u^0 - \lambda_{\mathbf{b}} \tilde{\mathbf{k}}_{\mathbf{b}}(t), \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \hat{\mathbf{x}} - \tilde{\mathbf{x}}, \end{cases} \\ u_{\mathbf{A}}(t) = -\mathbf{b}_{\mathbf{M}}^+ \left\{ \tilde{\mathbf{K}}_{\mathbf{A}}(t) \text{diag}\{1, \hat{m}_y, 1, 1\} \hat{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{k}}_{\mathbf{b}}(t) u(t) \right\},$$

где  $\boldsymbol{\varepsilon}$  –  $(4 \times 1)$ -мерный вектор ошибок – разностей между переменными состояния наблюдателя и настраиваемой модели;  $(1 \times 4)$ -мерный вектор-строка  $\mathbf{b}_{\mathbf{M}}^+ = (\mathbf{b}_{\mathbf{M}}^{\mathbf{T}} \mathbf{b}_{\mathbf{M}})^{-1} \mathbf{b}_{\mathbf{M}}^{\mathbf{T}}$  есть псевдообращение  $(4 \times 1)$ -мерного вектора  $\mathbf{b}_{\mathbf{M}}$ ; остальные обозначения были введены при построении прямого управления.

**Результаты моделирования.** В Matlab Simulink построена программа цифровой реализации предлагаемых адаптивных систем. В работе проведено моделирование прямой с эталонной моделью и непрямой с настраиваемой моделью адаптивных систем с параметрической настройкой и наблюдателем для управления упругим объектом (1), (2) со следующими усредненными постоянными параметрами линеаризованного описания (3):  $J_{01} = 0.004 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $J_{02} = 0.004 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $p_0 = 1.5 \text{ Н} \cdot \text{м/рад}$ ;  $R_{\mathbf{я}} = 11 \text{ Ом}$ ;  $L_{\mathbf{я}} = 0.11 \text{ Гн}$ ;  $k_y = 2.78$ ;  $k_{\mathbf{M}} = 0.7 \text{ В} \cdot \text{с}$ ;  $k_e = 1.025 \text{ В} \cdot \text{с}$ ;  $k_{\mathbf{T}} = 1$ ;  $k_{\mathbf{C}} = 0.246 \text{ В} \cdot \text{с/рад}$ ;  $k_{\mathbf{II}} = 0.04 \text{ В/рад}$ ;  $\beta_{\mathbf{T}} = 7.9137$ ;  $\beta_{\mathbf{C}} = 4.6456$ ;  $\beta_{\mathbf{II}} = 298.398$ .

Результаты исследования эффективности работы непрямого адаптивной системы на ступенчатое входное воздействие  $\varphi_{\text{зад}} = k_{\mathbf{II}} = 0.04 \text{ рад}$  при изменении параметров объекта

и наличии зазора в упругой связи сопоставляются с результатами работы прямой адаптивной системы таким же объектом.

На рис. 2 показаны переходные процессы реакции следящей системы с жестким объектом (слева) и с упругим объектом (справа) с подчиненным управлением при усредненных постоянных параметрах объекта.

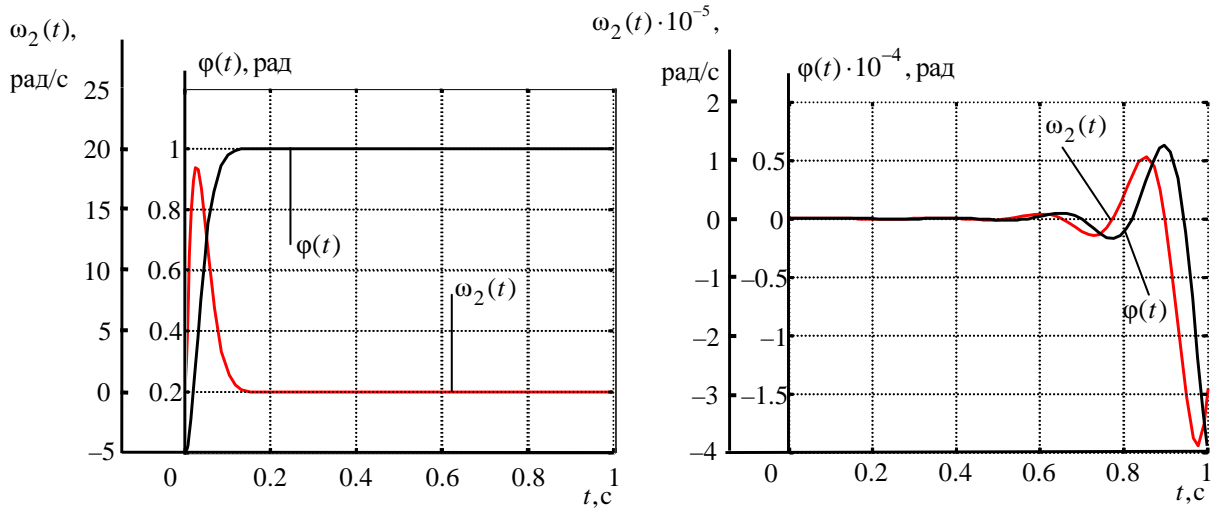


Рис. 2

Можно отметить, что использование в следящей системе с упругим объектом настройки контурных П-регуляторов  $\beta_{\text{п}}$ ,  $\beta_{\text{с}}$ ,  $\beta_{\text{т}}$ , рассчитанных на достижение максимально возможного быстродействия в рамках жесткой электромеханической следящей системы, привело к возбуждению быстрорастущих упругих колебаний. Поэтому, чтобы наблюдать за затухающими упругими колебаниями в рассматриваемом объекте, необходимо снизить быстродействие, а значит, уменьшить коэффициент передачи П-регулятора положения  $\beta_{\text{п}}$ , например, в 15 раз ( $\beta_{\text{п}} = 20$ ). Результаты моделирования показаны на рис. 3 (реакция угловой скорости второй массы показана слева, а реакция угла поворота нагрузки – справа).

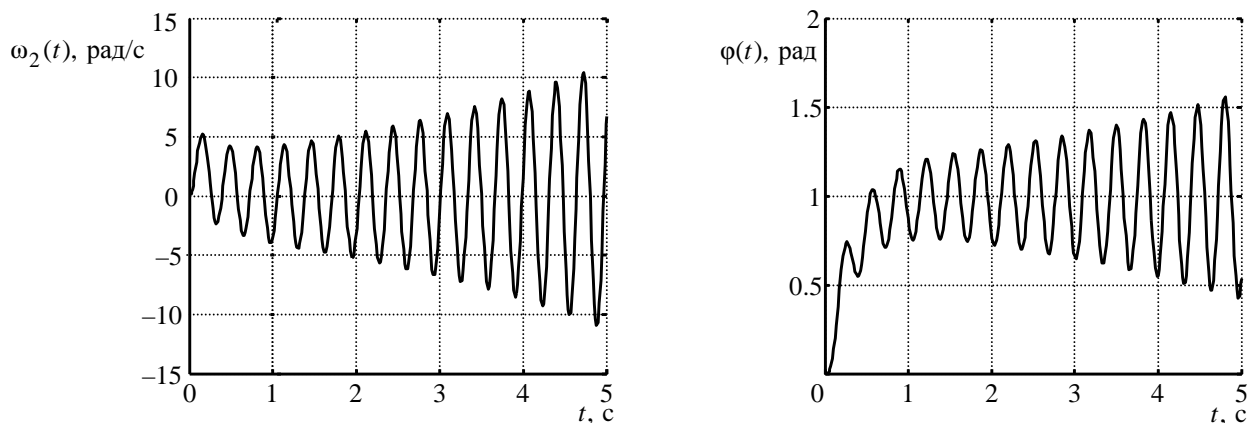


Рис. 3

На рис. 4 показаны реакции прямой (слева) и непрямой (справа) адаптивных систем управления с параметрической настройкой при усредненных постоянных параметрах объекта, при этом коэффициенты настроек выбраны следующими значениями:  $\gamma_{\text{А}} = 10$ ;  $\lambda_{\text{А}} = 1$ ;  $\gamma_{\text{Б}} = 10$ ;  $\lambda_{\text{Б}} = 1$ .

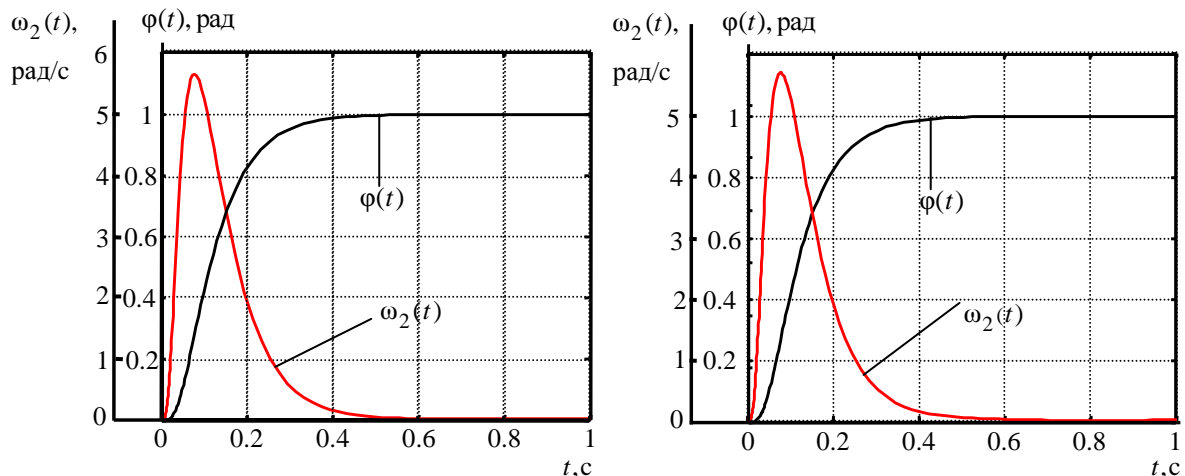


Рис. 4

Графики на рис. 4 показывают, что в адаптивных системах управления с параметрической настройкой не только успешно подавлены упругие колебания, которые возникали в упругом объекте без адаптивного управления (см. рис. 3), но и повышено быстродействие системы ( $t_p \approx 0.3$  с), которое стало сравнимым с быстродействием «жесткого» объекта (см. рис. 2 слева).

На рис. 5, 6 показаны переходные процессы реакции угла поворота нагрузки адаптивной системы с параметрической настройкой при изменении параметров объекта (кривая 1 – прямая адаптивная система, кривая 2 – непрямая адаптивная система).

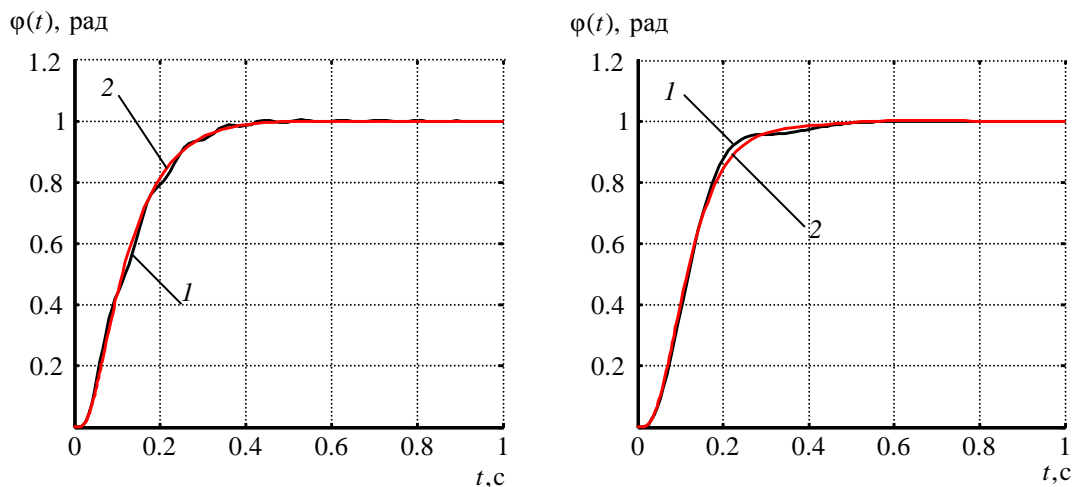


Рис. 5

На рис. 5 представлены переходные процессы реакции угла поворота нагрузки адаптивной системы с параметрической настройкой при изменении коэффициента упругости объекта (слева – при  $p = 2p_0$ , справа – при  $p = p_0/2$ ), а на рис. 6 – при изменении момента инерции второй массы (слева – при  $J_2 = 2J_{02}$ , справа – при  $J_2 = J_{02}/2$ ).

Из графиков на рис. 5, 6 видно, что при четырехкратном изменении параметров  $p$  или  $J_2$  работоспособность адаптивных систем управления с наблюдателем состояния сохраняется при удовлетворительном качестве переходных процессов, причем эффективность работы не прямой адаптивной системы оказывается выше эффективности прямой адаптивной системы.

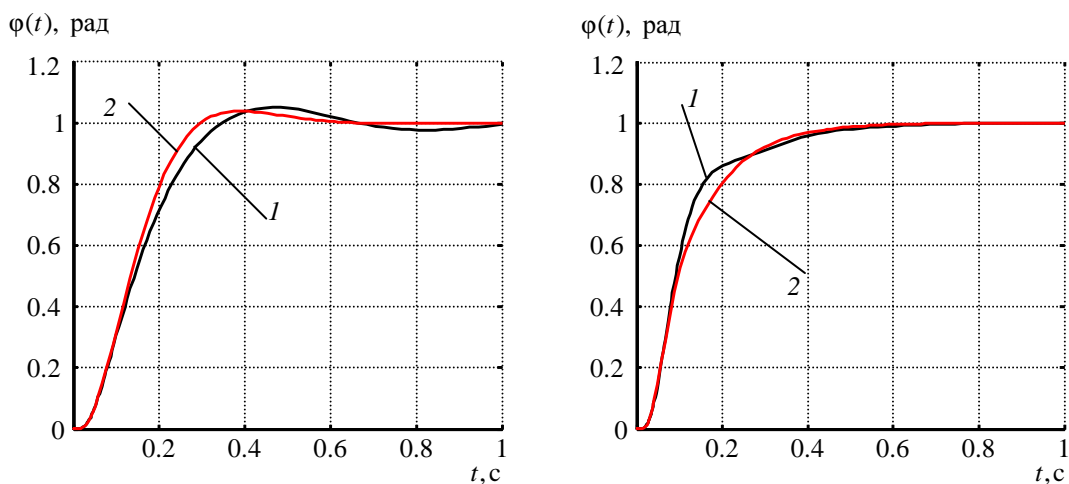


Рис. 6

Проведем сравнительное исследование эффективности работы не прямой адаптивной системы с мажорирующими функциями с эффективностью работы прямой адаптивной системы в условиях действия такой нелинейности, как зазор в упругой связи:  $p\delta = 0.1 \text{ Н}\cdot\text{м}$ . Результаты моделирования представлены на рис. 7.

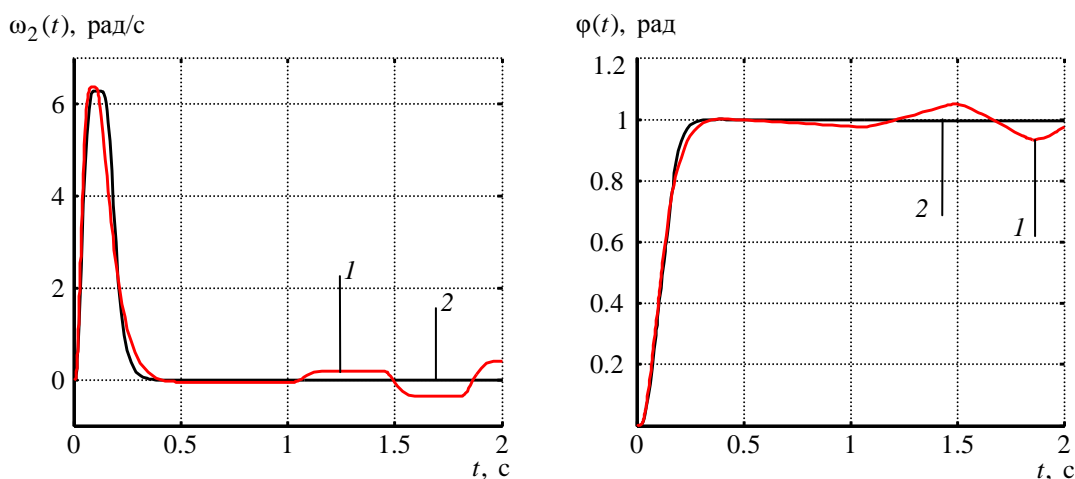


Рис. 7

На рис. 7 слева показаны графики переходных процессов реакции угловой скорости второй массы, а на рис. 7 справа – угла поворота нагрузки, причем переходные процессы реакции в прямой адаптивной системе показаны на кривой 1, а в не прямой адаптивной системе – кривой 2.

Вид графиков подтверждает работоспособность адаптивных систем и более высокую эффективность работы не прямой адаптивной системы по сравнению с эффективностью прямой адаптивной системой в задачах подавления упругих колебаний, обеспечения повышения быстродействия и точности управления в условиях параметрической и функциональной неопределенности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Путов В. В., Шелудько В. Н. Адаптивные и модальные системы управления многомассовыми нелинейными упругими механическими объектами. СПб.: Элмор, 2007. 243 с.
2. Путов В. В. Адаптивное и модальное управление механическими объектами с упругими деформациями. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2002. 112 с.



3. Путов В. В. Методы построения адаптивных систем управления нелинейными нестационарными динамическими объектами с функционально-параметрической неопределенностью: Дисс. ... д-ра техн. наук. / СПбГЭТУ. СПб., 1993. 590 с.

4. Путов В. В., Зунг Ч. А. Исследование прямой беспойсковой адаптивной системы с параметрической настройкой для управления двухмассовыми нелинейными упругими электромеханическими объектами // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Сер. «Автоматизация и управление». 2006. Вып. 1. С. 47–52.

5. Непрямые адаптивные системы с параметрически настраиваемыми моделями для управления линейными объектами / В. Путов, В. Н. Шелудько, Н. К. Чьен, Е. В. Белградская // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. Вып. 7. С. 71–80.

*V. V. Putov, V. N. Seludko, N. K. Chien*

*COMPARATIVE RESEARCH INDIRECT AND DIRECT ADAPTIVE CONTROL SYSTEMS OF TWO-MASS NONLINEAR ELASTIC ELECTROMECHANICAL PLANT WITH PARAMETRICALLY ADJUSTMENT MODELS AND MAJORIZED FUNCTIONS*

*The structure of indirect adaptive systems control with parametrically adjustable models and majorizing functions for two-mass nonlinear elastic electromechanical plant is considered. The efficiency of indirect and direct adaptive systems control developed for considered elastic plant in the condition of parametric functional uncertainty is compared.*

**Elastic electromechanical plant, direct and indirect adaptive control, reference and adjustable models, parameter setting, majorized functions**



УДК 621.311.21

*П. О. Агандеев, Г. И. Прокофьев*

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПАРАЛЛЕЛЬНО РАБОТАЮЩИХ ГИДРОАГРЕГАТОВ**

*Рассмотрено математическое описание гидроагрегата. Показана возможность построения и корректность компьютерной модели параллельно работающих гидроагрегатов в составе ГЭС в среде MATLAB.*

### **Гидроагрегат, гидротурбина, система возбуждения, математическая модель**

В процессе проектирования систем управления малыми ГЭС возникает необходимость в анализе физических процессов, протекающих в сложных электромеханических системах. Для выбора структуры и параметров регуляторов системы автоматического управления, а также проверки ее на устойчивость требуется исследование различных переходных процессов. Отдельной задачей является изучение процесса синхронизации генератора с сетью. Точная синхронизация происходит при выполнении следующих условий:

- равенство амплитуд ЭДС генератора и напряжения на шинах электростанции;
- близость частоты ЭДС генератора к частоте напряжения на шинах электростанции;
- совпадение по фазе ЭДС генератора и напряжения на шинах электростанции.

Возникает вопрос о минимально допустимой близости значений характеристик фаз генератора и шины электростанции, при которой можно производить включение генератора на сеть. При параллельной работе нескольких гидроагрегатов в составе гидростанции, важной задачей является анализ аварийного отключения станции от сети. Проведение экспериментов на реальных объектах зачастую бывает невозможно из-за больших затрат, удаленности самих объектов и отрицательного влияния некоторых режимов исследования на электростанцию.

Для решения отмеченных и других проблем анализа может быть использована компьютерная модель, которая позволит проводить интересующие исследования. Инструментом для решения такого рода задач может служить система моделирования MatLab и ее пакеты расширения Simulink и Power System Blockset.

Математическое описание, на основе которого строится компьютерная модель, является совокупностью математических описаний отдельных частей электростанции, удовлетворяющих определенным ограничениям. Необходимо выбрать адекватные описания этих частей и из них составить единую систему уравнений. Тогда при составлении компьютерной модели

можно соединять отдельные части между собой, т. е. выходы одних блоков будут являться входами для других. При этом удобно использовать систему относительных единиц.

Математическое описание синхронного генератора, выполненное во вращающейся системе координат, связанной с ротором, дано в [1].

**Модель системы возбуждения синхронного генератора.** В состав модели системы возбуждения входят:

- модель автоматического регулятора возбуждения (АРВ);
- модель усилителя мощности;
- модели фильтров высоких частот, характеризующие измерительные каналы.

Следующая система уравнений описывает работу системы возбуждения (здесь и далее величины приведены в относительных единицах):

$$\begin{aligned} [U_{13} - U_1 W_{\phi 1}(p) - I_p W_{\phi 2}(p) K_{CT}] W_{APB}(p) &= U_y; \\ W_y(p) U_y &= U_{0.B}, \end{aligned}$$

где  $U_{13}$  – уставка напряжения статора;  $U_1$  – напряжение статора;  $I_p$  – реактивный ток статора;  $W_{\phi 1}(p), W_{\phi 2}(p)$  – передаточные функции фильтров в измерительных каналах;  $K_{CT}$  – коэффициент определяющий статизм по реактивному току;  $W_{APB}(p)$  – передаточная функция АРВ;  $U_y$  – сигнал на выходе АРВ;  $W_y(p)$  – передаточная функция усилителя мощности;  $U_{0.B}$  – напряжение обмотки возбуждения.

Входными величинами являются напряжение статора и реактивная составляющая тока статора. Эти сигналы проходят через фильтры высоких частот в измерительных каналах. Выходной величиной является напряжение обмотки возбуждения.

На практике используется фильтр первого порядка с передаточной функцией:

$$W_{\phi}(p) = \frac{1}{T_{\phi} p + 1},$$

где  $T_{\phi}$  – постоянная времени фильтра.

Модель АРВ в общем случае представляет собой передаточную функцию ПИД-регулятора:

$$W_{APB}(p) = K_{\Pi} + \frac{K_{\text{И}}}{p} + K_{\text{Д}} p,$$

где  $K_{\Pi}, K_{\text{И}}, K_{\text{Д}}$  – коэффициенты усиления соответственно пропорциональной, интегральной и дифференциальной частей регулятора.

Усилитель мощности представляет собой тиристорный преобразователь, который может быть описан апериодическим звеном. Передаточная функция такого звена

$$W_y(p) = \frac{K_y}{T_y p + 1},$$

где  $K_y$  – коэффициент усиления,  $T_y$  – постоянная времени, характеризующая запаздывание в процессе переключения тириستоров.

**Модель гидротурбины.** Следующая система уравнений описывает поведение гидротурбины в динамике [2]:

$$\begin{aligned} q &= \mu \sqrt{1+h}; \\ h &= -W(p)q; \\ m_T &= \frac{q(1+h)\bar{\eta}}{\bar{\omega}_T} \end{aligned}$$

где  $q = Q/Q_H$  – относительное значение расхода;  $\mu$  – относительное перемещение направляющего аппарата,  $h = H - H_H/H_H$  – относительное изменение напора,  $m_T = M_T/M_{T,H}$  – относительное значение момента;  $\bar{\eta} = \eta/\eta_H$  – относительное значение КПД,  $\bar{\omega}_T = \omega/\omega_H$  – относительное значение угловой скорости.

Влияние инерции потока воды и колебаний давления в водоводе на динамические свойства турбины учитывается уравнением жесткого гидравлического удара:

$$W(p) = T_w(p),$$

где  $T_w(p) = \frac{Q_H}{gH_H} \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{A_i}$  – время изменения скорости воды в водоводе от нуля до номинальной, с;  $L = \sum_{i=1}^n L_i$  – полная длина и длина отдельных участков проточного тракта гидроагрегата, м;  $A_i$  – площадь поперечного сечения отдельных участков проточного тракта гидроагрегата, м;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения.

Входящая в уравнение момента величина КПД турбины зависит от скорости турбины и от угла открытия направляющего аппарата. Используя универсальную характеристику турбины и считая, что при угонной скорости КПД турбины равен нулю, можно получить зависимость КПД от скорости для определенного угла открытия направляющего аппарата. Аппроксимируя семейство таких характеристик, можно получить функцию двух переменных  $\bar{\eta}(\bar{\omega}, \mu)$ . Введение такой функции позволит применять модель в широких диапазонах скорости турбины и угла открытия направляющего аппарата.

Входящая в уравнение момента величина КПД турбины зависит от скорости турбины и от угла открытия направляющего аппарата. Используя универсальную характеристику турбины и считая, что при угонной скорости КПД турбины равен нулю, можно получить зависимость КПД от скорости для определенного угла открытия направляющего аппарата. Аппроксимируя семейство таких характеристик, можно получить функцию двух переменных  $\bar{\eta}(\bar{\omega}, \mu)$ . Введение такой функции позволит применять модель в широких диапазонах скорости турбины и угла открытия направляющего аппарата.

Приведенная модель гидротурбины учитывает переходные процессы в водоводе и явление гидравлического удара. В начальной стадии перемещения направляющего аппарата вследствие колебаний давления в водоводе при увеличении расхода воды мощность турбины вначале падает, затем начинает увеличиваться и наоборот, при уменьшении расхода воды мощность турбины вначале возрастает, а затем начинает снижаться.

Вал генератора соединяется с валом гидротурбины через муфту, которая обладает упругостью. Для исследования влияния упругой связи на работу системы в модель введены уравнения двухмассовой упругой механической системы. Реальный механизм, строго говоря, почти всегда представляет собой систему с распределенными параметрами. Однако в большинстве случаев вполне удовлетворительный результат может быть получен при представлении механизма в виде системы с сосредоточенными параметрами [3]. При этом приемлемыми являются следующие общепринятые допущения:

а) силы и моменты, действующие в системе, приложены к сосредоточенным массам, которые не деформируются;

б) упругие звенья невесомы и характеризуются постоянной жесткостью, т. е. постоянным коэффициентом пропорциональности между моментом и деформацией;

в) волновым характером распределения деформации можно пренебречь.

Силы трения не учитываются, что позволит исключить их субъективную оценку и влияние на демпфирующие свойства всей системы. Уравнения двухмассовой упругой механической системы:

$$\bar{\omega}_T = \frac{1}{T_{M.TP}}(m_T - m_Y);$$

$$m_Y = \frac{1}{T_C P}(\bar{\omega}_T - \bar{\omega}_G);$$

$$\bar{\omega}_G = \frac{1}{T_{M.GP}}(m_Y - m_T),$$

где  $m_Y$  – относительное значение упругого момента,  $\bar{\omega}_T = \frac{\omega}{\omega_H}$  – относительное значение угловой скорости генератора,  $T_{M.T} = J_T \frac{\omega_H}{M_H}$ ,  $T_{M.G} = J_G \frac{\omega_H}{M_H}$  – механические постоянные времени

соответственно турбины и генератора,  $T_C = \frac{1}{C} \frac{M_H}{\omega_H}$  – постоянная времени жесткости.

Полученное математическое описание гидроагрегата может быть использовано при построении компьютерной модели ГЭС. Так для электростанции с двумя параллельно работающими гидроагрегатами мощностью 1,6 МВт построена компьютерная модель в среде MATLAB.

Для моделирования синхронного генератора использовался блок «Synchronous Machine pu Standard», для моделирования силовых трансформаторов – блок «Three-Phase Transformer» библиотеки Power System Blockset. Сеть бесконечной мощности моделируется трехфазным источником напряжения. Подробное описание блоков дано в [4].

На рис. 1 в качестве одного из примеров, подтверждающих корректность поведения модели электростанции, показан процесс точной синхронизации генератора блока электростанции с сетью (1 – ЭДС синхронизируемого генератора; 2 – напряжение сети, 3, 4 – реактивная и активная мощности генератора). ЭДС синхронизируемого генератора до синхронизации опережает по фазе напряжение сети на  $5^\circ$  (электрических).

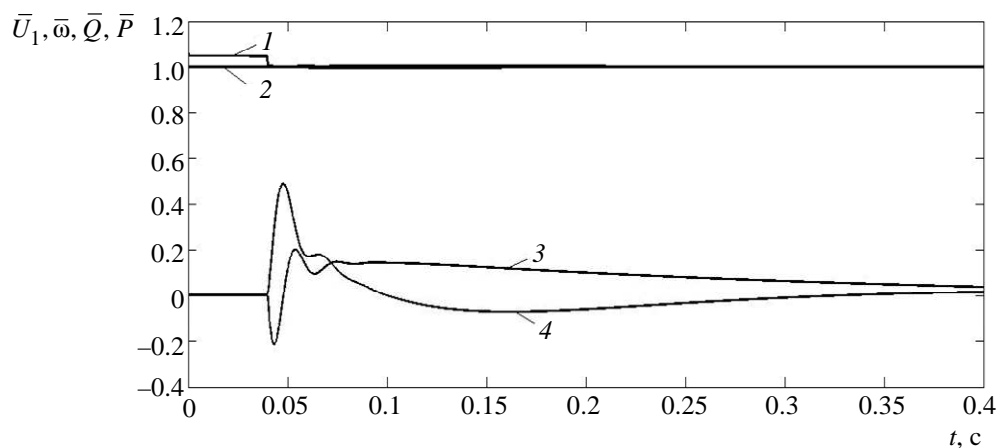


Рис. 1

На рис. 2 и 3 в качестве примера исследования аварийных режимов, показаны мгновенные значения токов и напряжений генератора при возникновении короткого замыкания в сети на линии 35 кВ и его исчезновении. На рис. 4 показан график активной мощности генератора.

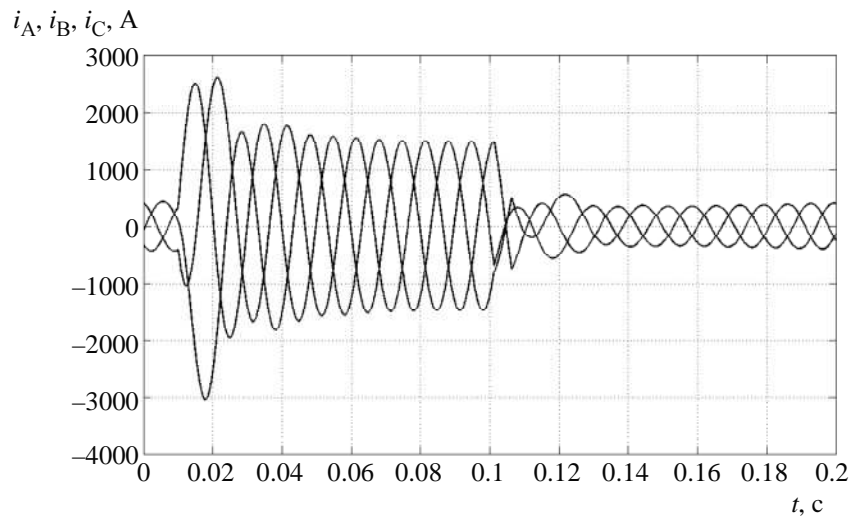


Рис. 2

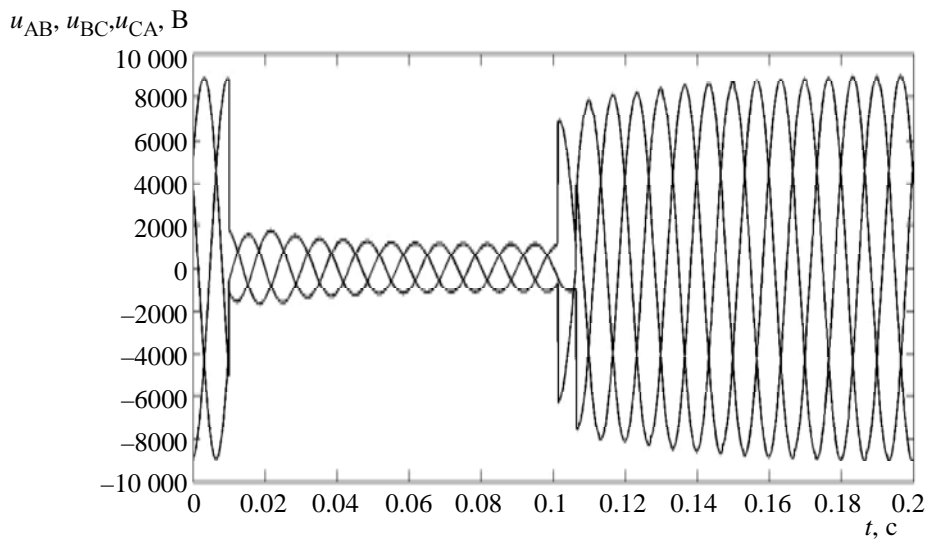


Рис. 3

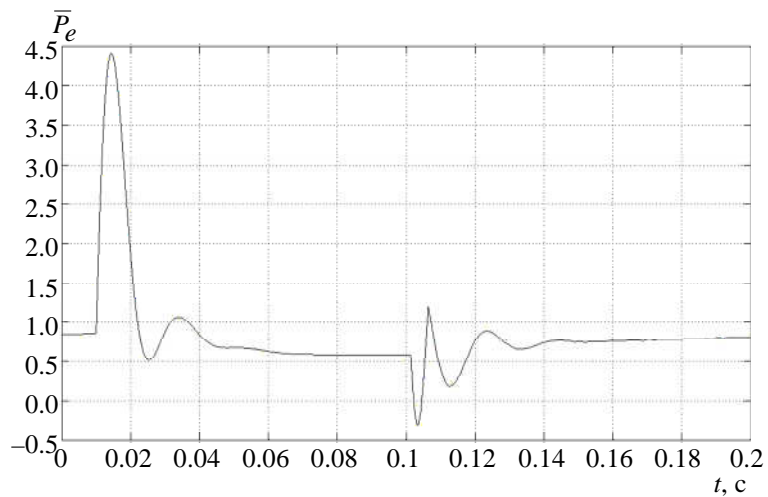


Рис. 4

Приведенные результаты показывают, что модель работает корректно. Это позволяет проводить необходимые исследования и, при необходимости, наращивать модель.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васин И. М., Токарев Л. Н. Физические процессы в электрических машинах и системах: математическое описание и расчет. СПб.: ЗАО «Инсанта» / Литера, 2008. 216 с.
2. Мелешкин Г. А., Меркурьев Г. В. Устойчивость энергосистем. Кн. 2. / НОУ «Центр подготовки кадров энергетики». СПб., 2006.
3. Борцов Ю. А., Соколовский Г. Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями. СПб.: Энергоатомиздат, 1992. 288 с.
4. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.; ил.

*P. Agandeev, G. Prokofiev*

#### *THE MATHEMATICAL MODEL OF THE HYDROPOWER UNITS OPERATING IN PARALLEL*

*The mathematical formulation of the hydropower unit is considered. The paper shows the opportunity of designing the computer model of the hydropower units operating in parallel and its' correctness.*

**Hydropower unit, hydraulic turbine, excitation system, mathematical model**



УДК 534.114

*А. А. Вьюгинова*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУМЕРНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ**

*Разработана модель продольных колебаний ультразвукового двумерного волновода, имеющего вид пластины с отверстиями, колеблющейся вдоль одной из сторон. Модель представляет собой набор связанных одномерных колебательных систем с распределенными параметрами, сосредоточенных упругостей и масс. Такая модель позволяет получить резонансные характеристики сложного двумерного волновода при различных изменениях его конструкции.*

**Ультразвуковой волновод, колебания стержней, колебания пластин, ультразвук**

Для осуществления ряда ультразвуковых технологий, таких как сварка, резка и другие, необходимы волноводы, поперечный размер которых значительно превосходит длину волны в материале. Для решения этих задач используются волноводы, представляющие собой пластину, однако для выполнения технологической задачи они должны колебаться не как пластина, а продольно – как стержень. Чтобы добиться такого эффекта, используются различные способы модификации формы пластины – локальное изменение толщины, добавление отверстий и др. Пример конструкции приведен на рис. 1.

Для выбора оптимальной конструкции, соответствующей решаемой задаче, обеспечения необходимой частоты и моды ультразвуковых колебаний волновода, а также для достижения максимума преобразования подводимой энергии в ультразвуковые колебания необходим предварительный расчет параметров волновода, важнейшим из которых является собственная частота.

Единственная возможность предварительного расчета, которая существует в настоящее время, это вычисление собственных частот ультразвукового волновода с заданной конструкцией с помощью метода конечных элементов. Отсутствие аналитического описания не позволяет в широком диапазоне вариантов конструкции прогнозировать ее резонансные свойства.

Сложность расчета параметров двумерного волновода заключается в том, что классическими уравнениями, описывающими колебания стержней и пластин, невозможно описать пластину, колеблющуюся в продольной моде по одной из сторон, имеющую к тому же отверстия и переменную толщину.



Моделирование ультразвуковых колебаний сложных систем всегда включает два этапа: 1) создание геометрической модели рассматриваемой системы; 2) ее математическое описание. Согласно предлагаемой оригинальной модели ультразвуковой двумерный волновод, имеющий вид пластины с отверстиями, представляется в виде набора связанных одномерных колебательных систем с распределенными параметрами с присоединенными массами и сосредоточенных упругостей (пружин) (рис. 2). Такая модель позволяет получить резонансные характеристики сложного двумерного волновода при различных изменениях его конструкции.

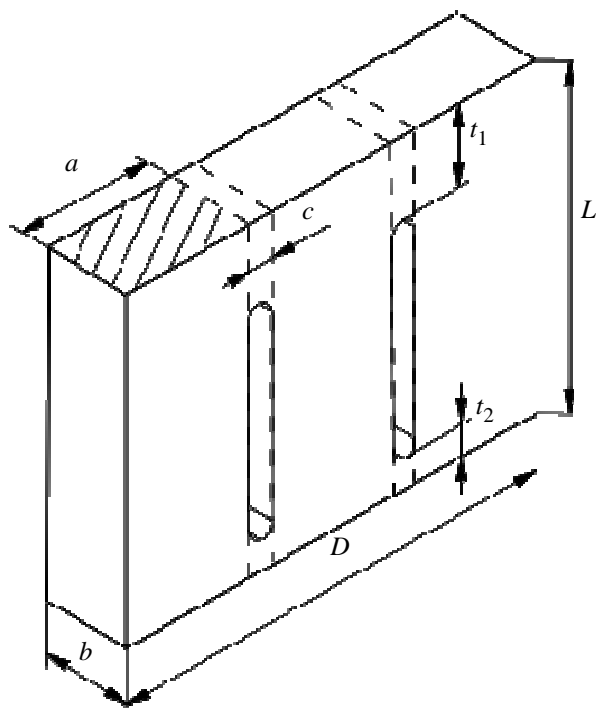


Рис. 1

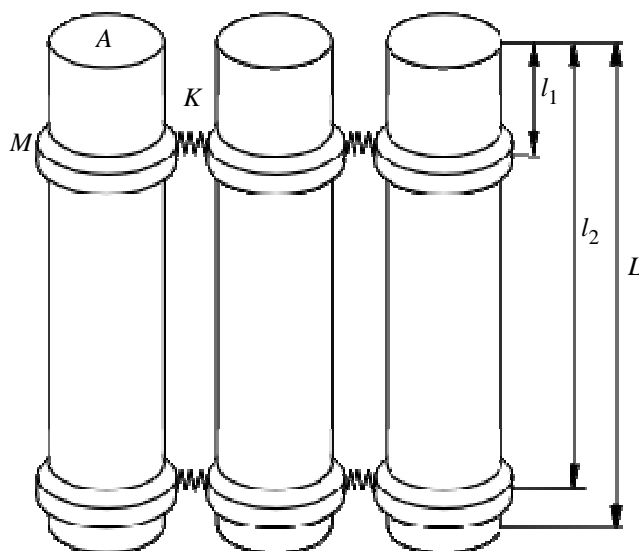


Рис. 2

Математическое описание колебаний двух связанных стержней содержится во многих работах, например в [1]. Рассмотрим колебательную систему, состоящую из трех стержней постоянного сечения, каждый из которых соединен пружинами жесткостью  $K_i$  с соседним (соседними) в точках  $l_i$ , к этим же точкам приложены сосредоточенные массы  $M_i$ .

Сначала кратко охарактеризуем колебания отдельного стержня постоянного сечения, чтобы на основе полученных выражений перейти к рассматриваемой колебательной системе. Продольные гармонические колебания стержня переменного сечения описываются дифференциальным уравнением Вебстера [2]. Решение этого уравнения имеет вид

$$X(x) = C_1 S_1(x) + C_2 S_2(x),$$

где  $X$  – смещение стержня;  $x$  – координата, вдоль которой происходит смещение;  $S_1$  и  $S_2$  – две линейно независимые фундаментальные функции, вид которых зависит от закона изменения сечения стержня;  $C_1$  и  $C_2$  – постоянные, определяемые из граничных условий. Для стержня постоянного сечения функции  $S_1$  и  $S_2$  имеют вид

$$S_1(x) = \cos(kx);$$

$$S_2(x) = \sin(kx),$$

где  $k$  – волновое число.

Для получения решения поставленной задачи удобно использовать нормированные фундаментальные функции, удовлетворяющие следующим условиям [1]:

$$\bar{S}_1(0) = 1, \quad \bar{S}'_1(0) = 0;$$

$$\bar{S}_2(0) = 0, \quad \bar{S}'_2(0) = 1,$$

где штрихом обозначена производная по координате  $x$ .

Из уравнения

$$\begin{bmatrix} \bar{S}_1(x) \\ \bar{S}_2(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1(0) & S'_1(0) \\ S_2(0) & S'_2(0) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} S_1(x) \\ S_2(x) \end{bmatrix}$$

получим

$$\bar{S}_1(x) = C_{11}S_1(x) + C_{12}S_2(x);$$

$$\bar{S}_2(x) = C_{21}S_1(x) + C_{22}S_2(x),$$

где

$$C_{11} = \frac{S'_2(0)}{S_1(0)S'_2(0) - S_2(0)S'_1(0)}; \quad C_{21} = \frac{-S_2(0)}{S_1(0)S'_2(0) - S_2(0)S'_1(0)};$$

$$C_{12} = \frac{-S'_1(0)}{S_1(0)S'_2(0) - S_2(0)S'_1(0)}; \quad C_{22} = \frac{S_1(0)}{S_1(0)S'_2(0) - S_2(0)S'_1(0)}.$$

Решение для смещения стержня, выраженное через нормированные фундаментальные функции, будет иметь вид

$$X(x) = X_0\bar{S}_1(x) + \frac{N_0}{EA(0)}\bar{S}_2(x).$$

Здесь  $X_0$  и  $N_0$  – смещение и осевая сила при  $x = 0$  соответственно. Осевая сила связана со смещением как

$$N(x) = EA(x)X'(x),$$

где  $E$  – модуль Юнга материала однородного стержня;  $A(x)$  – зависимость площади сечения стержня от координаты; в рассматриваемом случае стержень имеет постоянное сечение  $A$ .

Для продольных колебаний крайних стержней колебательной системы (первого и третьего), связанных только с одним соседним стержнем, смещение будет иметь вид [1]

$$X_1(x_1) = X_{11}(x_1) + \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_1A_1} \left\{ K_i [X_{1i}(l_{1i}) - X_{2i}(l_{2i})] - M_{1i}\omega^2 X_{1i}(l_{1i}) \right\} \bar{S}_{12}(x_1 - l_{1i})H(x_1 - l_{1i});$$

$$X_3(x_3) = X_{31}(x_3) + \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_3A_3} \left\{ K_i [X_{3i}(l_{3i}) - X_{2i}(l_{2i})] - M_{3i}\omega^2 X_{3i}(l_{3i}) \right\} \bar{S}_{32}(x_3 - l_{3i})H(x_3 - l_{3i}),$$

тогда для среднего стержня, связанного с двумя соседними:

$$X_2(x_2) = X_{21}(x_2) + \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_2A_2} \left\{ K_i [X_{2i}(l_{2i}) - X_{1i}(l_{1i})] - M_{2i}\omega^2 X_{2i}(l_{2i}) \right\} \bar{S}_{22}(x_2 - l_{2i}) \times$$

$$\times H(x_2 - l_{2i}) + \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_2A_2} \left\{ K_i [X_{2i}(l_{2i}) - X_{3i}(l_{3i})] - M_{2i}\omega^2 X_{2i}(l_{2i}) \right\} \bar{S}_{22}(x_2 - l_{2i})H(x_2 - l_{2i}),$$

где  $X_{11}(x_1)$ ,  $X_{21}(x_2)$  и  $X_{31}(x_3)$  – функции смещения первого участка первого стержня  $[0; l_{11}]$ , первого участка второго стержня  $[0; l_{21}]$  и первого участка третьего стержня  $[0; l_{31}]$  соответственно;  $x_1, x_2, x_3$  – локальные системы координат для каждого стержня. Подстрочные индексы при  $E$  и  $A$  указывают на номер стержня;  $K_i$  – жесткость  $i$ -й пружины;  $M_{1i}, M_{2i}$  и  $M_{3i}$  – сосредоточенные массы, приложенные, соответственно, к первому, второму и третьему стержням в точках  $x_1 = l_{1i}, x_2 = l_{2i}$  и  $x_3 = l_{3i}$ ;  $H(x)$  – функция Хевисайда;  $X_{1i}(x_1), X_{2i}(x_2)$  и  $X_{3i}(x_3)$  – это функции смещения  $i$ -го участка первого  $[l_{1, i-1}; l_{1i}]$ , второго  $[l_{2, i-1}; l_{2i}]$  и третьего  $[l_{3, i-1}; l_{3i}]$  стержней, которые определяются по рекуррентной формуле следующим образом [1]:

$$X_{1i}(x_1) = X_{1, i-1}(x_1) + \frac{1}{E_1 A_1} \left\{ K_{i-1} [X_{1, i-1}(l_{1, i-1}) - X_{2, i-1}(l_{2, i-1})] - M_{1, i-1} \omega^2 X_{1, i-1}(l_{1, i-1}) \right\} \times \bar{S}_{11}(x_1 - l_{1, i-1}) H(x_1 - l_{1, i-1}).$$

В подстрочных индексах фундаментальных функций первый индекс относится к номеру стержня, второй – к номеру самой функции.

Каждое выражение для смещения содержит только два начальных условия: начальное смещение  $X_0$  и начальную осевую силу  $N_0$ . Используя граничные условия для свободного стержня:

$$X'(0) = 0; \quad X'(L) = 0,$$

из первого получаем функции смещения первого участка стержней:

$$\begin{aligned} X_{11}(x_1) &= X_{10} \bar{S}_{11}(x_1), \\ X_{21}(x_2) &= X_{20} \bar{S}_{21}(x_2), \\ X_{31}(x_3) &= X_{30} \bar{S}_{31}(x_3); \end{aligned}$$

запись второго граничного условия дает систему из трех уравнений относительно  $X_{10}, X_{20}$  и  $X_{30}$  вида

$$\begin{aligned} B_{11} X_{10} + B_{12} X_{20} + B_{13} X_{30} &= 0, \\ B_{21} X_{10} + B_{22} X_{20} + B_{23} X_{30} &= 0, \\ B_{31} X_{10} + B_{32} X_{20} + B_{33} X_{30} &= 0. \end{aligned}$$

Приравняв определитель системы к нулю, получим частотное уравнение, решениями которого являются собственные частоты колебательной системы.

Рассмотрим конкретную колебательную систему, приведенную на рис. 2. Все стержни имеют постоянное сечение  $A$ , одинаковую длину  $L$ , все сосредоточенные массы равны  $M$ , жесткость всех пружин равна  $K$ , и все они расположены на расстояниях  $l_1$  и  $l_2$  от начала координат.

Теперь необходимо связать параметры конструкции реального ультразвукового волновода с параметрами моделирующей его колебательной системы. Очевидно, что длина волновода  $L$  соответствует длине стержней  $L$ . Пружины и сосредоточенные массы расположены на расстоянии  $l_1 = t_1$  и  $l_2 = L - t_2$ ; пусть  $t_1 = t_2 = t$ . Упругими элементами, подобиями пружин, которые связывают конструкцию волновода, являются переключки шириной  $c$ , рас-

положенные выше и ниже продольных отверстий (см. рис. 1); их жесткость определим как произведение модуля Юнга материала на площадь поперечного сечения:  $K = Ebc$ . Эти же перемычки помимо упругости обладают массой. Поскольку перемычек две, а стержней в рассматриваемой модели три, распределим массы поровну на каждый стержень следующим образом:  $M = \frac{2}{3}bct\rho$ , где  $\rho$  – плотность материала волновода. Обратимся к сечению.

Реальный волновод можно мысленно разбить на отдельные стержни прямоугольного сечения (см. рис. 1), модель же (см. рис. 2) состоит из осесимметричных (в рассматриваемом случае цилиндрических) стержней. Напрямую между ними невозможно провести аналогию, поэтому предлагается рассмотреть два варианта связи реальной конструкции с моделью: 1) модель равной площади сечения, когда  $A = ab$ ; 2) модель равной ширины: площадь рассчитывается так, как будто ширина  $a$  стержня прямоугольного сечения – это диаметр стержня круглого сечения, т. е.  $A = \frac{\pi a^2}{4}$ .

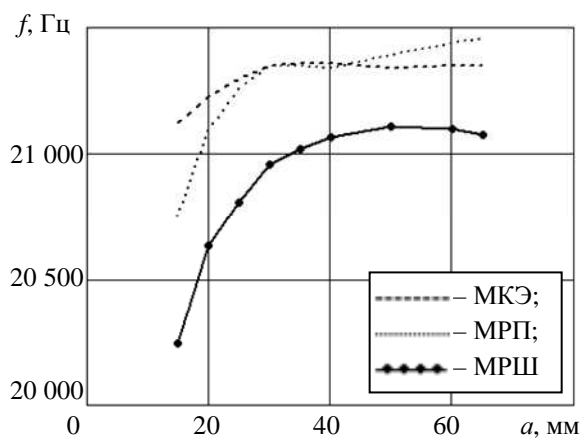


Рис. 3

На основе полученных аналитических выражений рассмотрим пример численного расчета зависимости первой собственной частоты (основной продольной моды) от ширины волновода  $D$ . Изменение ширины задается изменением  $a$  от 15 до 65 мм с шагом 5 мм,  $c = 8$  мм. Таким образом,  $D$  изменяется в диапазоне от 61 до 211 мм. Остальные параметры заданы как  $t = 10$  мм,  $b = 22$  мм,  $L = 120$  мм. Материал волновода – сталь:  $E = 210 \cdot 10^9$  Па,  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>.

На рис. 3 приведена зависимость первой собственной частоты  $f$  волновода от ширины

для двух вариантов моделей: модели равной площади (МРП) и модели равной ширины (МРШ). На графике также показана аналогичная зависимость, полученная с помощью метода конечных элементов (МКЭ).

Как видно из представленного графика, данный способ моделирования двумерного волновода сложной формы показывает прекрасную работоспособность – характер изменения полученных кривых согласуется с кривой, полученной по МКЭ. На большей части кривой, рассчитанной по МРП, полученные значения частот отличаются от полученных по МКЭ не более чем на 500 Гц, но важнее, что обе эти кривые – кривые с насыщением. Кривая по МРШ несколько ближе к зависимости по МКЭ на начальном участке, однако не имеет насыщения на завершающем участке, что позволяет говорить о нецелесообразности ее применения при больших значениях  $D$ .

На настоящий момент разработана модель продольных колебаний пластины вдоль одной из сторон, имеющей два продольных отверстия, в описании используется четыре упругих элемента, толщина принята постоянной. Модель позволяет рассчитывать резонансную частоту волноводов такого типа при изменении его толщины, ширины и конфигурации отверстий. Данный способ моделирования открывает широкие перспективы, так

как на его основе можно учесть большое число и других конструктивных особенностей двумерных ультразвуковых волноводов сложных форм: это и переменное сечение по длине, и различная длина участков волновода, и т. д.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li Q. S., Li G. Q., Liu D. K. Exact solutions for the longitudinal vibrations of rods coupled by translational springs // International J. of Mechanical Sciences. 2000. Vol. 42. P. 1135–1152.
2. Меркулов Л. Г., Харитонов А. В. Теория и расчет составных концентраторов // Акуст. журн. 1959. Т. 5, вып. 2. С. 183–190.

A. A. Vjuginova

#### MODELING OF TWO-DIMENSIONAL ULTRASONIC TECHNOLOGICAL SONOTRODES

*Model for description of longitudinal oscillation of two-dimensional ultrasonic sonotrode which has the appearance of plate with holes oscillating along one side have been developed. Proposed model represents an array of coupled one-dimensional oscillation systems with distributed parameters, concentrated elasticities and masses. This model allows obtaining of resonance characteristic of complex two-dimensional sonotrode for different variation of its construction.*

**Ultrasonic sonotrode, rod oscillation, plate oscillation, ultrasound**

УДК 681.51, 531.383

*A. M. Боронахин, Ю. А. Лукомский, А. Г. Шпекторов,  
Ха Мань Тханг, Чан Танг Дык*

### **ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К СИСТЕМАМ НАВИГАЦИИ И ОРИЕНТАЦИИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ**

*Предложены способы совместного решения задач навигации и управления движением морских подвижных объектов. Исследована система управления движением судна на подводных крыльях. Разработаны требования по точности к системе навигации и ориентации.*

**Управление движением, скоростные суда, интегрированные системы ориентации и навигации, калмановская фильтрация**

В течение многих лет системы управления движением морских подвижных объектов улучшались и эволюционировали, главным образом, благодаря развитию средств измерения кинематических параметров. Реализованные возможности измерения угловой скорости рыскания судна, дрейфа, географических координат приводили к появлению систем стабилизации курса и путевого угла, систем стабилизации на заданной траектории и т. д.

В настоящее время ситуация изменилась. Современные средства навигации могут измерять параметры движения морских подвижных объектов практически с любой заданной точностью, которая достигается комплексированием разных источников информации и высокой производительностью средств обработки навигационных данных. Однако также следует отметить, что высокоточные навигационные системы остаются дорогостоящими и их применение может оказаться нерентабельно.

Таким образом, если раньше задача построения системы управления напрямую зависела от возможностей навигационного обеспечения, то сейчас можно говорить об обратном: проектировщик системы вправе самостоятельно выдвигать требования к точности измерения кинематических параметров. Соответственно, обеспечение требуемых показателей качества системы при заданных погрешностях измерений представляет собой принципиально новую задачу управления.

При описании задачи управления, очевидно, в математическую модель объекта должна быть включена модель динамических погрешностей средств измерения. Неординарность задачи обусловлена тем, что вид модели динамических погрешностей изначально может быть неизвестен. Действительно, выбор структуры и состава информационно-измерительной системы делается на основе требований к качеству измерений выходных координат, которые, в свою очередь, обусловлены качеством управления, обеспечиваемого синтезируемыми законами. Можно предложить два варианта выхода из «замкнутого круга»:

1. Выдвинуть предположение о том, что структура информационно-измерительной системы является известной, и дополнительному определению принадлежат только параметры модели динамических погрешностей, зависящие от конкретных устройств измерения. На практике предварительное согласование состава средств измерения не представляет большого труда. В этом случае математическая модель объекта и средств измерений становится неопределенной лишь параметрически, и задачу можно решать методами, сходными с синтезом робастного управления. Главным недостатком такого подхода видится следующее: если в случае недостижимости требуемого качества измерения придется изменять структуру информационно-измерительной системы, задачу следует решать заново, при том результативность решения данной задачи также не гарантирована.

2. Получить предварительное решение задачи синтеза для упрощенной модели – без динамики изменения погрешностей – на основе стохастического подхода. В этом случае вектор погрешностей предполагается случайным процессом с нормальным распределением, ковариация которого задана некоторым образом. Варьируя величину ковариации, можно для каждого значения решать задачу синтеза и, исследуя свойства замкнутой системы, сформировать требования к качеству измерения именно через ковариацию случайного процесса погрешности каналов измерения. В случае когда структура информационно-измерительной системы заранее не определена, такой способ является единственно возможным.

В данной статье исследуется влияние погрешностей измерения на динамику системы управления движением судна на подводных крыльях в вертикальной плоскости. По результатам исследований формируются требования к точности измерения кинематических параметров. Состав средств измерений и вид модели динамических погрешностей полагаются неопределенными.

**Исследование системы управления движением судна на подводных крыльях (СПК).** Характерными особенностями движения СПК с глубоко погруженными крыльями являются, во-первых, собственная неустойчивость в вертикальной плоскости, во-вторых, отсутствие волновых возмущений в крыльевом режиме [1].

Для поставленной цели допустимо в качестве исходной рассматривать линейное приближение математической модели судна. Синтез законов управления для СПК с глубоко погруженными крыльями подробно описан в [2]. Математическая модель имеет вид

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega_z \\ \alpha \\ \psi \\ y_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{42} & a_{43} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_z \\ \alpha \\ \psi \\ y_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $\omega_z$  – угловая скорость килевой качки;  $\psi, \alpha$  – углы дифферента и атаки соответственно;  $y_g$  – ордината центра масс СПК;  $\delta_1, \delta_2$  – углы поворота закрылков носового и кормового крыльев;  $a_{ij}, b_{ij}$  – постоянные коэффициенты, приведенные в таблице.

$a_{11}$	-39.2	$a_{22}$	-16.0	$b_{11}$	-20.7
$a_{12}$	-3.65	$a_{23}$	-0.34	$b_{12}$	12.6
$a_{13}$	-5.14	$a_{24}$	0.234	$b_{21}$	1.83
$a_{14}$	0.965	$a_{42}$	-12.0	$b_{22}$	2.04
$a_{21}$	0.9	$a_{43}$	12.0	-	-

Закон управления в виде  $[\delta_1 \ \delta_2]^T = G[\omega_z \ \alpha \ \psi \ y_g]^T$  был найден для разных соотношений нагрузки носового и кормового крыльев. Для исследования можно использовать закон, соответствующий одинаково нагруженным крыльям.

Математическая модель (1) дополняется уравнением погрешностей

$$\mathbf{y} = \mathbf{x} + \mathbf{v},$$

где  $\mathbf{y}$  – вектор измеряемых параметров СПК;  $\mathbf{x}$  – вектор состояния системы (1);  $\mathbf{v}$  – случайный процесс, распределенный по нормальному закону и имитирующий погрешность средств измерений. Погрешность задается диагональной матрицей ковариаций процесса  $\mathbf{v}$ , которая варьируется в процессе исследования.

Результаты моделирования изменения высоты центра масс СПК приведены на рис. 1 (1 – движение без учета погрешностей, 2 – с учетом погрешностей). Моделирование показало, что система управления начинает терять устойчивость уже при небольших усредненных погрешностях координат. Найденное устойчивое движение, приведенное на рис. 1, соответствует следующим погрешностям: 1' – для измерений углов; 1 мм – для высоты центра масс. Очевидно, система навигации и ориентации с такими точностными характеристиками окажется нерентабельной.

Необходимость снижения требований по точности к измерительной системе приводит к необходимости использования фильтра Калмана [3]. Закон управления в этом случае формируется по вектору оценки состояния. Для достижения наблюдаемости системы достаточно измерять только высоту центра масс СПК. Поэтому при моделировании сравнивались два фильтра. Результаты моделирования приведены на рис. 2. Для кривой 1 вектор оценок переменных состояния восстановлен по измерениям высоты центра масс СПК. Кривая 2 моделирует движение системы по фильтрованным оценкам при измерении полного вектора состояния.

Результаты моделирования демонстрируют, что при измерении и фильтрации полного вектора состояния достигается лучшее качество динамики. Требования к средствам измерения по точности удается снизить. Данная система управления СПК требует следующие предельные погрешности измерения:

- по угловой скорости килевой качки –  $\pm 0.1$  %/с;
- по углам атаки и дифферента –  $\pm 0.5$  °;
- по высоте центра масс – 0.1 м.



Рис. 1

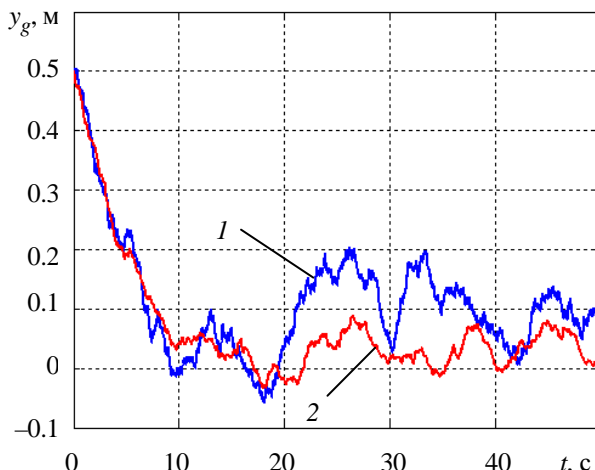


Рис. 2

На основании изложенного можно сделать следующие выводы. Использованный подход может широко применяться при формировании требований к техническим средствам ориентации и навигации в разнообразных системах автоматического управления движением. Применение фильтров Калмана в большинстве случаев позволяет снизить затраты на создание системы при сохранении качества управления. Выработанные требования к решению задачи ориентации и навигации позволяют полагать, что для их обеспечения в составе инерциального модуля целесообразно использовать интенсивно развивающиеся в последние годы волоконно-оптические и микромеханические гироскопы [4]. Использование микромеханических чувствительных элементов одновременно позволяет улучшить массогабаритные характеристики измерительных приборов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукомский Ю. А., Корчанов В. М. Управление морскими подвижными объектами. СПб.: Элмор, 1996.
2. Лукомский Ю. А., Шпекторов А. Г. Непрямая квадратичная задача при синтезе систем управления движением скоростных судов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2008. № 1. С. 26–34.
3. Степанов О. А. Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации. СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», 2000.
4. Анучин О. Н., Емельянцева Г. И. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов / под общ. ред. акад. РАН В. Г. Пешехонова. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»», 2003.

*A. M. Boronahin, Yu. A. Lukomski, A. G. Shpektorov, Ha Man Thang, Tran Tang Duc*

#### *THE BASIS OF NAVIGATION SYSTEM REQUIREMENTS FOR SOLVING A PROBLEM OF MARINE VEHICLES MOTION CONTROL*

*The approaches of combined navigation and control problems solution are suggested for marine vehicles. The control system of hydrofoil motion is analyzed. The precision requirements to system of navigation and orientation are developed.*

**Motion Control, High-Speed Vehicles, System Of Navigation And Orientation, Kalman**





УДК 615.471:617.7

*С. Н. Даровских, Е. П. Попечителев*

## **НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ МЕХАНИЗМОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ ФИЗИОТЕРАПИИ**

*На основе известных закономерностей развития патологического процесса рассмотрена термодинамическая модель энергетических и информационных воздействий на объекты живой природы, приведено описание отдельных механизмов информационного управления гомеостазом организма, указаны их особенности.*

**Электромагнитные излучения, гомеостаз, информационная физиотерапия, аденозинтрифосфат, энергия, космический микроволновый фон, антропогенный фактор**

Природа наделила живые организмы удивительной способностью использовать природные электромагнитные излучения (ЭМИ) для поддержания своего гомеостаза. Представления о механизмах информационного взаимодействия живых организмов с природным электромагнитным фоном, несмотря на предпринимаемые усилия в этом направлении [1], [2], носят скорее частный, чем системный характер [3]. Однако это не помешало в России и ряде других стран создать целую серию физиотерапевтических устройств, эффективность которых носит противоречивый характер. Эта противоречивость лежит в основе недоверчивого отношения представителей медицинской науки и населения к физиотерапевтическим методам лечения заболеваний человека. Вместе с тем, потенциал информационной терапии огромен.

В медицинской практике нашли применение методы визуальной (с помощью специально подобранных картин или рисунков), музыкальной (подбор мелодий, звуковых рядов и др.), речевой (в психиатрии) и других терапий [4]. К этому виду терапии следует отнести и вещественные методы, в которых носителем информации выступают фармакологические средства, пищевые добавки и другие вещества, поступающие в организм человека в малых дозах, но содержащие в себе комбинации молекул, которые оказывают существенное управляющее воздействие на состояние организма. В таких вариантах в качестве управляющих воздействий выступает не интенсивность воздействующего фактора, а временные (или пространственные) изменения его параметров, т. е. параметров, несущих определенную информацию для управляемой системы организма. Однако в практической

медицине хорошо известно, что широко распространенные фармакологические методы не всегда эффективны, к тому же в значительной своей части обладают побочным действием. В качестве носителя информации может выступать и электромагнитное поле определенной частотно-временной структуры и интенсивности при условии, что в его параметрах тоже содержится необходимая для организма управляющая информация.

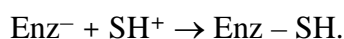
Для разработки и создания высокоэффективных устройств физиотерапии необходимо осознание *определяющей роли электромагнитного фактора в эволюции организмов* и выявление на его основе основных закономерностей их взаимодействия с электромагнитными излучениями природного и антропогенного происхождения. В статье приведен анализ таких взаимодействий и предложена гипотеза, объясняющая эффективность информационной физиотерапии.

**Общие закономерности развития патологического процесса.** Несмотря на общеизвестное утверждение, что «каждая болезнь имеет свою схему патогенеза», известна и общая закономерность, свойственная широкому спектру заболеваний человека [5]. Она связана с возникновением в тканевых структурах гипоксических явлений, обусловленных различными факторами эндогенного и экзогенного происхождения, приводящих к нарушению гомеостаза организма. Прямым следствием возникающей в организме человека гипоксии, сопровождающейся смещением водородного показателя среды (рН) в кислую сторону, является снижение эффективности производства аденозинтрифосфата (АТФ) – основного источника энергии клетки. В его основе лежит замещение в клетках аэробного энергообмена анаэробным. Для оценки количественных показателей возможного при этом уменьшения «производства» АТФ сравним результаты реакций окисления (1), (2) одного моля глюкозы (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>) при аэробном и анаэробном клеточном дыхании соответственно [5]

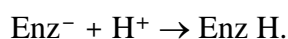


Из приведенных реакций следует, что количество образующегося АТФ при аэробном дыхании в 19 раз больше, чем при анаэробном. Основным продуктом анаэробного энергообмена является молочная кислота CH<sub>3</sub>CHONCOOH, которая как бы связывает большую часть АТФ, делает невозможным его использование в метаболических процессах обеспечения гомеостаза.

Одной из причин снижения эффективности производства АТФ в условиях гипоксии является процесс инактивации ферментов в дыхательной цепи митохондрий. При гомеостазе уравнение реакции, описывающее взаимодействие отрицательно заряженного фермента (Enz<sup>-</sup>) с положительно заряженным субстратом (SH<sup>+</sup>), имеет вид [5]



Ее результатом является образование фермент-субстратного комплекса Enz-SH. При сдвиге рН в кислую сторону наблюдается процесс протонирования ферментов (их инактивации избыточным содержанием в цитозоле протонов (H<sup>+</sup>))



Таким образом, развитие патологического процесса характеризуется существенным уменьшением в клеточных структурах синтезируемого в них АТФ. Это уменьшение эффективности синтеза АТФ лежит в основе возникновения дефицита свободной части внутренней энергии, необходимой для поддержания протекания гомеостатических реакций в организме.

В связи с этим актуальны физиотерапевтические методы, направленные на восстановление в объектах живой природы биоэнергетического потенциала. Для установления возможных механизмов восстановления в организмах указанного потенциала с помощью различных видов физических воздействий и определения их особенностей наиболее эффективен термодинамический подход.

**Термодинамическая модель энергетических и информационных воздействий на объекты живой природы.** Различают энергетические и информационные виды физических воздействий на объекты живой природы. Известно несколько гипотез, объясняющих различия в результатах указанных воздействий. В соответствии с одной из них эти различия можно свести к следующим их особенностям [6].

Энергетические воздействия (ЭВ) за счет выраженного теплового эффекта направлены непосредственно на рост энтропии биологического объекта  $S$ , обусловленный увеличением его температуры за время воздействия на величину  $\Delta T = T_2 - T_1$ , где  $T_1$  и  $T_2$  – термодинамические температуры биологического объекта до и после энергетического воздействия соответственно. Изменение  $\Delta S$  энтропии биологической системы при ее переходе из состояния 1 (начальное) в состояние 2 (конечное) не зависит от вида процесса перехода и определяется<sup>1</sup> выражением

$$\Delta S = S_2 - S_1 = (M/\mu) (C_{V\mu} \ln(T_2/T_1)),$$

где  $M$  – масса вещества;  $\mu$  – его молярная масса;  $C_{V\mu}$  – молярная теплоемкость вещества при постоянном объеме.

Указанный рост энтропии  $\Delta S$  происходит непосредственно с одновременным увеличением внутренней энергии  $U$  биологического объекта на величину  $\Delta U$ , связанную с изменением энтропии  $\Delta S$  и другими параметрами соотношением, описывающим второе начало термодинамики

$$\Delta U = \Delta F + T \Delta S,$$

где  $\Delta F$  – изменение свободной части внутренней энергии;  $T$  – термодинамическая температура биологического объекта;  $T \Delta S = \Delta E_{\text{связ}}$  – изменение связанной части внутренней энергии.

Цель энергетического воздействия состоит в том, чтобы создать необходимые условия для последующего (после прекращения воздействия) уменьшения энтропии путем «включения» в биологических объектах механизмов самосинхронизации, или так называемых механизмов перехода от «хаоса» к «порядку». Это происходит благодаря свободной части внутренней энергии  $\Delta F$ , также сообщенной биологической системе с помощью энергетического воздействия. В этом состоит главная особенность такого воздействия на объекты живой природы.

---

<sup>1</sup> При модельном представлении структуры биологической ткани в виде «идеального газа» [7].

Указанная особенность накладывает, в свою очередь, определенные ограничения на применение энергетических воздействий для коррекции различного рода нарушений в живых организмах. Эти ограничения связаны с выполнением ряда условий (требований) для эффективного и безопасного их применения в лечебных целях [7]. Одним из таких требований при назначении энергетического воздействия для лечения является состояние ремиссии того или иного заболевания. Только при его выполнении можно запустить с помощью внешнего энергетического фактора в живом организме его механизмы самосинхронизации. В противном случае: в состоянии «разгара» патологического процесса, в период острого его течения, дополнительное, даже кратковременное, увеличение связанной части внутренней энергии  $\Delta E_{\text{связ}}$  биологической системы за счет внешнего энергетического воздействия будет стимулировать его развитие и, как следствие, способствовать усилению в ней «хаоса». Такое воздействие в указанных состояниях исключает потенциальную возможность включения в живом организме механизмов перехода от «хаоса» к «порядку», т. е. запуска механизмов самосинхронизации. Энергетическое воздействие может привести к появлению отсутствующих ранее патологий из-за мощного воздействия на другие, возможно ослабленные физиологические процессы.

Информационные воздействия (ИВ) отличаются от ЭВ тем, что они вызывают изменение внутренней энергии  $\Delta U$  без изменения связанной ее составляющей ( $\Delta E_{\text{связ}} = 0$ ). Механизм их корректирующего действия основан на изменении только свободной части внутренней энергии  $F$ . По отношению к характеру изменения внутренней энергии возможны несколько видов информационных воздействий.

Первый из них направлен на стимулирование процессов, приводящих к увеличению потенциала свободной части внутренней энергии  $F$  на величину  $\Delta F > 0$ , с последующим ее использованием организмом для коррекции нарушений его регуляторных функций. Одним из таких процессов может быть процесс усиления с помощью электромагнитных излучений низкой интенсивности эффективности синтеза АТФ в условиях гипоксии клеточных структур [6]. Такое информационное воздействие свободно от каких-либо ограничений на его применение. При этом его эффективность тем выше, чем раньше оно может быть применено к биологическому объекту *без каких-либо ограничений, связанных с периодом протекания у него того или иного заболевания.*

Этот вид воздействия следует рассматривать как более предпочтительный в сравнении с воздействием, направленным на мобилизацию защитных функций организма. При таком виде воздействия происходит «включение» механизмов регуляции, действие которых основано на использовании (уменьшении) имеющегося в живом организме потенциала свободной энергии  $F$ . Изменение свободной энергии в этом случае отрицательно ( $\Delta F < 0$ ). Эффективность такого воздействия зависит от имеющегося в живом организме запаса свободной энергии, и поэтому его применение для коррекции регуляторных функций в организме *не всегда приводит к положительному результату.* Подтверждением вышесказанному служит опыт применения устройств электромагнитной терапии в экспериментах и медицинской практике [8]–[10].

Возможна и комбинация рассмотренных видов информационного воздействия на объекты живой природы. В ее основе лежит одновременное воздействие на организм физических факторов, одни из которых направлены на увеличение свободной части внутренней энергии, а другие – на стимулирование его защитных функций, связанных с ис-

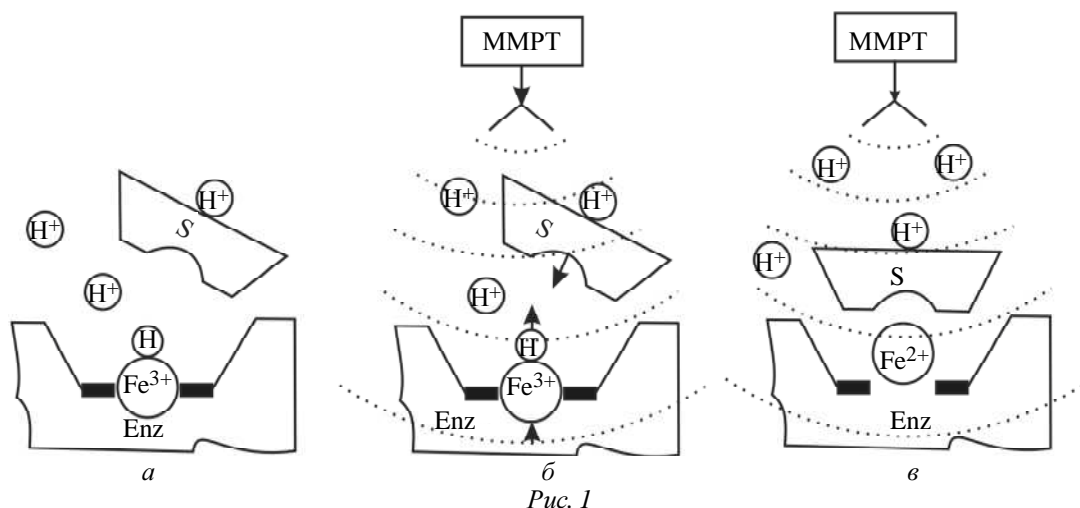
пользованием имеющего потенциала свободной энергии на организменном уровне.

**Механизмы информационного управления гомеостазом организма.** В соответствии с рассмотренными термодинамическими особенностями информационного управления гомеостазом организма возможны механизмы, которые условно можно разделить на две группы:

– механизмы стимулирования процессов увеличения в организме потенциала свободной части внутренней энергии;

– механизмы стимулирования защитных функций организма.

В основу одного из механизмов стимулирования процессов увеличения в организме потенциала свободной части внутренней энергии может быть положена идея использования магниторезонансных взаимодействий ЭМИ с гемсодержащими протеинами, находящихся в состоянии протонирования [8]. Избирательное поглощение ионами железа  $Fe^{3+}$  ЭМИ приведет их в возбужденное состояние, которое будет сопровождаться ослаблением их связи с протонами. Конечным результатом такого взаимодействия станет депротонирование фермента или другой белковой молекулы с гемгруппой в своем составе<sup>1</sup>. На рис. 1 представлено пояснение процесса магниторезонансного взаимодействия протонированного фермента согласно модели «жесткой матрицы» Фишера [5] с электромагнитным излучением: *a* – исходное состояние протонированного фермента; *б* – поглощение ионом железа  $Fe^{3+}$  электромагнитного излучения, приводящего к депротонированию фермента; *в* – процесс формирования фермент-субстратного комплекса.



Восстановление ферментативной активности протеинов, участвующих в синтезе АТФ, лежит в основе ослабления гипоксических явлений в клеточных структурах, способствует увеличению свободной части внутренней энергии организма, необходимой для восстановления гомеостаза организма.

Для учета многообразия дисперсионных свойств тканей организма и пространственной разобщенности клеточных образований, находящихся в состоянии гипоксии, необходимо использование ЭМИ с частотно-временной структурой, являющегося аналогом космического микроволнового фона [6]. Это позволяет реализовать объемный характер воздействия ЭМИ на биологические объекты. Рисунок 2 поясняет механизм взаимодействия ЭМИ природного происхождения с биологическим объектом.

<sup>1</sup> Устройство, создающее ЭМИ, направленное на активацию протонированных гемсодержащих белковых молекул, получило название: «устройство микроволновой магниторезонансной терапии (ММРТ)» [9].



Рис. 2

Использование этого излучения позволяет осуществлять в местах поглощения ЭМИ не только депротонирование ферментов, участвующих в синтезе АТФ, но и возбуждение упругих колебаний (на рис. 2 показаны окружностями), создающих в тканях организма сложную картину сжатий и разрежений, способствующих восстановлению гуморальной регуляции в местах ее нарушения [6].

В основе механизмов стимулирования защитных функций организма лежат разнообразные процессы адаптации к изменениям внешней и внутренней сред. Эти процессы энергозатратны (проходят с потреблением свободной части внутренней энергии) и направлены на ослабление воздействия на организм негативных факторов среды его обитания.

Примером механизма стимулирования защитных функций организма может служить воздействие на объект живой природы электромагнитного излучения антропогенного происхождения. При таком воздействии можно указать на некоторые особенности механизма взаимодействия организмов с подобными такого рода ЭМИ.

В первую очередь следует обратить внимание на тот факт, что концентрация поглощенной энергии будет происходить в той области живой ткани, которая наилучшим образом согласована с частотно-временной структурой падающего на нее ЭМИ. При этом в условиях ослабленной или малоэффективной системы терморегуляции будет наблюдаться процесс накопления поглощенной энергии. Последнее будет сопровождаться повышением температуры в этой области живой ткани (рис. 3 поясняет механизм взаимодействия живой ткани с ЭМИ антропогенного происхождения). Часть поглощенной энергии будет использована на возбуждение упругих колебаний, которые, радиально распространяясь, окажут механическое воздействие на структурные элементы биологических тканей (рис. 2). Увеличение температуры в живой ткани до значений, превышающих допустимые пределы, служит является основной причиной возникновения гипоксических явлений в организме, приводящих к нарушению гомеостаза. Пространственная сосредоточенность источника упругих колебаний, пульсирующий и моночастотный их характер будут только усиливать негативное воздействие на организм ЭМИ антропогенного происхождения [6]. В его основе лежит явление так называемой усталости нейронов, подвергающихся постоянному (непрерывному во времени) воздействию со стороны упругих колебаний, возбуждаемых ЭМИ антропогенного происхождения. Следствием этого являются дополнительные (к уже указанным) нарушения в механизмах нейронной, а затем и гуморальной регуляции.

Экспериментально установлено [9], что описанные процессы в организме сопровождаются активацией в нем системы кроветворения с целью восстановления кислородотранспортной функции крови, направленной на ослабление гипоксических явлений в тканевых структурах. Увеличение количества эритроцитов и гемоглобина в этих условиях следует рассматривать как результат адаптации организма к изменениям внешней и внутренней среды организма.

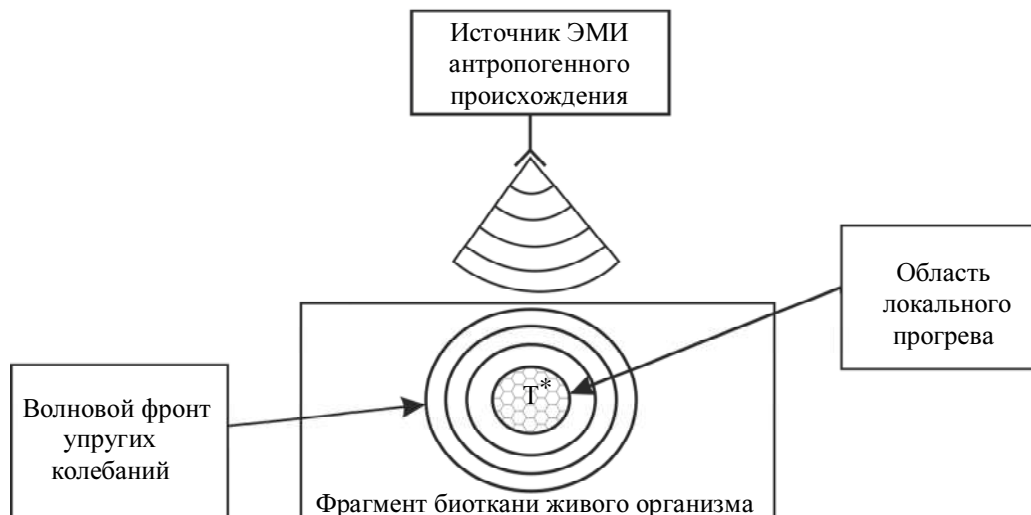


Рис. 3

Указанная активация системы кроветворения при искусственном усилении гипоксических явлений в тканевых структурах организма лежит в основе физиотерапевтического эффекта большого класса устройств, использующих различные поля и излучения с простой (неприродной) частотно-временной структурой. Их использование в медицинской практике, как было отмечено, не всегда приводит к желаемому результату.

Рассмотренный на основе исследования закономерностей развития патологического процесса термодинамический подход к определению особенностей различных видов физических воздействий на организм человека выявил многообразие их проявления. Это особенно важно в отношении информационных воздействий и соответствующих им основных механизмов управления гомеостазом организма. Учет рассмотренных особенностей в разработке устройств физиотерапевтического назначения позволит создать высокоэффективные комплексы профилактики и лечения широкого спектра заболеваний человека. Их внедрение в систему практического здравоохранения позволит отказаться от большого разнообразия существующих малоэффективных (в пределах потенциально опасных) приборов физиотерапии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бинги В. Н. Магнитобиология. Эксперименты и модели. 2-е изд. М.: МИЛТА. 2000. 592 с.
2. Пряхин Е. А., Аклеев А. В. Влияние неионизирующих электромагнитных излучений на животных и человека / РАМН, Южно-Уральский научный центр. Челябинск, 2007. 219 с.
3. Попечителей Е. П. Системный анализ медико-биологических исследований. Саратов: Научная книга, 2009. 368 с.
4. Попечителей Е. П. Система технических методов управления состоянием человека // Материалы I Международ. науч.-практ. конф. «Инновационные технологии управления здоровьем и долголетием человека». СПб., 2010. С. 298–309.
5. Грин Н., Стаут У., Тейлор Д. Биология. В 3 т. / Под ред. Р. Сопера. М.: Мир, 1993. Т. 1. 368 с.

6. Даровских С. Н. Основы построения устройств информационной электромагнитной терапии. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ. 2011. 138 с.
7. Пономаренко Г. Н., Турковский И. И. Биофизические основы физиотерапии: Учеб. пособие. М.: Медицина, 2006. 176 с.
8. Пономаренко Г. Н. Физиотерапия. М.: Медицина, 2004. 545 с.
9. Некоторые аспекты информационного подхода в физиотерапии / С. Н. Даровских, А. Н. Узунова, В. М. Бойцов, А. А. Разживин // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2002. № 12. С. 27–32.
10. Исследование модифицирующего действия на биологические объекты электромагнитных излучений низкой интенсивности в комплексе воздействия их с ионизирующими потоками энергии / С. Н. Даровских, Е. И. Толстых, А. А. Разживин и др. // Биомедицинская радиоэлектроника. 1999. № 8. С. 31–35.
11. Самойлов В. О. Медицинская физика: Учебник. СПб.: Спецлит, 2007. 560 с.

*S. N. Darovskikh, E. P. Popchitelev*

#### *SOME ASPECTS OF MECHANISMS OF INFORMATIVE PHYSIOTHERAPY*

*On the basis of the known conformities to law of development of pathological process the thermodynamics model of the power and informative affecting is considered objects of wild-life, description of separate mechanisms of informative management the homeostasis of organism is resulted, their features are indicated.*

**Electromagnetic radiations, homeostasis, informative physiotherapy, adenosinetriphosphate, energy, space microwave background, anthropogenic factor**

615.47

**Ю. А. Безгодков, К. Ауди, Г. Д. Дмитриевич,  
О. П. Кормилицын, М. М. Марков**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ БИОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТАЗОБЕДРЕННЫХ СУСТАВАХ**

*Исследуется нормальная ходьба и ходьба пациентов с деструктивно-дистрофическими заболеваниями тазобедренного сустава. Полученные данные используются в математическом обеспечении подсистемы биомедицинской САПР для эндопротезирования.*

**Биомеханика, ускорения, эндопротезирование тазобедренного сустава, биомеханическая САПР**

Деструктивно-дистрофические заболевания суставов являются одной из актуальных проблем ортопедии и имеют не только медицинское, но и социальное значение [1]–[3]. Это обусловлено их широкой распространенностью: так, в Санкт-Петербурге частота заболеваний крупных суставов у взрослых составляет 353,3 случая на 10 000 жителей [4]. Наиболее распространенный и эффективный метод лечения данных видов патологии тазобедренного сустава – эндопротезирование, претерпевшее за последние десятилетия существенное изменение и являющееся на сегодняшний день востребованным высокотехнологичным методом лечения [1]; [4]. Несмотря на достигнутые успехи улучшение результатов эндопротезирования тазобедренного сустава является важной задачей в сфере высоких технологий. Неотъемлемой частью изучения результатов эндопротезирования тазобедренного сустава служит биомеханическая оценка его опорной и двигательной функций [1]; [5]. В связи с практическим отсутствием в опубликованной литературе [6] интересующих нас биомеханических данных в настоящей работе предпринята попытка изучения биомеханических особенностей, возникающих в области тазобедренного сустава при ходьбе в норме и при заболеваниях этого сустава, а также моделирования этих особенностей средствами САПР.



Исследование проводилось на двух группах пациентов. В первую, контрольную группу вошло 30 человек без патологии опорно-двигательной системы. Во вторую, основную группу вошло 15 человек с дегенеративно-дистрофическими заболеваниями тазобедренного сустава, эти пациенты были обследованы перед выполнением эндопротезирования тазобедренного сустава эндопротезами фирмы Zimmer, находясь на лечении в одном из отделений ФГУ «РНИИТО им. Р. Р. Вредена». Возраст обследуемых составил от 30 до 62 лет, существенного различия по возрасту и полу между группами не наблюдалось. Для исследований использован трехкомпонентный акселерограф производства компаний «Телеком-Диагностика», Санкт-Петербург. Акселерограф состоит из датчиков (до 6), соединенных с концентратором, передающим данные в виде радиосигнала в режиме реального времени. Вторая часть устройства включает в себя приемопередатчик, соединенный с персональным компьютером. Датчики акселерометра позволяют измерять ускорения в трехмерной системе координат. Частота отчета показаний составляет до 100 Гц. Для оценки ускорений, действующих в области таза и тазобедренных суставов, два датчика-акселерометра крепили к наружным поверхностям тела над большим вертелом справа и слева. Измеряли ускорения по трем осям, направленным следующим образом относительно тела обследуемого пациента: ось *X* сзади вперед (в сагитальной плоскости), ось *Y* направлена снизу вверх (во фронтальной плоскости), ось *Z* направлена снаружи внутри (в горизонтальной плоскости). Для оценки использовали показатели максимальных и минимальных ускорений, а также максимальной амплитуды колебания ускорений. При статистической обработке вычислялись средние, максимальные, минимальные значения и стандартное отклонение.

Все результаты проведенного исследования сведены в три таблицы, каждая из которых отражает ускорение в области тазобедренного сустава по одной из осей. В таблице определены следующие показатели: P1 – отражает существенность различий аналогичных параметров внутри группы больных для левой и правой сторон; P2 – отражает существенность различий аналогичных параметров между группами для одной стороны.

В группе больных наблюдаются следующие изменения относительно показателей контрольной группы (табл. 1): максимальное ускорение в правом тазобедренном суставе существенно не отличается, а в левом – существенно меньше; минимальное ускорение в правом тазобедренном суставе существенно снижено, а в левом – существенно не отличается; максимальная амплитуда изменения ускорений в правом и левом тазобедренных суставах существенно меньше аналогичных показателей контрольной группы.

Таблица 1

Группа	Ускорения в области левого тазобедренного сустава (G)			Ускорения в области правого тазобедренного сустава (G)		
	максимальное ускорение	минимальное ускорение	максимальная амплитуда	максимальное ускорение	минимальное ускорение	максимальная амплитуда
Контрольная	0,4643	-0,6384	1,6409	0,8294	-0,4880	1,6685
Основная	-0,0314	-0,7827	0,9630	0,8078	0,0583	0,9489
P1	< 0,01	< 0,01	> 0,05	< 0,01	< 0,01	< 0,01
P2	< 0,01	> 0,05	< 0,01	> 0,05	< 0,01	< 0,01

В группе больных наблюдаются следующие изменения относительно показателей контрольной группы (табл. 2): максимальное ускорение в правом и левом тазобедренных суставах существенно не отличается; минимальное ускорение в правом и левом тазобедренных

ренных суставах существенно снижено; максимальная амплитуда изменения ускорений в правом и левом тазобедренных суставах существенно меньше аналогичных показателей контрольной группы.

При анализе ускорений по оси Z в группе больных при статистической обработке не выявлено существенного различия относительно показателей контрольной группы (табл. 3).

Таблица 2

Группа	Ускорения в области левого тазобедренного сустава (G)			Ускорения в области правого тазобедренного сустава (G)		
	максимальное ускорение	минимальное ускорение	максимальная амплитуда	максимальное ускорение	минимальное ускорение	максимальная амплитуда
Контрольная	-0,4656	-2,0404	1,9827	-0,4101	-2,1969	2,1059
Основная	-0,6467	-1,4814	1,1425	-0,5754	-1,4621	1,1390
P1	< 0,01	> 0,05	> 0,05	< 0,01	> 0,05	> 0,05
P2	> 0,05	< 0,01	< 0,01	< 0,05	< 0,05	< 0,01

Таблица 3

Группа	Ускорения в области левого тазобедренного сустава (G)			Ускорения в области правого тазобедренного сустава (G)		
	максимальное ускорение	минимальное ускорение	максимальная амплитуда	максимальное ускорение	минимальное ускорение	максимальная амплитуда
Контрольная	0,1914	-0,5452	0,8748	0,1536	-0,6056	1,0170
Основная	0,2050	-0,3123	0,7151	0,1058	-0,4217	0,7161
P1	> 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05
P2	> 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05

Полученные данные служат исходным материалом для расчета активной нагрузки на кость пациента, используемой в математическом обеспечении подсистемы биомеханической САПР. Программная реализация элементов теории адаптации костной ткани [7], [8] в виде подсистемы математического моделирования эндопротезов [9], дает ключ к учету стресса и напряжения в кости при моделировании кортикальной ткани. Благодаря этому открывается возможность моделирования адаптивного механизма реконструкции кости при переходе от одной конфигурации нагрузки к другой и построения оптимальной конфигурации костной ткани в новых изменившихся условиях. Учитывая, что кортикальная ткань имеет естественное равновесное напряженное состояние, изменение нагрузки оказывает стимулирующее воздействие на костную ткань, обеспечивая адаптацию ее массы к равновесному состоянию. Интенсивность данного процесса зависит от разности величин равновесного и текущего напряженного состояния. Таким образом, коррекция трабекулярной структуры в костной ткани протекает в соответствии с ориентацией вектора нагрузки, а ее результатом является изменение плотности ткани  $\rho$  в соответствии с «эффективной нагрузкой»  $\sigma_{ef}$  через соотношение

$$\rho = A\sigma_{ef}^{\alpha},$$

где A и  $\alpha$  – константы. Это позволяет решить практическую задачу предсказания оптимального распределения плотности в проксимальной части бедренной кости по введенному ранее критерию на основе конечно-элементной модели кости.

Проведенные исследования позволили получить новые данные о важных биомеханических параметрах – ускорениях, действующих в области тазобедренных суставов у людей без патологии опорно-двигательной системы и больных с дегенеративно-дистрофическими заболеваниями тазобедренного сустава. Изучение ускорений, действующих в области тазо-

бедренного сустава у пациентов перед операцией эндопротезирования тазобедренного сустава, демонстрирует ограничение их двигательной функции по всем основным изучаемым параметрам. Полученные в ходе исследования данные были использованы при создании математического обеспечения биомеханической САПР для эндопротезирования тазобедренного сустава «BoneImplant». Указанная САПР позволяет строить биомеханическую систему кость–эндопротез на основе томограммы, физиологических параметров пациента (в том числе и активной нагрузки) и модели эндопротеза, и на заключительном этапе проводить сравнение биомеханических систем кость–эндопротез с целью подбора оптимального эндопротеза для пациента.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безгодков Ю. А. Оптимизация эндопротезирования тазобедренного сустава на основании медико-технической оценки различных видов эндопротезов: Автореф. дис. ... д-ра мед. наук. Санкт-Петербургская государственная педиатрическая медицинская академия. СПб., 1999. 32 с.
2. Москалев В. П., Корнилов Н. В., Шапиров К. И. Медицинские и социальные проблемы эндопротезирования суставов конечностей. СПб.: Морсар, 2001. 157 с.
3. Тихилов Р. М., Воронцова Т. Н., Лучанинов С. С. Организационно-методическая работа по созданию и развитию травматологической службы Санкт-Петербурга. СПб.: Изд-во РНИИТО им. Р. Р. Вредена, 2009. 372 с.
4. Руководство по эндопротезированию тазобедренного сустава / под ред. Р. М. Тихилова, В. М. Шаповалова. СПб.: РНИИТО им. Р. Р. Вредена, 2008. 324 с.
5. Безгодков Ю. А. Оценка статики и походки у больных с патологией крупных суставов нижних конечностей // Материалы X Юбилейного Рос. нац. конгр. «Человек и его здоровье». СПб. 2005. С. 11.
6. Анишкина Н. М., Антонец В. А., Ефимов А. П. Исследование опорно-двигательного аппарата человека по вибрациям, сопровождающим локомоторные акты // Медицинская биомеханика. В 4 т. Рига. 1986. Т. 3 С. 20–25.
7. Adaptive bone-remodeling theory applied to prosthetic-design analysis / R. Huiskes, H. Weinans, H. J. Grootenboer, et al. // J. Biomech., 1987. Vol. 20, №. 11/12. P. 1135–1150.
8. Kuiper J. H, Huiskes R. Mathematical optimization of elastic properties: application to cementless hip stem design // J. Biomech., 1997. Vol. 119. May. P. 166–174.
9. Автоматизированная биотехническая система индивидуального остеосинтеза / П. А. Алешкевич, Г. Д. Дмитриевич, О. П. Кормилицын и др. // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2005. Вып. 2. С. 36–40.

*Y. A. Bezgodkov, K. Audi, G. D. Dmitrevich, O. P. Kormilitsyn, M. M. Markov*

#### *STUDY AND SIMULATION OF BIOMECHANICAL PROCESSES IN THE HIP JOINT*

*Aim of our review is the analysis of accelerations of normal gait and gait of patients with hip joint degenerative disorders. The data obtained are used in biomedical software subsystems for replacement.*

**Biomechanics, acceleration, hip replacement prosthesis modeling, biomechanical CAD**



# **СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ**

УДК 004.5, 378.004, 378.147

*С. Ф. Давидюк, Е. П. Давидюк, Е. С. Кутузова*

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В КОНТЕКСТЕ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ДИСТАНЦИОННОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

*Изложена методика модуля системы информационной поддержки самостоятельной работы студентов, обобщен опыт ее внедрения в практику дистанционного обучения, рассматриваются методические проблемы организации и контроля качества выпускных квалификационных работ.*

**Дистанционное обучение, система информационной поддержки самостоятельной работы студента, методические инструменты тестовой проверки знаний, идентификация и аутентификация в дистанционном обучении, обобщение опыта контроля качества образования**

Дистанционные технологии обучения, активно практикуемые различными компаниями для прохождения электронных учебных курсов и тренингов, способствовали появлению в последние годы разнообразных программных продуктов.

Целевая направленность большинства подобных учебных материалов – быстро и в доступной форме донести ту или иную информацию до лица (группы лиц), испытывающего потребность в повышении своих знаний, или распространить информацию, с которой фирма считает нужным ознакомить своих сотрудников (тем более что это и экономически выгодный способ информирования).

В настоящее время широкое признание среди российских специалистов и преподавателей вузов получила система дистанционного обучения Moodle, разработанная группой специалистов под руководством М. Доугеймаса, предоставляющая пользователям возможность управлять содержанием сайта на бесплатной основе. Система Moodle базируется на основополагающих принципах, сформулированных рядом известных ученых, среди которых Дж. Дьюи, Ж. Пиаже, Э. фон Глазерфельд и Л. С. Выготский.

Поскольку в последние годы дистанционные технологии обучения интенсивно внедряются в систему подготовки и повышения квалификации персонала российских фирм и высших учебных заведений, то нельзя обойти вниманием результативность использования данной формы передачи и усвоения знаний.

Как показывает практика, помимо совершенствования программного продукта в направлении унификации программных платформ на данном рынке проводится работа по наполнению дистанционного образования библиотеками готовых учебных курсов и видеоматериалов, которые могут быть использованы для образовательных целей, т. е. работа по созданию собственно контента. Потребителям предлагаются готовые библиотеки курсов и тренингов, среди которых обучающие курсы по самым разнообразным направлениям – от электронных курсов, соответствующих программам уровня MBA (программы по самоменеджменту, управлению проектами, лидерству и работе в командах и т. д.), до обучения потребителей определенным ремеслам, включая вязанье. В результате пользователям предлагаются либо учебные видеолекции и электронные учебники, либо специализированные учебные видеофильмы и мультимедийные интерактивные курсы.

В настоящее время СПбГУП, располагая значительным контингентом иногородних студентов заочной формы обучения, приступил к внедрению системы поддержки самостоятельной работы студентов и дистанционного сопровождения подготовки выпускных квалификационных работ.

В этом направлении подготовлены и сформированы в виде модулей и блоков стандартные курсы, например, «Выпускная квалификационная работа», по каждой специальности университета. Информационно-новостной модуль позволяет студентам общаться с научными руководителями дипломных работ в форме веб-конференций; методический модуль содержит большой объем полезных методических материалов и актуальных рекомендаций; модуль шаблонов имеет образцы документов, обязательных для защиты. В структуре курсов есть блок календарных событий от начала работы над дипломом до ее завершения и блок наступающих событий, заблаговременно предупреждающий о текущих изменениях.

Методическая сторона данного направления деятельности наиболее наглядно представлена в системе поддержки самостоятельной работы студентов, внедренной в университете. Система спроектирована с учетом достижений современной педагогики с акцентом на взаимодействие между студентом и преподавателем и может использоваться как для удаленного, так и для очного обучения. Важнейшим преимуществом данной системы является возможность многовариантного представления информации, структурирования контента, интерактивности обучения, многократного повторения изучаемого материала, создания постоянно обновляемой справочной системы и организации самоконтроля учебных действий.

Для планирования деятельности по изучению дисциплины предусмотрен механизм представления всего материала в виде модулей, количество и содержание которых сильно варьируется в зависимости от дисциплины (курса). Модуль в общем случае содержит некоторое количество элементов, объединенных одной темой. Центральная часть основной страницы модуля содержит ссылки на контент курса, здесь располагаются ссылки на разнообразные ресурсы курса, тесты, форумы, опросы и т. д.

Учебный материал, как правило, сопровождается заданиями, упражнениями и вопросами, дающими возможность «разбавлять» монотонное изложение теории активными действиями и, в частности, задавать вопросы на понимание, что помогает закреплению излагаемого материала. Хорошо спланированные задания и упражнения направлены на актуализацию информации, получаемой студентами, и служат средством учета разнообразных методов освоения материала. В частности, система позволяет студентам получить информацию о результатах своих действий (в виде обратной связи), понять, насколько ус-

пешно они работают и что им следует сделать по-другому. Тем самым все элементы системы акцентируют внимание обучаемых на отдельных, важных фрагментах излагаемого содержания курсов, позволяют закрепить полученные знания, информируют о трудностях в освоении учебного материала и контролируют его усваиваемость.

Для планирования самостоятельной работы студента используется Формат-календарь и Формат-структура. Первый организует расписание курса (неделя за неделей) с точной фиксацией сроков начала и окончания. Вторая внешне напоминает Формат-календарь, но не имеет временных ограничений, не привязана к календарю и является тематическим содержательным форматом курса, в котором все материалы и задания собраны по разделам и темам.

Структура тематического модуля типового обучающего курса состоит из краткого описания темы с указанием даты начала и окончания ознакомления, а также сроков сдачи тестов и контрольных заданий. Помимо этого здесь присутствуют как собственно конспекты лекций и тесты самоконтроля, так и тематические тесты, тренинги, контрольные работы и другие виды ресурсов и практических заданий.

Запланированные мероприятия отражаются в блоке «Календарь», содержащем сетку текущего месяца с отмеченными на ней наиболее важными для студентов событиями. Полезную информацию студент может получить из содержания блока «Последние действия», где фиксируются новые сообщения форумов, список работающих на данный момент чатов и их участников, изменения в элементах курса, и блока «Наступающие события», демонстрирующего студенту все актуальные события на ближайший промежуток времени (обычно за три недели). Все эти элементы позволяют запланировать учебные мероприятия и на семестр, и на год.

Для организации самостоятельной работы в системе используется набор модулей, среди которых Задание, Семинар, Урок, Рабочая тетрадь, Чат, Опрос, Форум, Глоссарий, Тест, Анкета, составляющих основу для практических заданий и общения с консультирующим преподавателем. Указанные элементы имеют четкие временные границы, а Задание, Семинар, Урок, Рабочая тетрадь, Тест – и систему оценки. Последние могут как по отдельности, так и в совокупности аттестовать самостоятельную работу студента. Часть элементов (Урок, Тест) носит тренировочно-обучающий характер, поскольку позволяет внимательно изучать содержание уроков и проходить тесты многократно и в удобном режиме.

Широкий спектр возможностей для получения и закрепления знаний в рамках системы сопровождения самостоятельной работы студента дают тестовые материалы, особенно с учетом последних рекомендаций Министерства образования и науки по методическому обеспечению учебных курсов. В университете в зависимости от курса при организации дистанционной тестовой проверки знаний студентов используются разнообразные методические инструменты. Наиболее важные из них:

- настраиваемое количество попыток прохождения тестов и временных задержек между попытками;
- выбор метода оценивания (высшая/низшая оценка, первая/последняя попытка) в случае нескольких попыток;
- перемешивание вопросов в тесте и вариантов ответа на них;
- использование обучающего режима (возможность многократного ответа на вопросы в рамках одной попытки, начисление штрафных баллов за неправильные ответы);

- настраиваемый режим просмотра результатов и комментариев к тесту (итоговый результат по всем ответам и общий комментарий ко всему тесту; комментарии в зависимости от полученной оценки; комментарии до/после попытки и до/после закрытия теста; комментарии для каждого вопроса и варианта ответа);

- конструирование самого теста на основе случайного выбора вопроса из категорий.

В дальнейшем при построении учебных курсов дистанционного обучения планируется насытить их небольшими обучающими тестами специального типа (тест самоконтроля, самоотренинг), основная ценность которых в самоанализе и исправлении ошибок. Для этого студенту дается возможность неоднократного прохождения теста, и в зависимости от того, насколько необходимо ему помочь в поиске ошибки, настраивается режим просмотра результатов. Чем больше информации по данному вопросу (разделу) получает студент, тем легче ему разобраться, в чем именно он ошибался, поэтому в рамках данных тестов предусматриваются дополнительные комментарии, которые будут выводиться на экран, если студент выберет именно этот вариант ответа.

Контроль – важная составляющая системы поддержки самостоятельной работы студента, обучающегося дистанционно. Разработанная и проходящая опытную проверку на практике система поддержки самостоятельной работы студента позволяет контролировать ход выполнения самостоятельной работы, поскольку после регистрации создается и хранится портфолио каждого обучающегося. Данный контроль включает в себя: контроль «посещаемости», активности студента, своевременности выполнения каждого этапа, теста, задания (комментарии хранятся в сводной ведомости); контроль ознакомления со всеми прочитанными методическими рекомендациями и документами, необходимыми для качественного выполнения работы; контроль отправленных на проверку работ.

Кроме того, система позволяет в целом формировать разнообразные отчеты о деятельности по каждому студенту, по группе и по курсу в целом, что упрощает процедуру оперативного контроля. Удобно и то, что сообщения, написанные студентом, и ответы преподавателя на них сохраняются.

Первые результаты внедрения дистанционного сопровождения выпускной квалификационной работы по специальностям показали, что для студентов университета, имеющих хорошую подготовку и навык работы с компьютерными технологиями, подобная форма общения с научными руководителями и эффективна, и результативна.

Данная система позволяет студентам оперативно взаимодействовать с преподавателем и видеть историю всех изменений в каждом разделе дипломной работы; очень важно, что она позволяет корреспондентам обмениваться файлами любых размеров и форматов. Она оперативно информирует всех студентов курса и/или отдельных лиц о текущих и предстоящих событиях, дает возможность организовывать обсуждение проблем на форуме (в том числе в режиме реального времени), позволяет устанавливать коммуникационные индивидуальные связи с каждым из студентов по поводу обсуждения индивидуальных учебных проблем и рецензирования, способствует осуществлению контроля за ходом выполнения дипломной работы (через отчет о действиях дипломанта, который демонстрирует его активность и своевременность выполнения всех этапов работы). Дополнительным удобством для преподавателей является то, что система позволяет формировать разнообразные отчеты о ходе работ над дипломом не только по каждому студенту, но и по группе (по курсу), что упрощает процедуру текущего контроля за ходом выполнения дипломных работ.

Таким образом, практика подтверждает несомненно положительное влияние современной информационно-образовательной среды на качество образования студентов очной и заочной формы обучения. Первым она дает возможность спланировать, организовать самостоятельную внеаудиторную работу и приобрести навыки самоконтроля. Вторым помимо этого, с одной стороны, она предоставляет реальный доступ к актуальным учебным материалам и методической документации, с другой – позволяет использовать прогрессивные и эффективные технические средства связи для организации оперативного и визуального общения студента с преподавателем-консультантом, без чего не может быть полноценного образовательного процесса.

В то же время нельзя закрывать глаза на неоднозначность оценки знаний, получаемых конкретным студентом, обучающимся дистанционно. Фирмам-разработчикам, активно внедряющим данные технологии обучения, следует сознавать – подобная форма восприятия учебной информации эффективна для лиц, способных к самоорганизации и самодисциплине. Даже традиционные технологии очного обучения, использующие преимущественно групповые формы и методы аудиторной лекционной и практической (семинарской, лабораторной) работы и практикующие индивидуальные способы промежуточного или итогового контроля знаний, усвоенных студентами в процессе обучения, зачастую не дают положительных результатов, что подтверждает имеющийся разброс оценок на экзаменах и зачетах. Тем более сомнительны и неоднозначны знания, полученные в форме дистанционного обучения.

Программ, позволяющих оценивать уровень усвоения учебного материала или предусматривающих диалог с преподавателем в режиме реального времени, до сих пор недостаточно. Но и их наличие не решает всех проблем контроля качества, поскольку при такой форме виртуального диалога преподаватель полностью не уверен, что он проверяет знания именно того лица, которого следует.

Реализуемая на базе программно-аппаратных средств идентификация обучающихся обычно производится через применение индивидуальных шифров или паролей доступа к системе. Это действительно является надежным барьером для внешнего стороннего проникновения, но не исключает передачи пароля другим лицам для выполнения учебных заданий.

Недаром в периодической печати откровенно обсуждается неэффективность организации дистанционного участия в олимпиадах для старшеклассников, победа в которых дает право на внеконкурсное поступление в вузы, именно из-за возможности фальсификации (могут участвовать репетиторы, а не школьники), т. е. проблема проверки подлинности личности при шифровом доступе остается нерешенной.

Опыт показывает, что при внедрении дистанционной системы образования не производится и оперативная периодическая аутентификация, целью которой является подтверждение подлинности самого обучающегося. Визуальное наблюдение в режиме реального времени частично решает эту проблему, но оно применяется далеко не всегда и лишь в ходе организации диалогов «вопрос-ответ» и консультирования. Типичные методы и способы аутентификации личности, применяемые для защиты от несанкционированного доступа к информации и базам данных, для образовательной системы, во-первых, неприемлемы из-за высокой стоимости необходимого оборудования, во-вторых, не позволяют решить саму проблему по существу.



Отсюда вывод: чтобы сохранить качественный уровень образования, дистанционное обучение пока должно использоваться совместно с традиционными формами получения и контроля знаний. При его широком внедрении в учебный процесс следует (как минимум) пересмотреть содержание выпускных квалификационных экзаменов таким образом, чтобы они охватывали не только дисциплины специализации, но и учебные курсы, относящиеся к базовым, т. е. выдавать дипломы о высшем образовании лицам, обучавшимся дистанционно, при той форме итогового контроля, которую в настоящее время практикуют все вузы по завершении обучения, ни в коем случае нельзя – это приведет к дискредитации системы профессиональной подготовки кадров высокой квалификации.

Надо отметить, что рыночные условия функционирования вузов (платная форма обучения) уже и так негативно сказались на качественном профессионально-квалификационном уровне подготовки кадров. Большинство высших учебных заведений принимают практически всех, кто способен оплатить свое образование, и излишне лояльно относятся к ним при проверке знаний в период обучения, поскольку и здесь не может не срабатывать приоритетность коммерческих результатов перед образовательными. Насущная необходимость выживать в рыночных условиях заставляет вузы своеобразным способом заботиться о платном контингенте обучающихся. В этих реалиях бездумное, широкое внедрение дистанционной формы обучения – официальная и в чем-то удобная форма «закрывать глаза» на результат. Это еще один аргумент в пользу вдумчивого и взвешенного отношения к внедрению дистанционной формы образования в высших учебных заведениях. То, что несомненно полезно для фирм, практикующих в большинстве своем ознакомительные лекции и тренинги для повышения квалификации своих сотрудников, явно непригодно для образовательных заведений, которые призваны дать определенный, вполне конкретный объем знаний и практических навыков по широкому спектру учебных дисциплин, проверить уровень их усвоения и выдать подтверждающий сертификат лицам, не имеющим базовых и специальных знаний и профессионального опыта.

Фирмам, активно разрабатывающим и продвигающим программные продукты для дистанционного обучения в вузах, следует совершенствовать контрольные процедуры как процесса обучения, так и анализа результатов письменных работ. Использование системы «Антиплагиат» – только первый шаг в данном направлении. Информационная база, которую она использует, по мнению пользователей, остается узкой и требует активного обновления. Практика использования современных компьютерных технологий в сфере дистанционного обучения показывает, что узким местом контроля знаний является не столько технические средства и программное обеспечение, сколько отсутствие хорошо разработанной методической и содержательной базы.

*S. Ph. Davidyuk, E. P. Davidyuk, E. S. Kutuzova*

#### *THE INFORMATION PROVIDING AND CONTROLLING OF A QUALITY OF STUDENTS KNOWLEDGE IN THE E-LEARNING*

*The paper contents a primary residium of putting into teaching practice the methods of e-learning in The SPb humanity university of trade unions. The basic mains included a description of learning moduls of informational providing and controlling of students knowledge in during self-paced study and preparating of final qualification works, methodical problems of organization and quality of educational process.*

**Distention learning, system of informational providing of self-paced study, methodical instruments of testing of knowledge, identification and authentication in during teaching, results of controlling of quality of learning process**



# **УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ, ИННОВАЦИОННЫЙ И АНТИКРИЗИСНЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ**

УДК 330.111.4:001.101

*А. Э. Сулейманкадиева*

## **ВЗАИМОСВЯЗЬ СИСТЕМЫ НЕПРЕРЫВНОГО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУЧНОЙ СИСТЕМЫ И СИСТЕМЫ РЕАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКИ В УСЛОВИЯХ ЭКОНОМИКИ ЗНАНИЙ**

*Исследуется взаимосвязь научной системы, непрерывного образования и реальной экономики в триаде «СНН – СНО – СРЭ» в условиях экономики знаний.*

**Система непрерывного образования, система непрерывной науки, система реальной экономики, фундаментальные и прикладные знания**

Исследуя роль и место знаний в системе непрерывного образования (СНО), следует отметить, что существует точка зрения [1, с. 74], согласно которой знания рассматриваются как источник и инструмент, применяемые для расширения границ инноваций, которые являются движущей силой экономического роста, конкурентоспособности, в целом развития новой экономики, базирующейся на непрерывных знаниях. Ключевым аспектом такого развития является непрерывное образование (НО). По мнению автора настоящей статьи, знания выступают не только как источник и (или) инструмент, необходимые для преобразований в СНО, они являются еще и результатом процесса непрерывного образования: знания, участвуя в процессе преобразования НО, сами изменяются, обобщаются, пополняются, а следовательно, совершенствуются, точнее, трансформируются в другие, уже новые знания, умения и навыки. Этот процесс трансформации знаний является постоянным. Как отмечает В. В. Агеев [2], знания являются производными процесса непрерывного образования, т. е. его постоянно изменяющихся способностей. С другой стороны, анализируя данный тезис, можно отметить, что непрерывность образования является также результатом скорости наращивания знаний, точнее, кумулятивного характера процесса их пополнения. То, что создано предыдущими поколениями, мы изучаем, сохраняем и, опираясь на них, идем вперед.

С другой стороны, в научной теории существует точка зрения, согласно которой «наука [непрерывная наука. – Прим. авт.] должна рассматриваться как вторая производная от общего продукта» [3, с. 79]. Продукция, создаваемая в реальной экономике, может служить исходной

мерой в процессе финансирования научной сферы. Так, согласно Д. Берналу, расширение или улучшение производства на основе использования обычных технических методов является первой производной, которая и представляет скорость измерения процессов производства. Вторая производная есть скорость изменения первой. А это есть то, что производит научная сфера [3]. С позиции данного подхода систему непрерывной науки (СНН) можно показать как первую производную от СНО и вторую – от системы реальной экономики (СРЭ), т. е.  $СНН = СНО' = СРЭ''$ . В этой связи науковедом Б. Г. Кузнецовым была высказана идея о том, что «оптимальная структура производства должна в качестве своей характеристики иметь превышающуюся производительность общественного труда ( $P$ ), первая производная от  $P$  должна быть в случае прогресса положительной:  $\delta P / \delta t > 0$ . Экономика должна обеспечить неуклонный рост этой скорости  $\delta P^2 / \delta t^2 > 0$ . Эта вторая производная обеспечивается совокупным эффектом технического прогресса и прикладных исследований» [3, с. 79].

Отсюда, можно заметить, что общая тенденция экономического роста зависит как от научного знания, так и от той системы образования, где происходит процесс непрерывной трансляции этого знания в область реального его воплощения, т. е. создания передовых технологий, инноваций. Это закономерное явление, требующее непрерывного прогресса, а следовательно, и структура реальной экономики должна быть такой, которая бы обеспечивала максимальное значение производительности общественного труда ( $P$ ).

Но если рассматривать СНО как промежуточный элемент в триаде «система непрерывной науки (СНН) – система непрерывного образования (СНО) – система реальной экономики (СРЭ)», то эффективность СНО не может быть определена только с позиции вышерассмотренной теории, так как данный подход позволяет взглянуть на эту систему взаимосвязанных элементов только с одной стороны, т. е. в одном направлении от науки к реальной экономике. Предполагается, что создаваемые в СРЭ товары, продукты и услуги генерируют новые научные знания. Но в реальной жизни общества может быть и наоборот, т. е. новые знания могут ускорять процесс их передачи в сферу реальной экономики, где и создаются абсолютно новые товары и услуги. Тогда эффективность СНО можно определить как разность между приростами «знаний» в науке и реальной экономике. Точнее, прирост знаний в СНО: а) зависит от прироста знаний в научной системе; б) определяет новизну создаваемых продуктов, услуг, нематериальных объектов в системе реальной экономики. Так, если прирост новых знаний в научной системе представить как  $\Delta Z_{СНН}$ , а прирост знаний в СНО –  $\Delta Z_{СНО}$ , то в реальной экономике (в качестве которых выступают новые виды продуктов, технологий, услуг, которые потребляет и которыми пользуется общество) их можно показать как  $\Delta Z_{СРЭ}$ . Тогда знания, создаваемые в научной сфере, и будут представлять как первую производную от знаний в СНО и вторую производную от знаний в реальной экономике. Следовательно, целесообразно показать следующее неравенство:  $\Delta Z_{СНН} \approx \Delta Z'_{СНО} \approx \Delta Z''_{СРЭ}$ . В научной сфере знания рождаются, в СНО они трансформируются и транслируются (передаются обучающимся) а в реальной экономике (в практической сфере) они используются. Эффективность СНО будет наибольшей ( $\Delta \rightarrow \max$ ), если скорости создания знаний в СНО и СРЭ максимально приблизятся к скорости создания знаний в СНН, точнее темпы роста (или прироста знаний в единицу времени) во всех трех системах триады будут максимально близки друг другу ( $\Delta_{СНН} - \Delta_{СНО} \rightarrow \min; \Delta_{СНО} - \Delta_{СРЭ} \rightarrow \min$ ).

Научное знание нельзя остановить или повернуть вспять, оно непрерывно движется вперед с возрастающей скоростью. Попытка дать математическое описание закона уско-ряющегося развития научного знания была предпринята учеными Г. Влэдучом, В. Нали-мовым, Н. Стяжкиным и М. Карповым, исходившими из дифференциального уравнения

$$ds / dt = kS,$$

где  $ds/dt$  – «скорость» развития науки;  $k$  – коэффициент пропорциональности, присущий определенной науке и конкретным условиям ее развития;  $S$  — научные результаты (от-крытия, создание новых научных идей и проектов). Интегрирование этого уравнения при-вело к математическому выражению, так называемому закону движения науки, который может быть представлен в виде экспоненциальной функции [3]

$$S = S_0 \ln^{kt},$$

где  $S_0$  – сумма результатов науки к моменту отсчета;  $\ln$  – натуральный логарифм. Так, при периоде удвоения, равном 15 годам, коэффициент  $k$  принимает значение 0.05, а последнее уравнение, соответственно, приобретает вид

$$S = S_0 \ln^{0.05t}.$$

Отсюда можно предположить, что темпы роста научных знаний всегда будут боль-ше, чем темпы роста знаний в СНО и еще больше, чем в СРЭ. И чем больше это расхож-дение, тем сложнее определить с сегодняшних позиций будущий экономический эффект и эффективность непрерывно растущих (по экспоненте) научных знаний, но, с другой сто-роны, такой эффект будет более глубоким и значительным в достаточных масштабах вре-мени. Задача заключается в том, чтобы приблизить скорость изменений в трех системах друг к другу ( $v_1 = v_2 = v_3$ ), т. е. важно приблизить темпы прироста знаний в СНО и СРЭ к темпам прироста научных знаний. Развивая этот тезис, следует отметить, что сами темпы роста уровня научной системы, образовательной системы и системы реальной экономики должны развиваться по экспоненциальному закону распределения. Хотя, с другой сторо-ны, в условиях интенсивных изменений сложно добиться и поддерживать развитие трех систем строго по экспоненте. Тем не менее, их развитие должно регулироваться.

В условиях глобализации и усиления конкуренции появляется необходимость созда-ния концепции «создания, трансформации и передачи непрерывных знаний» в сфере ре-альной экономики. Эта концепция предполагает процесс постоянной адаптации, периоди-ческого повышения квалификации и переподготовки персонала в течение всей активной трудовой жизни как в рамках формальной, так и в рамках неформальной системы образо-вания на основе качественной базовой, начальной подготовки. Принцип непрерывности получения знаний обеспечивается поэтапностью и преемственностью прохождения каж-дым сотрудником отдельных ступеней образования на основе последовательного усвое-ния знаний, умений и навыков. В данном контексте «производство, трансформация и пе-редача непрерывных знаний» понимается как процесс непрерывного обучения персонала на протяжении всей профессиональной деятельности. При этом концепция «непрерывных знаний» персонала любой организации: а) строится по восходящей линии таким образом, чтобы каждая последующая ступень являлась логическим продолжением предыдущих и представляла собой законченный цикл обучения; б) является необходимым для генериро-

вания интеллекта всей организации. Важным фактором является не только то, чему и как учится персонал, но и то, насколько эффективно он вносит свои знания в организацию, способствует развитию ее интеллектуального потенциала. Знания делают организацию интеллектуальной, т. е. такой, которая умеет учиться тому, как лучше обучаться.

Исследуя проблему знаний, необходимо уделить особое внимание выявлению знаний двух типов. Прежде всего, это организационные знания, представляющие собой некий набор принципов, фактов, навыков, правил, которые с информационной точки зрения обеспечивают процессы принятия решений, поведение и действия в организации. Но с другой стороны, организационное знание развивается на основе знаний личности, каждого работника в организации [4, с. 205]. Д. Стоунхаус [5, с. 14–26] полагает, что особенность организационного знания заключается в том, что оно, являясь активом организации, возрастает, как правило, по экспоненциальному закону, когда делится им. Он отмечает, что обмен знанием в организации, увеличивает его свойство добавлять стоимость к товару более чем пропорционально.

Производство, трансформация и передача непрерывных знаний персонала включает следующие компоненты их обучения: а) общее образование (развитие природных задатков и способностей, освоение накопленного обществом социального опыта, основных социокультурных правил и норм); б) профессиональная подготовка (освоение личностью профессиональных основ, взглядов и оценок в данной области, осознание присущих ей закономерностей), т. е. обучение, формирующее основы квалификации специалиста. Идея «непрерывных знаний» включает две составляющие: с одной стороны, процесс непрерывного обучения, а с другой – профессиональную подготовку персонала. Обучение связано с развитием общего интеллекта персонала, с приобретением общих знаний, а подготовка – с приобретением специальных знаний, навыков и умений по выполнению функций и работ.

Современное развитие СНН и ее взаимосвязей с СРЭ свидетельствует о наличии большого разнообразия взаимодействий, прежде всего, фундаментальных и прикладных исследований, а следовательно, научных и прикладных знаний. При этом их передача происходит посредством образовательной системы. Роль СНО в триаде «СНН – СНО – СРЭ» такова, что благодаря ее способности трансформировать научные знания в прикладные происходит их трансляция (в профессиональных средних и высших учебных заведениях, в институтах повышения квалификации и дополнительного образования, в НИИ и научных центрах, а также в научно-производственных и коммерческих и венчурных организациях и т. д.) промежуточным (например, преподавателям, которые передают полученные новые знания своим студентам и слушателям) и конечным потребителям знаний (которые используют полученные новые знания, умения и навыки на практике в процессе создания новых товаров и услуг). Кроме того, полагаем, что в социально-экономическом развитии любой страны двигателем НТП, а следовательно, экономического роста являются именно научные (фундаментальные) и прикладные знания. Поэтому, по мнению автора, целесообразно показать фрагмент взаимосвязи «СНН – СНО – СРЭ» на основе изучения и описания процесса трансформации и трансляции научных и прикладных знаний на примере.

С философской точки зрения можно отметить, что фундаментальные знания образуются в процессе движения познания от живого созерцания к абстрактному мышлению, а в процессе реального познания, т. е. его движения от абстрактного мышления к практике,

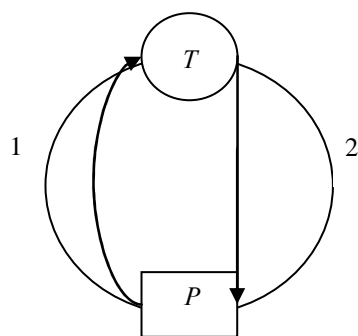


Рис. 1

к производству продукции в реальной производственно-экономической системе, – прикладными знаниями [6, с. 75]. Справедливо отметить, что исследованию фундаментальных знаний посвящено большое количество трудов ученых, но дальнейшая их судьба остается, как правило, вне поля зрения современных исследователей. Для полноты картины, по мнению автора статьи, целесообразно представить систему взаимосвязей между фундаментальными знаниями, которые возникают в СНН, и прикладными знаниями, которые передаются посредством СНО в СРЭ. Взаимодействие познания и практики можно представить с помощью символов  $T$  и  $P$  (рис. 1). Стрелками 1 и 2 показаны направления процессов, изображенных дугами. И это представление можно далее детализировать.

Согласно мнению авторов [6], следует выделять три сферы практики ( $P$ ): преобразование природы ( $P_n$ ); преобразование форм общественной жизни ( $P_s$ ) и преобразование человека ( $P_h$ ). Соответствующим образом можно детализировать и выделить три области познания:  $T_n$ ,  $T_s$ ,  $T_h$ . Каждую из сфер практики и познания можно представить как частный случай показанного на рисунке взаимодействия познания и практики. Но все эти сферы взаимосвязаны друг с другом (рис. 2) [6, с. 76].

Если выделить и рассмотреть ту часть модели, в которой представлены связи познания природы и ее преобразования в реальном производстве, в реальной экономике, то в ней можно изучить взаимодействия фундаментальных и прикладных исследований, а следовательно, фундаментальных и прикладных знаний. Тогда результат научного познания – фундаментальные знания – можно обозначить через  $K_F$ , а результат реального познания – прикладные знания – через  $K_P$ . Процесс установления взаимосвязей или процесс взаимодействия между этими областями (системами) происходит через систему обучения (т. е. СНО).

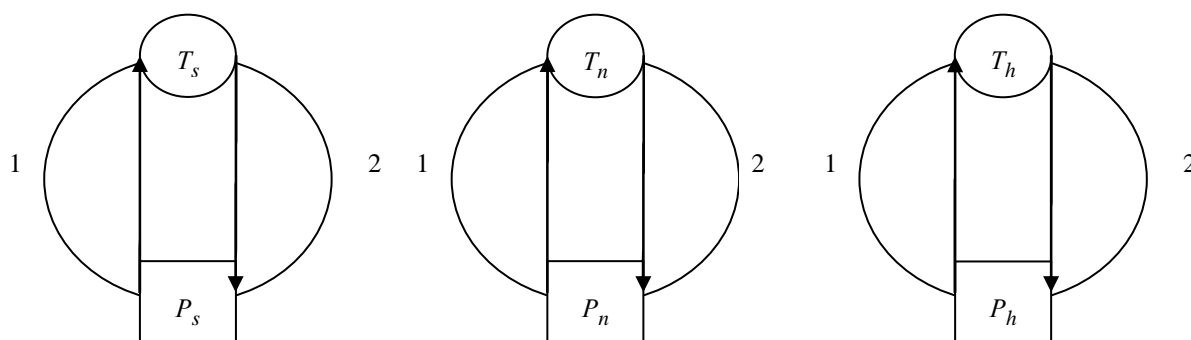


Рис. 2

В процессе непрерывного обучения непрерывно развиваются как фундаментальные, так и прикладные знания. Развитие практических знаний создает новые возможности и условия для восприятия окружающего мира. Это ведет к созданию нового более сложного фундаментального знания, что, в свою очередь, является условием для создания новых прикладных знаний. Новые прикладные знания требуют новых условий, отношений и новой более сложной организации практической деятельности, где происходит создание новых продуктов и услуг. Новая практическая деятельность, обучаясь непрерывно, ведет к

развитию соответствующих фундаментальных исследований и созданию новых фундаментальных знаний. Последние порождают новые прикладные исследования и знания, которые снова ведут к изменению практической сферы деятельности (рис. 3, а, б). Эти модели взаимодействия фундаментальных и прикладных исследований, фундаментальных и прикладных знаний (рис. 3) демонстрируют взаимосвязь соответствующих систем, где создаются фундаментальные и прикладные знания, и позволяют понять порядок их взаимосвязей. Так, если фундаментальные знания представляют собой знания, раскрывающие объективные законы природы и закономерности развития явлений, то прикладные знания – это знания, исследующие конкретные условия, которые заставляют эти законы и закономерности служить практическим целям. Фундаментальные исследования не преследуют цели получения конечного продукта, их конечным продуктом является получение фундаментального знания. А прикладные исследования не имеют целью утверждение законов и открытие закономерностей, они применяют те законы, которые уже известны, обобщают их с целью определения практической пользы [7, с. 9]. В процессе фундаментальных исследований могут появиться практические цели, но могут и не появиться. Практическое внедрение прикладного знания может привести к фундаментальным открытиям (знаниям) [3]. Несомненно, фундаментальные знания и часть прикладных знаний рождаются в СНН, в СНО осуществляется их передача, а в СРЭ прикладные знания перевоплощаются в инновационные товары и услуги. СНО играет роль связующего элемента в данной триаде, которая на основе новых технологий и методов передает только что родившиеся знания в научной системе в систему реальной экономики, точнее, в сферу практической деятельности. В данной модели особое внимание уделяется движению знания внутри первого звена триады «СНН – СНО – СРЭ» – научной системе. Следует отметить, что в этой модели СНО выполняет функции: а) трансформации и трансляции (передачи) фундаментальных знаний в прикладные; б) обучения и развития систем в процессе движения знаний по окружностям, в результате чего происходит изменение (в т. ч. обогащение и «очищение») знаний.

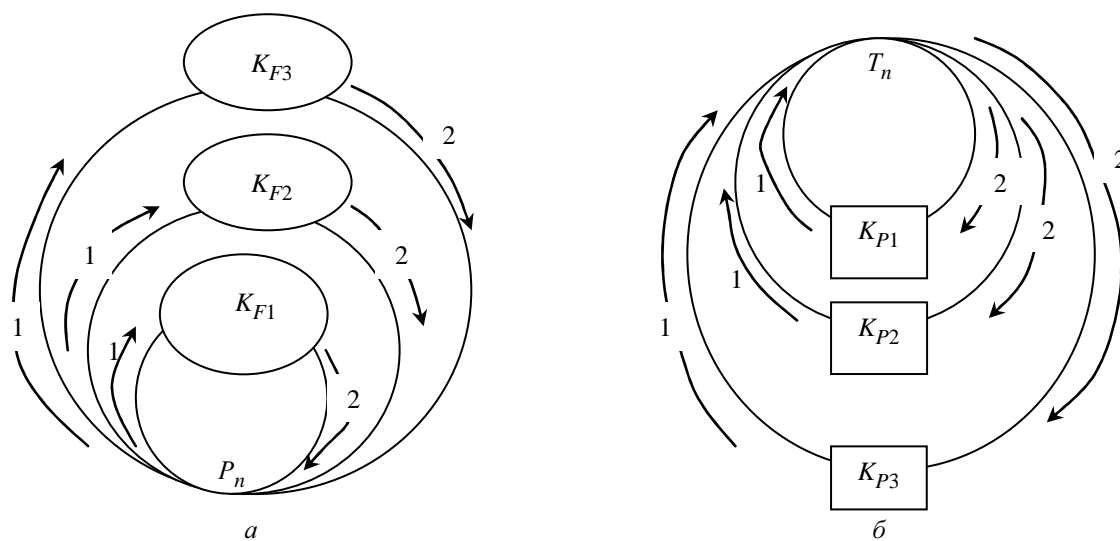


Рис. 3

При создании объем фундаментальных знаний всегда превышает объем знаний, используемых на практике. И в этом смысле результаты СНН не могут в полной мере регулироваться СРЭ. Знания, создаваемые в СНН, всегда будут превосходить по объему зна-

ния, транслируемые в СНО, и еще более (прикладные) знания, которые воплощаются в конечные товары и услуги. К сожалению, не все фундаментальные знания находят своего реальное воплощение.

Исходя из вышеизложенных описаний фундаментальных и прикладных знаний, можно определить их основные признаки. Так, основными признаками фундаментальных знаний являются: а) ориентация на открытие свойств, законов и выявление закономерностей развития явлений, не известных никому ранее. Эти свойства можно охарактеризовать как базисные для понимания природы в целом; б) целевая ориентация на пополнение запаса общих знаний об основных природных процессах. С другой стороны, основными признаками прикладных знаний являются: а) практическая ориентация; б) связь с процессом производства, техникой; в) социально-экономический характер решаемых задач.

Развивая продемонстрированные модели (рис. 3), следует обратить внимание на процесс формализации знания в организации<sup>1</sup>. Организация сама по себе создавать знание не может. Создание организационного знания основано на знаниях ее сотрудников. Те знания, которые трансформируются из фундаментальных в прикладные, СНО транслирует потребителям, в качестве которых могут выступать слушатели, студенты, сотрудники организаций, повышающих квалификацию и т. д. Таким образом, образуется неформализованное индивидуальное знание. Далее организация мобилизует это индивидуальное знание в организационное посредством четырех способов трансформации (социализации, экстернализации, интернализации и комбинации) [8, с. 320]; [9, с. 101]. Этот процесс образования организационного знания И. Нонака и Х. Такеучи называют спиралью знания. Они отмечают: «...организационное знание создается по спирали, начиная с индивидуального уровня, и при расширении взаимодействия проходит уровни секции, отдела, сектора и организации» [8, с. 320].

В работе [8] Г. В. Широкова приводит обоснование процесса создания знания в организации на примере разработки продукции. В создании концепции (идеи) нового продукта участвует сообщество взаимодействующих друг с другом сотрудников, обладающих различным объемом запаса знаний, навыков и интеллектуальных моделей. В то время как сотрудники отдела НИОКР особое внимание уделяют технологическому потенциалу, их коллеги из отделов производства и маркетинга проявляют интерес к другим параметрам. Так, для создания нового продукта появляется необходимость обмена знаниями, умениями и навыками, возникает потребность в социализации распространяемого неформализованного знания. Для объединения неформализованного и формализованного индивидуального знания необходимы как социализация, так и экстернализация. Таким образом, продукт, созданный совместным трудом, далее оценивается по признаку соответствия средне- и крупномасштабным концепциям. Далее для сохранения целостности концепции требуется предпринять новые действия на более высоком уровне, что приведет к новому витку создания знания.

---

<sup>1</sup> По мнению автора настоящей статьи, целесообразно показать подробно процесс создания и использования знания в СРЭ на примере организации, так как она представляет собой структурную единицу экономики. Из таких единиц формируется система реальной экономики. Более того, такой подход позволит изучить процесс трансформации знания с эпистемологической точки зрения, предложенной японскими учеными И. Нонака и Х. Такеучи.



Следует отметить, что в такой модели показаны этапы трансформации с позиции уровневого подхода, т. е. как промежуточные и конечные результаты трансформации знания на каждом уровне в направлении: от индивидуального к групповому и организационному уровню («вертикальный» подход). По мнению автора, было бы целесообразно рассмотреть это процесс еще и с позиции «горизонтального» подхода, т. е. с позиции перехода знания от имплицитного к эксплицитному состоянию и наоборот. Такое понимание позволяет проследить и лучше исследовать процесс видоизменения практического (прикладного) знания, т. е. процесс перевоплощения идеи в готовый продукт или новую услугу. Для того чтобы изучить этот процесс, необходимо выделить внутренний и внешний трансферт знаний. Внутренний трансферт осуществляется между сотрудниками, группами, отделами и филиалами внутри организации, а в случае многонациональной корпорации – через национальные границы. Он приобретает форму передачи знаний в рамках частных бесед, а также специальных трансфертных проектов в масштабе всей организации. А внешний трансферт выходит за пределы организации и связывает внешних партнеров (в качестве которых могут выступать университеты, лаборатории по научным исследованиям и разработкам, консультанты, а также различные конкурирующие и неконкурирующие фирмы и корпорации) в общую структуру. Внешний трансферт дает возможность коммерческой организации приобрести знания, которыми она не располагает или выработка которых требует больших затрат труда, времени и средств.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Спорер З. Экономика знаний и социальный капитал в странах Центральной и Восточной Европы // Экономика образования. 2007. № 4 (41). С. 72–78.
2. Агеев В. В. Теория непрерывного образования и стратегия инновационной деятельности / [Электронный ресурс] // 07.03.2009. – режим доступа: <http://www.ageyev.kz/articles/artrus/42.htm>.
3. Добров Г. М. Наука о науке. 3-е изд., перераб. и доп. / отв. ред. Н. В. Новиков. Киев: Наукова думка, 1989.
4. Гапоненко А. Л., Орлова Т. М. Управление знаниями. Как превратить знания в капитал. М.: Эксмо, 2008.
5. Стоунхаус Д. Управление организационным знанием // Менеджмент в России и за рубежом. 1999. № 1. С. 14–26.
6. Проблемы развития научно-образовательного потенциала. Новосибирск: Наука, 1987.
7. Фундаментальные и прикладные исследования в развитии науки: науч.-аналит. обзор. М.: Изд-во АН СССР; Ин-т научной информации по общественным наукам, 1990.
8. Широкова Г. В. Управление организационными изменениями: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Санкт-Петерб. ун-та, 2005.
9. Нонака И., Такеучи Х. Компания – создатель знания. Зарождение и развитие инноваций в японских фирмах. М.: ЗАО «Олимп-Бизнес», 2003.

*A. E. Suleymankadieva*

*RELATIONSHIP OF LIFELONG EDUCATION SYSTEM, RESEARCH SYSTEM  
AND OF REAL ECONOMIC SYSTEM IN CONDITIONS OF KNOWLEDGE ECONOMY*

*The relationship between Science, Lifelong Education and the Real Economy in the Triad  
«CSS – LLES – RES» in conditions of Knowledge Economy is considered.*

**Lifelong Education System, Continuous System of Science, the System of Real**



УДК 656.073.431.1+ 621.821.354

А. М. Склярова

### СОЦИАЛЬНО-ПСИХОЛОГИЧЕСКИЙ АСПЕКТ РОЛИ ДЕНЕГ В СОВРЕМЕННОМ ОБЩЕСТВЕ

*Рассмотрены эτικο-психологические аспекты роли денег в жизни субъекта (человека и общества). Анализируются вопросы о происхождении, сущности и функции денег; системы денежного обращения; концепции распределения доходов – эгалитаристская, утилитаристская, роулсианская, рыночная. Выделен гуманистический аспект роли денег в жизни общества.*

**Психология и деньги, функции денег, стоимость труда и рабочей силы, социальная справедливость, концепции распределения**

*Нельзя иметь все сразу, поэтому начнем с малого – с денег.  
Янус Васильковский*

*Я хочу жить как бедный человек с деньгами.  
Пабло Пикассо*

Проблема денег раскрывает целую философию не только общества как единого органичного целого, но и человека – его страстей, взлетов и падений, возвышенного и низменного, безобразного и прекрасного в нем. Вопрос роли денег в обществе столь полифоничен, что благодаря его осмыслению можно изучить как экономику общества, так и психологию личности, ее духовности (или бездуховности), ее созидательности либо разрушительности, а также всю палитру человеческого бытия – от рождения до смерти. Глубоко и проникновенно эта идея звучит в устах Гобсека, героя одноименного произведения О. де Бальзака: «Вот поживите с мое, узнаете, что из всех земных благ есть только одно, достаточно надежное, чтобы стоило человеку гнаться за ним. Это ... золото» [1].

Точка зрения, изложенная классиком, созвучна реальности современной России, где деньги заняли в иерархии ценностей фундаментальное и постоянное место. Какова же природа денег? К. Маркс в своем главном труде «Капитал» говорил, что по романам О. де Бальзака можно изучать политэкономию. Сам же он подробно изучил историю появления денег и дал беспристрастную оценку их роли в истории человеческого общества. К. Маркс связывает происхождение денег с процессом развития обмена. Исследовать происхождение

ние денег – это исследовать развитие торговли, обмена, возникновения того этапа человеческой цивилизации, который Ф. Хайек называл расширенным порядком человеческого сотрудничества [2].

Самой простой формой обмена является бартер. Бартер – это непосредственный обмен одного товара на другой. Например, землевладелец обменивает 300 кг зерна на одну корову, принадлежащую скотоводу. Однако бартерные сделки могут беспрепятственно осуществляться лишь при ограниченном наборе предлагаемых к обмену товаров. Количество участников обмена при бартере также ограничено. При вовлечении в торговлю большого круга хозяйственных субъектов бартер наталкивается на серьезные затруднения. Например, вы хотите обменять свою пшеницу на медный кувшин, но владельцу кувшина не требуется ваше зерно. Потребуется множество промежуточных торговых сделок, прежде чем вы сможете стать обладателем кувшина. Это затруднение казалось бы непреодолимым, если бы «в самой природе вещей не существовало средства, которое само по себе и без всякого государственного принуждения приводит к решению указанного затруднения» [3].

Сущность денег, по К. Марксу, состоит в том, что они являются товаром и по происхождению, и по содержанию. Деньги в товарном производстве выполняют 5 основных функций:

1. Являются *мерой стоимости* (с помощью денег измеряются затраты общественно необходимого труда).

2. Являются *средством обращения*. Я, некий производитель товара, меняю его на деньги, получив деньги, приобретаю товары. Здесь работает формула: Товар-Деньги-Товар (Т-Д-Т).

3. Являются *средством накопления*. Функция накопления связана с тем, что каждый производитель должен обеспечить себе общественно признанный залог.

4. Являются *средством платежа*. В денежной форме может фиксироваться величина обязательств и долгов.

5. Совершая постоянный круговорот, деньги выступают в виде *мировых денег*. Экономически сильные государства экспортируют свою валюту в другие страны мира. Доллар, евро функционируют в качестве мировых валют.

«В теории денег есть нечто, напоминающее японский сад. Она несет в себе эстетическое единство, порожденное разнообразием, а ее кажущаяся простота скрывает почти непостижимую сущность». Этим высказыванием М. Фридмана хочется перейти к еще одной стороне анализа денег. «Эволюция не может быть справедливой», – говорил Ф. Хайек.

Владелец денег лишь в том случае может превращать свои деньги в капитал, т. е. умножать их, если найдет на рынке свободного рабочего. Рабочая сила существует только как способность живого человека, для поддержания жизни которого необходима определенная сумма жизненных средств (питание рабочего, его медицинское обслуживание, одежда, содержание его семьи, отдых, обучение детей и т. д.). «Рабочая сила реализуется в труде, а именно в затрате определенного количества мускулов, нервов, мозга – это количество должно быть снова возмещено, чтобы рабочий мог трудиться и завтра. Сами естественные потребности и способы их удовлетворения являются продуктом истории и зависят от культурного уровня страны» [4]. В современном мире этот уровень установлен Де-

кларацией прав человека ООН, где указывается, что каждый человек имеет право на обеспечение необходимого физиологического минимума, минимальное медицинское обслуживание (во всем мире существуют бесплатные больницы для бездомных и малоимущих граждан), свободу передвижения, бесплатное образование (начальное или среднее – в зависимости от страны) и т. п. Что же касается класса собственников, то их доходы составляет прибыль от производства.

Заработная плата образует большую часть доходов потребителей, поэтому оказывает существенное влияние на размер спроса на потребительские товары и на их цены. По величине номинальной заработной платы можно судить об уровне заработка, дохода, но не об уровне благосостояния человека. Для этого надо знать, какова реальная заработная плата. Реальная заработная плата – это та масса жизненных благ и услуг, которую можно приобрести за полученные деньги. Она находится в прямой зависимости от уровня цен на предметы потребления и платные услуги. При капитализме владелец собственности присваивает прибавочную стоимость, создаваемую рабочим, частично себе, что позволяет ему получать прибыль и сверхприбыль. Социалистический принцип распределения по труду также несправедлив, так как человек, имеющий, скажем, пятерых детей, получает столько же, как и тот, у которого один ребенок (в одной системе производства). Справедливости ради надо сказать, что при социализме благодаря социальным программам защиты малоимущих (пособия, предоставление жилья молодым специалистам, матерям-одиночкам, гарантирование работы выпускникам учебных заведений и т. п.) уровень социальной защищенности был все же выше, чем в современном обществе. Если говорить о социальной справедливости, то именно она лежит в основе социальной стабильности общества. Слишком большой разрыв в доходах различных групп населения рано или поздно приводит к социальным взрывам. Социальная справедливость в современном мире – это проблема приемлемой степени неравенства в распределении доходов. Единственной концепции по вопросу о справедливости в распределении доходов нет. Существует несколько наиболее известных концепций справедливого распределения доходов: эгалитаристская, утилитаристская, роулсианская и рыночная.

*Эгалитаристская концепция* считает справедливым уравнивающее распределение доходов. Логика рассуждений здесь такова: если требуется разделить определенное количество благ между людьми, одинаково этого заслуживающими, то справедливо было бы распределение поровну. Проблема в том, что понимать под одинаковыми заслугами? Одинаковый трудовой вклад в общественное благосостояние? Одинаковые стартовые условия в смысле владения собственностью? Одинаковые умственные и физические способности? Единого ответа на этот вопрос мы, очевидно, не получим, потому что опять надо будет обращаться к нравственным понятиям. Но здесь важно подчеркнуть, что эгалитарный подход не столь примитивен, как его иногда представляют в средствах массовой информации: взять и поделить все поровну, как предлагал персонаж знаменитой повести М. Булгакова «Собачье сердце» Шариков. Ведь речь идет именно о равном распределении благ между равным образом заслуживающими этого людьми. И это не худший вариант.

*Утилитаристская концепция* (ее разработал во второй половине XIX в. английский экономист и правовед И. Бентам). Утилитаризм – этическая концепция, построенная на отождествлении добра и пользы. «Я не могу быть счастливым в несчастном окружении», поэтому принцип распределения должен быть таким: «Максимальное благосостояние (счастье) для

максимального количества людей в обществе». Но так как члены общества имеют не одинаковую функцию индивидуальной полезности, то общество может считать справедливым как равное, так и неравное распределение дохода. Поэтому утилитаристская модель может сводиться к эгалитаристской. И все же в этой модели замечательной является идея о невозможности быть счастливым в несчастном окружении. Это гуманистическая позиция.

*Роулсианская концепция* частично реализует гуманистический порыв утилитаризма через утверждение двух принципов: 1) перераспределение доходов в пользу малоимущих и будущих поколений; 2) равенство первоначальных возможностей с учетом неравенства последующих результатов. Скажем, получив высшее образование, два разных человека будут вносить разный вклад в общественное благосостояние. Один станет академиком, другой инженером и т. п.

*Рыночная концепция* считает справедливым распределение доходов на свободной игре рыночных цен, конкурентном механизме спроса и предложения на факторы производства. Распределение ресурсов и доходов в рыночных условиях становится безличностным процессом. Этот способ грозит отсутствием справедливости. Практика показала, что существование обширных зон нищеты чревато многими отрицательными последствиями для стабильности, психического здоровья населения и т. п. По нашему мнению, либерализация (разрешено все, что не запрещено законом) должна быть дополнена этикой справедливости и расчетом возможного разрыва в дифференциации доходов между богатыми и бедными.

В России сейчас существует недопустимый разрыв в доходах между указанными группами. Еще древнегреческий философ Платон писал, что если разрыв превышает 4 раза, то неизбежен социальный взрыв. Для России очевидно, что переход к рыночному распределению ресурсов и доходов населения неизбежно сопровождается большей дифференциацией доходов населения, чем в условиях уравнительного распределения в период социалистического хозяйства. При этом необходимо сделать оговорку, что расчеты официальных статистических органов могут не учитывать доходы, не декларируемые субъектами теневой экономики, и доходы граждан, далеких от законопослушания. Замечено, что периоды экономических потрясений, высокой инфляции сопровождаются усилением разрыва в доходах различных групп населения. Так, в России (сентябрь 1977 г.) на долю 10 % наиболее обеспеченной группы населения приходилось 31 % денежных доходов, а на долю 10 % наименее обеспеченной – 2,5 %. Таким образом, разрыв в доходах этих групп составил 12,5 раз. В сентябре 1998 г. этот разрыв составил 13,5 раз.

Почему вообще существует неравенство в доходах? Ведь в демократических странах принято говорить о равенстве возможностей, которые должны обеспечиваться соответствующими институтами рыночной экономики. Экономисты и социологи называют множество причин и факторов этого неравенства. Отметим лишь самые важные из них.

Во-первых, от рождения люди наделены различными способностями, как умственными, так и физическими. При прочих равных условиях (эту предпосылку нужно всегда иметь в виду) человек, наделенный исключительной физической силой, имеет больше шансов стать знаменитым и высокооплачиваемым спортсменом.

Во-вторых, различия во владении собственностью, особенно доставшейся по наследству. Люди не могут выбирать в какой семье им родиться – потомственных миллионеров или простых рабочих.

В-третьих, различия в образовательном уровне. Сама эта причина во многом зависит от первых двух названных. Ребенок, родившийся в богатой семье, имеет больше шансов получить престижное образование и, соответственно, профессию, приносящую высокий доход, чем ребенок из малообеспеченной семьи.

В-четвертых, даже при равенстве возможностей и одинаковых стартовых уровнях образования больший доход будут получать лица, которых называют «трудоголиками». Эти люди готовы брать работу на дом, задерживаться по долгу службы на рабочем месте для разрешения той или иной профессиональной проблемы, игнорировать свое самочувствие лишь бы добиться высоких результатов в своей работе.

В-пятых, существует группа причин, связанная просто с везением, случаем, неожиданным выигрышем. В условиях неопределенности, характерной для рыночной экономики, эта группа причин может объяснить некоторые случаи неравенства в распределении доходов.

Таким образом, бедные и богатые существуют даже в самых благополучных высоко развитых странах. Что же такое бедность? Как определить ее уровень? Бедность понятие относительное. Русская поговорка: «У кого щи жидковаты, а у кого жемчуг мелковат» – хорошо отражает эту проблему. По мнению известных американских экономистов П. Самуэльсона и В. Ноодхауса, уровень бедности можно определить так: бедность – это уровень дохода, достаточный для того, чтобы поддерживать прожиточный минимум. Бедные семьи обычно тратят 1/3 своего дохода на продукты питания. Увеличив эту величину в 3 раза, можно получить доход, необходимый для существования на уровне прожиточного минимума [5]. Обратим внимание на то, что прожиточный минимум – это не физиологический минимум, который можно определить как уровень дохода, необходимый для физического выживания. Прожиточный минимум, или черта бедности, говорит нам не о границе выживания, а о минимальном уровне стандарта жизни. В России еще очень много людей не достигли даже этого стандарта. Поэтому можно сказать, что, учитывая все принципы распределения, необходимо реализовать социальные программы, направленные на победу над бедностью. Страна с огромной территорией и богатейшими природными ресурсами, высоким духовным и культурным потенциалом не должна иметь столько малообеспеченных и просто очень бедных людей.

Подводя итог небольшой работы, посвященной проблеме роли денег в жизни общества и человека, приходится признать, что деньги – это необходимое зло, пробный камень, как говорят классики, для испытания характера, нравственности, наряду с вином и властью. Если говорить о герое О. де Бальзака Гобсеке, то это пример того, как используются деньги, чтобы властвовать над людьми. Часто этот момент в социальном и личностном пространстве жизни человека является доминирующим. Не зря говорят: «Кто платит, тот и заказывает музыку». Поэтому часто мужчины не любят, когда женщина в семье получает более высокую зарплату, чем мужчина. Не зря среди американских женщин существует поговорка: «Мужчина имеет право на свое мнение, если оно подкреплено счетом в банке». Несомненно, деньги нужны человеку, чтобы чувствовать себя свободным (у Ф. М. Достоевского: «Свобода – это иметь миллион, у кого есть миллион – тот может все, у кого нет – с тем могут все»), сохранить свое достоинство. Очень трудно сохранить чувство собственного достоинства, если ты беден.

Деньги нужны, чтобы радовать близких, помогать нуждающимся и страждущим (приюты для бездомных людей и животных; помощь инвалидам, детям из детских домов и интернатов, пенсионерам и малообеспеченным; помощь музеям, библиотекам, театрам, школам; помощь больным алкоголизмом, наркоманам, больным лейкозом, раком). Чтобы реализовать сострадание, нужны деньги.

Во всем мире существует понятие качества жизни. В это понятие входят: уровень питания, медицинского обслуживания, образования, продолжительности жизни, процент воспроизводства женского населения и т. п. В последние 20 лет уровень и качество жизни российских граждан резко понизились. Растет число брошенных и неустроенных детей; тех, кто не учится. Эти факты можно перечислять бесконечно. Поэтому хотелось бы, чтобы богатые внесли посильный вклад в благотворительность, в социальные проекты, строили спортивные школы, детские площадки, открывали нормальные детские дома семейного типа и т. п. Хочется закончить словами, принадлежащими кому-то из великих: «Деньги – это не панацея, но очень хорошо помогают против бедности». Для России на современном этапе это очень актуально.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бальзак О. Гобсек: собр. соч.: в 24 т. М.: Правда, 1960. Т. 1.
2. Курс экономической теории / Под ред. проф. М. Н. Чепуриной, проф. Е. А. Киселевой. 4-е изд. Киров: АСА, 2001.
3. Менгер К. Основания политической экономии. Австрийская школа в политической экономии. М.: Политиздат, 1992.
4. Маркс К. Капитал. М.: Политиздат, 1987. Т. 1.
5. Самуэльсон П., Ноодхауз В. Экономика. 16-е изд. М.: Вильямс, 2005.
6. Краткий экономический словарь. М.: Политиздат, 1987.
7. Хайек Ф. Пагубная самонадеянность. Ошибки социализма. М.: Новости, 1992.

*A. M. Sklyarova*

#### *SOCIAL AND PSYCHOLOGICAL ASPECT OF THE MONEY ROLE IN MODERN SOCIETY*

*In the article author reviews ethical and psychological relation of money on human live. She analyze ancestry of monetary and it function. Also article reviews systems of monetary circulation, conceptions of income distribution (egalitarian, utilitarian and John Rawl's conception). Especial marked humanistic aspect of monetary.*

**Psychology and money, monetary function, the price of labour, social justice, income distribution**



УДК 621.37 – 621.396 (091)

*Л. И. Золотинкина, Л. Н. Николаева*

## **МУЗЕЙНЫЙ КОМПЛЕКС СПбГЭТУ «ЛЭТИ»**

*Приводится информация о развитии Музейного комплекса СПбГЭТУ и его музеев – Музея истории вуза и Мемориального музея А. С. Попова, включающего мемориальный музей-лабораторию ученого и мемориальный музей-квартиру; показана научно-просветительская и издательская деятельность Музейного комплекса; отмечены наиболее интересные экспонаты музеев.*

**Музей истории СПбГЭТУ, Мемориальный музей А. С. Попова, Электротехнический институт, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет, научные школы ЭТИ, ЛЭТИ, СПбГЭТУ, Н. Г. Писаревский, А. С. Попов, О. В. Алексеев, Ж. И. Алферов**

Более чем за 125 лет в стенах СПбГЭТУ свое зарождение и развитие получили многие научные направления и школы. Естественно, что актуальной является задача отражения всех основных этапов развития вуза, сохранение и аккумулирование документальных и вещественных свидетельств этой истории. Музейный комплекс университета и является таким научно-исследовательским, научно-просветительским подразделением университета, призванным решать как эту задачу, так и задачу приобщения студентов к истории вуза и истории всех его технических и гуманитарных направлений, воспитания чувства патриотизма и ответственности за судьбу и дальнейшее развитие вуза.

В 1998 г. приказом ректора СПбГЭТУ Мемориальный музей А. С. Попова, включающий музей-лабораторию и музей-квартиру ученого, и Музей истории университета были объединены в Музейный комплекс СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Общая площадь музеев ЭТУ более 500 м<sup>2</sup>, к Музейному комплексу относятся и галереи выдающихся ученых университета.

Наличие трех разных по своей направленности музеев позволяет значительно расширить круг задач, которые можно решать на их базе учебными и общественными организациями университета. Музей-лаборатория А. С. Попова представляет собой научно-технический музей, музей-квартира является мемориальным музеем, позволяет более полно раскрыть личность самого ученого, жизнь его семьи, его коллег и показать условия жизни и быта ученых на рубеже XIX–XX вв. Музей истории «ЛЭТИ» дает представление об истории вуза, развитии его научных направлений, учебной и общественной жизни студенчества. На базе экспозиций музеев для студентов ЭТУ читаются курсы по истории науки и техники; проводятся экскурсии для студентов, школьников, сотрудников и гостей университета.



Музейный комплекс является государственным хранилищем памятников истории науки, техники, образования и культуры.

**Музей истории СПбГЭТУ «ЛЭТИ».** Без знания истории развития науки, техники, особенно в своей области, невозможно стать грамотным инженером.

Наиболее полно наша история представлена в следующих книгах: «Автобиографии окончивших ЭТИ» (1904), «Двадцатипятилетие ЭТИ» (1914), «50 лет ЛЭТИ» (1948), «75 лет ЛЭТИ» (1963), «ЛЭТИ за 50 лет Советской власти» (1968), две книги, изданные к столетию ЛЭТИ (1985, 1986), и, наконец, последние два издания, приуроченные к 125-летию СПбГЭТУ: «Первый электротехнический» и «Магический электротехнический» (2011).

Еще в начале XX в. директор ЭТИ П. Д. Войнаровский предложил собирать приборы, имеющие историческое значение, для создания музея. В 1948 г. в 1-м корпусе института была открыта богатейшая выставка, посвященная 50-летию ЛЭТИ как института с 5-летним циклом обучения. На стендах были представлены материалы по истории кафедр института и множество приборов, разработанных инженерами вуза в разное время. Сохранился фотоальбом этой выставки, но сами экспонаты сохранить не удалось, так как не нашлось помещения, где можно было бы все разместить. В те годы катастрофически не хватало помещений для учебного процесса; 3-й корпус был построен и открыт только в 1956 г. (архитекторы Г. А. Александров и А. А. Сперанский, И. И. Фомин). В газете «Электрик» № 21 за 1965 г. была опубликована заметка «Создадим музей истории ЛЭТИ», призывавшая преподавателей и выпускников собирать материалы: книги, газеты, фотографии, документы, значки, личные вещи ученых ЛЭТИ. А в 1970 г. проф. Н. Н. Разумовский обратился к ректору ЛЭТИ А. А. Вавилову с предложением создать исторический архив ЛЭТИ, где хранились бы все вещи и документы, которые можно было бы положить в основу музейной экспозиции. А. А. Вавилов, выпускник ЛЭТИ, навсегда связавший свою судьбу с вузом, поддержал эту инициативу. Было выделено небольшое помещение в 1-м корпусе и создан совет по истории ЛЭТИ.

В совет входили ректор чл.-кор. АН СССР А. А. Вавилов, проф. Н. Н. Разумовский, проф. И. В. Бренев, доценты П. И. Рыжов, Д. А. Добротин, выпускник ЛЭТИ Н. П. Оцелин и др. Работа была проделана огромная. Были собраны все экземпляры газеты «Электрик» (старое название «Красный электрик»), начиная с 1928 г., фотографии преподавателей и выпускников, монографии ученых ЛЭТИ. После Н. Н. Разумовского в 1975 г. совет возглавил проф. И. В. Бренев. В 1980 г. ему и редактору газеты «Электрик» Р. М. Гиммельфарбу было предложено разработать план будущего музея. План, составленный с помощью методиста Музея истории Ленинграда Н. В. Александровой в 1981 г., и был использован при создании экспозиции Музея истории ЛЭТИ в 1986 г.

Музей истории был открыт к 100-летию института 5 июня 1986 г. в торжественной обстановке в административно-учебном корпусе ЛЭТИ в лекционной 321-й аудитории. На открытии присутствовали почетные гости: министр высшего и среднего специального образования СССР Г. А. Ягодин, академик Ж. И. Алферов, а также преподаватели и студенты, выпускники разных лет. Весь коллектив вуза радовался открытию музея. Хотя этому событию предшествовала кропотливая многолетняя работа, практически музей был создан всего за полгода. Большая заслуга в этом принадлежала ректору О. В. Алексееву, про-

ректору А. Н. Иванову, проректору Ю. М. Таирову, Р. М. Гиммельфарбу, Б. М. Кудашеву и многим другим сотрудникам нашего вуза. Многие приносили вещи, имеющие для них и личную ценность.

Тщательно подобранный материал по истории кафедр и факультетов, а также богатейшая коллекция фотографий, собранная при публикации перечисленных выше книг и сохраненная в личных архивах преподавателей, были впоследствии использованы при создании фондов Музея истории ЛЭТИ.

1 января 1993 г. приказом ректора были утверждены штат музея в количестве 4-х человек: директор, хранитель фондов, старший лаборант, машинистка. Директором музея с 1 января 1993 г. была назначена Л. Н. Николаева, которая с самого начала принимала непосредственное участие в формировании его экспозиции. Большая работа по сбору материалов для архива музея, по составлению исторических справок за 25 лет работы музея в разные годы была проделана сотрудниками музея О. В. Богдановым (1993–1996), В. П. Севериновой (с 1998 г.). В Музее истории в разные годы работали: в должности хранителя фондов – М. И. Ройк (до 1999 г.) и Н. А. Дранкович (с 2008 г.), в должности заведующих экспозицией – Т. В. Тимохина (1997–2000), Е. С. Шатова (2005–2006), А. А. Симонова (2009–2010).



Рис. 1

В оформлении экспозиции принимали участие дизайнеры Высшего художественно-промышленного училища им. В. Мухомовой И. Г. Шкретова, И. В. Алексеева, Е. Н. Винокуров и др. В 2001 г. экспозиция была модернизирована с учетом развития университета за прошедшее с 1986 г. время (худ. А. Ф. Ходко; рис. 1 – экспозиция музея).

На стендах, в витринах и на подиумах в зале Музея истории ЭТУ представлены наиболее яркие и значимые страницы его 125-летней истории.

В фондах музея более 54 000 единиц хранения. Это документы, фотографии, публикации и книги, аппаратура, макеты, приборы, памятные знаки, значки, изделия декоративно-прикладного искусства, подарки вузу от его друзей и партнеров.

Выдающийся инженер в области электрических средств связи и общественный деятель Н. Г. Писаревский (1821–1895), будучи в 1868–1886 гг. инспектором Телеграфного ведомства, сумел обосновать необходимость открытия в России специального высшего электротехнического учебного заведения.



Рис. 2

15 июня 2011 г. в галерее ученых ЛЭТИ был установлен бюст основателя ЭТИ Н. Г. Писаревского (рис. 2 – скульптор народный художник РФ А. Г. Дема, арх. З. Т. Степанова).

16(4) сентября 1886 г. в торжественной обстановке было открыто Техническое училище Почтово-телеграфного ведомства – первое в России гражданское электротехническое учебное заведение, которое было призвано обеспечить телеграфную службу «научно-образованными специалистами». В музее вывешена большая карта телеграфных

линий России 1904 г. (копия с карты, хранящейся в Центральном музее связи им. А. С. Попова). Деятельность профессоров П. С. Осадчего, В. И. Коваленкова (впоследствии чл.-кор. АН СССР), П. А. Азбукина и других преподавателей ЭТИ оставила яркий след в развитии проводной связи в нашей огромной стране.

Первым директором – Н. Г. Писаревскому (1886–1895) и Н. Н. Качалову (1895–1905) – институт обязан тем, что на рубеже XIX–XX вв. ЭТИ стал ведущим центром электротехнического образования и науки в России.

В 1898 г. совету ЭТИ было предоставлено право присуждения звания почетных инженеров-электриков, утверждаемого министром МВД. Среди получивших это звание были выдающиеся электротехники И. И. Боргман, Н. Г. Егоров, А. С. Попов, видные ученые и деятели в области электротехники К. Ф. Сименс, А. Н. Лодыгин, М. О. Доливо-Добровольский и др.

Значительная роль в организации эффективной работы ученых института всегда принадлежала его директорам и ректорам. В 1905 г. первым избранным директором стал проф. А. С. Попов (1905), следующими руководителями вуза избирались: профессора П. Д. Войнаровский (1906–1912), Н. А. Быков (1912–1918), П. С. Осадчий (1918–1924), Г. О. Графтио (1924–1925), А. А. Смуров (1925–1929). С 1929 г. директорами института назначались: партийные руководители – Н. И. Шмуйлович (1929–1931), А. С. Александров (1932–1934), А. Ф. Шингарев (1934–1937) и П. И. Скотников (1937–1942, 1944–1954). В 1954 г. во главе института стал выдающийся ученый, педагог проф. Н. П. Богородицкий (1954–1967), что способствовало развитию самых новых научных направлений, затем ректорами ЛЭТИ были чл.-кор. АН СССР А. А. Вавилов (1968–1983), проф. О. В. Алексеев (1984–1998), Д. В. Пузанков (1998–2009), В. М. Кутузов (с 2009 г. по настоящее время). С 1994 г. должность ректора вновь стала выборной.

Студенты и преподаватели ЭТИ всегда активно участвовали в общественной и политической жизни России. В начале XX в. в ЭТИ была очень сильная ячейка Российской социал-демократической рабочей партии (РСДРП). С ноября 1918 г. ЭТИ носит имя В. И. Ульянова (Ленина). В экспозиции музея представлена картина, на которой художник Ю. Ратманский изобразил группу студентов ЭТИ на приеме у наркома связи Северо-Западного района Н. И. Подвойского, к которому они обращаются с просьбой о поддержке студентов института (1918) в сложных условиях жизни в Петрограде.

В экспозиции музея представлены макеты первой в России учебно-научной телеграфной лаборатории в ЭТИ (в помещении на ул. Новоисаакиевской, 18), макет физической лаборатории ЭТИ в новом здании ЭТИ на Аптекарском острове.

В начале XX в. все три основных направления электротехники – связь, электрохимия и электроэнергетика – были представлены в Электротехническом институте императора Александра III. В ЭТИ работали выдающиеся ученые с мировым именем. Так, первая в России кафедра теоретических основ электротехники была основана проф. И. И. Боргманом. Курс математики в разные годы читали профессора К. А. Поссе, С. Е. Савич, Я. Д. Тамаркин, Г. М. Фихтенгольц и др.

Основы радиотехнического образования в России были заложены А. С. Поповым (1859–1906). В экспозиции представлена картина художницы О. Котик «Доклад А. С. Попова перед преподавателями и студентами ЭТИ 19 октября 1897 г.». В 1916 г. в ЭТИ бы-

ла организована первая в России специальность «Радиотелеграфные станции» (проф. Н. А. Скрицкий), руководителем которой в 1917 г. стал И. Г. Фрейман (проф. с 1921 г.). Кафедра радиотехники дала стране таких выдающихся ученых, как академики А. Н. Щукин, А. А. Харкевич, члены-корреспонденты АН СССР В. И. Сифоров, С. Я. Соколов, проф. А. Ф. Шорин, Е. Я. Щеголев и др. С 1926 г. практически по 1938 г. преподавал в ЛЭТИ будущий академик АН СССР А. И. Берг, ученик И. Г. Фреймана по Военно-морской академии. Радиотехника стала стимулом развития электровакуумной техники. В 1921 г. по инициативе профессоров М. М. Глаголева и И. Г. Фреймана была создана первая в России научно-учебная электровакуумная лаборатория. В 1924 г. лабораторию разделили – руководителем рентгеновской лаборатории стал проф. физики М. М. Глаголев, а руководителем электровакуумной лаборатории был назначен вернувшийся в Россию проф. Н. А. Скрицкий. Развитие последней стало базой для организации в ЛЭТИ электровакуумной специальности (проф. А. А. Шапошников, 1931). Это научное направление стало одним из определяющих в нашем институте. В ЛЭТИ были разработаны электронные лампы сверхвысокочастотного диапазона для связной и радиолокационной аппаратуры. Одна из таких мощных генераторных ламп демонстрируется в экспозиции (разработчик – выпускница ЛЭТИ, герой социалистического труда Г. М. Московская).

Еще в 1927 г. выпускник кафедры радиотехники С. Я. Соколов, решая проблемы гидроакустики в интересах ВМФ, открыл возможность использования ультразвука для обнаружения скрытых дефектов в сплошных средах и металлах. В 1931 г. была организована первая в мире кафедра электроакустики. С. Я. Соколовым была создана отечественная школа ультразвуковой техники и дефектоскопии, получившая в настоящее время всемирное признание, в музее представлен один из первых образцов дефектоскопа (рис. 3).



Рис. 3

ЭТИ явился пионером в области электрохимии. Первый лабораторный курс по электрохимии был организован проф. А. А. Кракау (1855–1909). В стенах ЭТИ впервые разработаны промышленные методы получения алюминия и марганца на базе отечественных месторождений (1914, академики И. В. Гребенщиков, Н. С. Курнаков, профессора Н. А. Пушкин, П. Ф. Антипин, М. С. Максимова и др.). В музее представлен макет электролизера.

Развитие энергетического направления в ЭТИ связано с именами первых в России профессоров по электротехнике М. А. Шателена, П. Д. Войнаровского, В. В. Дмитриева, Г. О. Графтио, Я. М. Гаккеля и др. Наиболее ярко это направление работ ЭТИ проявилось в годы строительства первых тепло- и гидроэлектростанций, в разработке плана ГОЭЛРО. В музее представлен макет Волховской ГЭС – первой крупной ГЭС, построенной по плану ГОЭЛРО под руководством проф. ЛЭТИ Г. О. Графтио (впоследствии – академика АН СССР) (рис. 4 – макет ГЭС).



Рис. 4

правление работ ЭТИ проявилось в годы строительства первых тепло- и гидроэлектростанций, в разработке плана ГОЭЛРО. В музее представлен макет Волховской ГЭС – первой крупной ГЭС, построенной по плану ГОЭЛРО под руководством проф. ЛЭТИ Г. О. Графтио (впоследствии – академика АН СССР) (рис. 4 – макет ГЭС).

Выпускником ЭТИ проф. А. А. Смуровым была создана научная школа в области техники высоких напряжений и передачи электрической энергии (1919). В музее представлен прекрасный макет лаборатории техники высоких напряжений, одной из самых крупных в Европе, носящей имя своего создателя (рис. 5 – макет лаборатории А. А. Смурова).

Организация первой в мире кафедры электропривода (1922), основание отечественной школы электропривода как нового научного направления в электротехнике связаны с именем выпускника ЭТИ проф. С. А. Ринкевича.

Одним из старейших направлений в области электромашиностроения в электротехническом институте была подготовка специалистов по электрическим машинам и аппаратам. Кафедра дала стране многих ведущих ученых и специалистов в области электромашиностроения. Это академик А. П. Костенко, чл.-кор. АН СССР А. Е. Алексеев, профессора В. Т. Касьянов, Р. А. Лютер, В. К. Горелейченко и др.

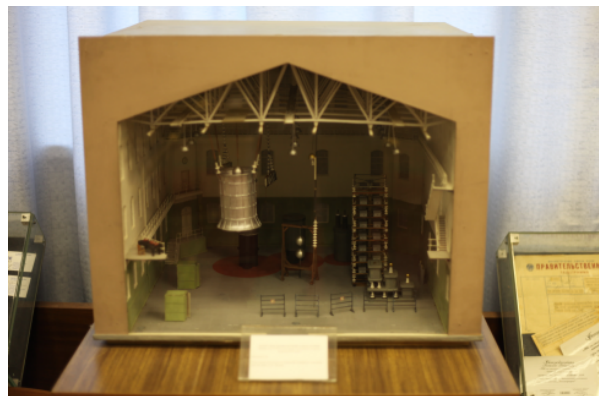


Рис. 5

В 1930-е гг. значительно изменяется направленность подготовки кадров в ЛЭТИ. Электрохимическое направление было передано в Технологический институт (1930), а энергетическое (после кончины А. А. Смурова, 1937) – в Политехнический институт. Сократилась подготовка студентов по специальности «Проводная связь» (в 1945 г. это направление подготовки инженеров было полностью передано в ЛЭИС им. М. А. Бонч-Бруевича). В музее представлены образцы телефонной аппаратуры 1940-х гг.

В это же время в институте были образованы новые кафедры, открывшие новые направления подготовки специалистов в России, в основном в области приборостроения, связанные в значительной мере с укреплением обороноспособности страны; институт стал ведомственным институтом министерства судостроительной промышленности. В 1930-е гг. в ЛЭТИ были организованы первые в СССР кафедра приборов управления стрельбой (впоследствии кафедра вычислительной техники, 1931), кафедра автоматики и телемеханики (1935) и др.

На отдельном подиуме размещен индуктор, созданный чл.-кор. АН СССР В. П. Вологдиным (1881–1959) – основоположником техники высоких частот в России. Это электромагнитное устройство обеспечивает индукционный нагрев тел вихревыми токами, возбуждаемыми переменным магнитным полем (рис. 6).

В. П. Вологдиным была создана школа индукционной закалки металлов (1934) и специальность «Высокочастотная электротермия», а в 1946 г. – кафедра высокочастотной техники ЛЭТИ.

В послевоенные годы в институте стали интенсивно развиваться новые научные направления в области телевидения, радиоэлектроники и кибернетики, электрификации и автоматизации промышленности, высокочастотной электротермии, электротехнических материалов, автоматики и телемеханики, вычислительной



Рис. 6

техники, оптоэлектроники и др. Развитие этих направлений отражено в основном на фотографиях и в трудах ученых.

В музее широко представлены документы и памятные экспонаты, связанные с периодом Великой Отечественной войны. В годы блокады в ЛЭТИ размещались подразделения политуправления Краснознаменного Балтийского флота. В музее представлена минидиарама бункера командующего Краснознаменным Балтийским флотом адмирала В. Ф. Трибуца (макет изготовлен под руководством арх. К. Г. Манукяна; рис. 7 – макет бункера).



Рис. 7

Ученые ЛЭТИ работали и в условиях блокадного города. Память об этих событиях сохраняется в альбомах фотографий и документов тех лет. Более 1200 преподавателей, студентов, рабочих и служащих ЛЭТИ ушли в народное ополчение и действующую армию. Около административно-учебного корпуса ЭТУ в 1987 г. был установлен памятник ЛЭТИйцам, погибшим в годы войны (скульптор А. Г. Дема, арх. В. А. Гребеньков).

В послевоенные годы ученые ЛЭТИ активно участвовали в разработке систем управления различного вида объектами, радиоэлектронными средствами для нужд ВМФ и ВВС. В то же время получает развитие новое направление в подготовке инженеров – радиолокация, радионавигация, телевидение. В экспозиции представлен опытный образец клистрона (разработка кафедры радиотехнической электроники).



Рис. 8

Большой интерес не только отечественных, но и зарубежных ученых вызывает лабораторный макет первой в мире антенны с немеханическим управлением луча (фазированной антенной решетки), разработанной в 1954–1955 гг. в ЛЭТИ группой ученых кафедры теоретических основ радиотехники под руководством проф. Ю. Я. Юрова (рис. 8). В экспозиции представлен демонстрационный макет антенны трехсантиметрового диапазона, разработанной при участии кафедры корабельных радиосистем под руководством проф. В. И. Винокурова (подарок НПО «Равенство»).

В отдельной витрине размещен макет крейсера «Киров». В создании систем управления различными функциональными узлами крейсера, его энергетическими системами принимали участие ученые ЛЭТИ.

ЛЭТИ внес свою лепту и в освоение космического пространства. На отдельном подиуме представлены микросхемы и блоки для спектрометрической аппаратуры и бортовых спектрометрической и радиометрической систем метеорологических искусственных спутников Земли «Метеор», «Метеор-Природа», «Электро».

К сожалению, большая часть результатов фундаментальных и прикладных разработок ученых ЛЭТИ не могла быть представлена в экспозиции, так как работы велись в интересах Вооруженных сил и ВМФ.

В 1992 г. вуз получил статус университета. С этого времени начинается развитие гуманитарного и экономического направлений.

Информация о факультетах университета, кафедрах и специальностях представлена на отдельных стендах, размещенных в центре музейной экспозиции.

В СПбГЭТУ трудятся лауреаты Ленинских, национальных и международных премий, 22 лауреата золотой медали им. А. С. Попова РАН. В 2000 г. Нобелевскую премию по физике получил выпускник ЛЭТИ академик РАН Ж. И. Алферов. Среди выпускников и преподавателей, работавших и работающих в вузе, 36 академиков и членов-корреспондентов РАН. Портреты выдающихся ученых представлены в двух галереях: галерее академиков и членов-корреспондентов АН СССР и РАН, преподававших или окончивших ЭТИ–ЛЭТИ, и галерее преподавателей, внесших значительный вклад в развитие ЭТИ–ЛЭТИ–СПбГЭТУ. Над оформлением галерей трудились директора музеев «ЛЭТИ» Л. И. Золотинкина и Л. Н. Николаева и художник-дизайнер З. Т. Степанова под руководством Комиссии ученого совета СПбГЭТУ по истории университета (председатель проф. И. Г. Мироненко). Многочисленные международные связи нашего вуза с вузами других стран были в свое время отражены на карте мира, но время вносит коррективы в это направление деятельности, и, естественно, эта карта требует периодического обновления.

Отражение новых подходов в подготовке кадров для стремительно развивающихся научных направлений, таких как информатика, телекоммуникации и нанотехнологии, требует и применения новых, современных решений при построении экспозиции Музея истории университета. Актуальной задачей для сотрудников музея и всего коллектива университета является пополнение собрания Музея истории (приборы, аппаратура, документы), ведь на данный момент еще очень много нераскрытых и не представленных в должной мере страниц истории вуза<sup>1</sup>.

*L. I. Zolotinkina, L. N. Nikolaeva*

*SPBETU «LETI» MUSEUM COMPLEX*

*The paper provides information on the development of the SPbETU museum complex which includes the museum of the University history and the A. S. Popov Memorial museum. The A. S. Popov Memorial museum consists of the A. S. Popov memorial museum-laboratory and the A. S. Popov memorial museum-apartment. Besides, the paper describes scientific-educational and publishing activities of the museum and presents the most remarkable museum items.*

**The SPbETU history museum, the A. S. Popov Memorial museum, the Electrotechnical institute, The St. Petersburg Electrotechnical university, scientific schools of ETI, LETI, SPbETU, N. G. Pisarevsky, A. S. Popov, O. V. Alekseev, G. I. Alferov**

---

<sup>1</sup> Продолжение в следующем выпуске.

## Сведения об авторах

*Агандеев Павел Олегович*

Магистрант кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ, бакалавр техники и технологий.

Тел.: +7 (906) 240-76-37. E-mail: agandeev@gmail.com.

*Аль-Рахми Рамзи Яхья*

Аспирант кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (951) 652-06-08. E-mail: rums84@mail.ru.

*Аль-Таяр Башир Али*

Аспирант кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (952) 370-48-75. E-mail: basheeraltayar@yahoo.com.

*Ауди Камел*

Аспирант кафедры госпитальной хирургии с курсами травматологии и ВПХ Санкт-Петербургской государственной педиатрической медицинской академии.

Тел.: +7 (904) 647-01-76. E-mail: kameloudi@mail.ru.

*Безгодков Юрий Алексеевич*

Профессор кафедры госпитальной хирургии с курсами травматологии и ВПХ Санкт-Петербургской государственной педиатрической медицинской академии, д-р мед. наук.

Тел.: +7 (911) 909-80-29. E-mail: iouri@pisem.net.

*Богачев Юрий Викторович*

Доцент кафедры физики СПбГЭТУ, канд. физ.-мат. наук.

Тел.: (812) 234-96-56. E-mail: spin\_ltd@mail.ru.

*Bogachev Yury Viktorovich*

Assistant professor of the department of physics of Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI». PhD in physical and mathematical science.

Phone: (812) 234-96-56. E-mail: spin\_ltd@mail.ru.

*Боронахин Александр Михайлович*

Доцент кафедры лазерных измерительных и навигационных систем СПбГЭТУ, канд. техн. наук.

Тел.: (812) 234-08-14. E-mail: boronachin@mail.ru.

*Бурков Евгений Александрович*

Аспирант кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (911) 136-30-51. E-mail: eaburkov@gmail.com.

*Вендик Орест Генрихович*

Профессор кафедры физической электроники и технологии СПбГЭТУ, д-р техн. наук.

Тел.: +7 (921) 757-19-32. E-mail: OGVendik@mail.eltech.ru.



*Вьюгинова Алена Александровна*

Аспирант кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (921) 754-94-65. E-mail: alenanovik@rambler.ru.

*Винь Нгуен Хай*

Аспирант кафедры математического обеспечения и применения ЭВМ СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (960) 234-36-65. E-mail: haivinh@mail.ru.

*Григорьев Юрий Дмитриевич*

Профессор кафедры математического обеспечения и применения ЭВМ СПбГЭТУ, д-р техн. наук.

Тел.: +7 (911) 989-46-79. E-mail: yuri\_grigoriev@mail.ru.

*Даровских Станислав Никифорович*

Доцент кафедры радиотехнических систем Южно-Уральского государственного университета, канд. техн. наук.

Тел.: +7 (912) 892-14-80. E-mail: darovskih.s@mail.ru.

*Давидюк Елена Петровна*

Доцент кафедры экономики и управления Санкт-Петербургского гуманитарного университета профсоюзов, канд. экон. наук, доцент.

Тел.: (812) 394-74-56. E-mail: sfdavidyuk@mail.ru.

*Давидюк Станислав Филиппович*

Профессор кафедры статистики и прогнозирования социально-экономических систем Санкт-Петербургского государственного университета сервиса и экономики, д-р экон. наук, профессор.

Тел.: (812) 394-74-56. E-mail: sfdavidyuk@mail.ru.

*Дмитревич Геннадий Данилович*

Профессор кафедры систем автоматизированного проектирования СПбГЭТУ, д-р техн. наук.

Тел.: +7 (911) 710-10-22. E-mail: gddm@inbox.ru.

*Дык Чан Танг*

Аспирант кафедры лазерных измерительных и навигационных систем СПбГЭТУ.

Тел.: (812) 234-08-14. E-mail: ttduc83@mail.ru.

*Задорожный Антон Ильич*

Инженер ООО «Резонанс», аспирант кафедры физической электроники и технологии СПбГЭТУ.

Тел.: (812) 293-84-45. E-mail: aizadorozhny@gmail.com.

*Золотинкина Лариса Игоревна*

Директор Мемориального музея А. С. Попова СПбГЭТУ.

Тел.: (812) 234-59-00. E-mail: LIZolotinkina@mail.eltech.ru.

*Зубарев Александр Владимирович*

Ассистент кафедры теоретических основ электротехники СПбГЭТУ, аспирант.

Тел.: +7 (961) 806-29-44. E-mail: sawa1987@list.ru.

*Калинин Борис Вячеславович*

Начальник отдела ОАО «ВНИИРА». Аспирант кафедры микро- и нанoeлектроники.  
Тел.: (812) 335-25-55 (доб. 32-12); +7 (951) 655-30-43. E-mail: boris-k@bk.ru.

*Кормилицын Олег Павлович*

Заведующий кафедрой прикладной механики и графики, канд. техн. наук, профессор.  
Тел.: +7 (911) 968-53-15. E-mail: okormilicyn37@mail.ru.

*Кутузова Евгения Степановна*

Начальник отдела новых образовательных технологий Департамента информационных технологий Санкт-Петербургского гуманитарного университета профсоюзов, канд. техн. наук, доцент.

Тел.: (812) 740-38-91. E-mail: KutuzovaES@dup.ru.

*Ламкин Иван Анатольевич*

Инженер кафедры микро- и нанoeлектроники СПбГЭТУ.  
Тел.: (812) 234-31-64. E-mail: ialamkin@mail.ru.

*Лукомский Юрий Александрович*

Заведующий кафедрой корабельных систем управления СПбГЭТУ, д-р техн. наук.  
Тел.: (812) 234-16-45. E-mail: loucomsqui@mail.ru.

*Марков Максим Владимирович*

Аспирант кафедры систем автоматизированного проектирования СПбГЭТУ.  
Тел.: +7 (981) 880-95-75. E-mail: irjigeiler@gmail.com.

*Марченко Ярослав Юрьевич*

Аспирант кафедры физики СПбГЭТУ, магистр техники и технологии.  
Тел.: (812) 234-96-56. E-mail: spin\_ltd@mail.ru.

*Молдовян Николай Андреевич*

Профессор кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления СПбГЭТУ, д-р техн. наук.

Тел.: (812) 234-28-27. E-mail: nmold@mail.ru.

*Музанна Мохаммед Мохсен*

Аспирант кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (952) 238-92-44. E-mail: mohamed1984a@yahoo.com.

*Николаева Людмила Николаевна*

Директор музея истории СПбГЭТУ.  
Тел.: (812) 346-47-79.

*Николаев Борис Петрович*

Зам. директора ФГУП НИИ особо чистых биопрепаратов, канд. физ.-мат. наук.  
Тел.: (812) 230-19-51. E-mail: nikolaevhpb@gmail.com.

*Падерно Павел Иосифович*

Профессор кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления СПбГЭТУ, д-р техн. наук. Лауреат премии Правительства РФ в области образования, засл. деятель науки РФ. Вице-президент Межрегиональной эргономической ассоциации России.

Тел.: +7 (921) 090-40-31. E-mail: pipaderno@list.ru.

*Парнес Михаил Давидович*

Главный инженер ООО «Резонанс», канд. техн. наук.

Тел.: (812) 293-84-45. E-mail: mdparnes@mail.ru.

*Попечителев Евгений Парфирович*

Профессор кафедры биомедицинской электроники и охраны среды СПбГЭТУ, засл. деятель науки РФ, д-р техн. наук.

Тел.: +7 (921) 946-54-62. E-mail: eugeny\_p@mail.ru.

*Прокофьев Геннадий Иванович*

Заведующий кафедрой робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ, д-р техн. наук, профессор.

Тел.: (812) 234-66-77. E-mail: giprokofiev@yandex.ru.

*Путов Виктор Владимирович*

Заведующий кафедрой систем автоматического управления СПбГЭТУ, декан ФЭА, профессор, д-р техн. наук.

Тел.: (812) 234-68-18. E-mail: vvputov@mail.ru.

*Склярова Анастасия Максимовна*

Доцент кафедры философии СПбГЭТУ, канд. филос. наук.

Тел.: +7 (921) 974-16-47; (812) 346-47-83.

*Смирнов Александр Викторович*

Выпускник кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (903) 093-59-39. E-mail: AVSmirnov\_work@mail.ru.

*Соколов Валерий Николаевич*

Заместитель генерального директора ОАО «Центральное конструкторское бюро аппаратостроения». Почетный работник промышленности вооружений РФ, канд. техн. наук.

Тел.: +7 (919) 076-10-83. E-mail: sokolov@cdbae.ru.

*Соловьева Елена Борисовна*

Заведующая кафедрой теоретических основ электротехники СПбГЭТУ, д-р техн. наук, профессор.

Тел.: (812) 346-17-96. E-mail: selenab@hotmail.ru.

*Сулейманкадиева Алжанат Эльдеркадиевна*

Доцент кафедры прикладной экономики СПбГЭТУ, канд. экон. наук, доцент кафедры управления.

Тел.: +7 (911) 154-96-10. E-mail: saljanat@mail.ru.

*Тарасов Сергей Анатольевич*

Доцент кафедры микро- и наноэлектроники СПбГЭТУ, канд. физ.-мат. наук.

Тел.: (812) 234-31-64. E-mail: SATarasov@mail.ru.

*Тихонов Сергей Константинович*

Инженер ООО «Резонанс».

Тел.: (812) 293-84-45.

*Тханг Ха Мань*

Аспирант кафедры корабельных систем управления СПбГЭТУ.

Тел.: (812) 234-16-45. E-mail: hqlen201004@gmail.com.

*Фролов Сергей Александрович*

Студент кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (911) 967-16-76. E-mail: dragoneddie@mail.ru.

*Цехановский Владислав Владимирович*

Доцент кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления СПбГЭТУ, канд. техн. наук, доцент.

Тел.: (812) 234-27-73. E-mail: vvcehanovsky@mail.ru.

*Чертовской Владимир Дмитриевич*

Профессор кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления СПбГЭТУ, д-р техн. наук, профессор.

Тел.: (812) 234-27-73. E-mail: vdchertowsky@mail.ru.

*Чьен Нгуен Кьем*

Аспирант кафедры систем автоматического управления СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (952) 373-57-99. E-mail: kiemchien0812@yahoo.com.

*Шелудько Виктор Николаевич*

Первый проректор СПбГЭТУ, канд. техн. наук, доцент.

Тел.: (812) 234-25-39. E-mail: VNSheludko@eltech.ru.

*Шпекторов Андрей Григорьевич*

Доцент кафедры корабельных систем управления СПбГЭТУ, канд. техн. наук.

Тел.: (812)234-16-45. E-mail: spect\_ag@mail.ru.

*Яковлев Сергей Алексеевич*

Профессор кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления СПбГЭТУ, д-р техн. наук.

Тел.: +7 (921) 644-50-59. E-mail: sayakovlev@list.ru.

## Правила представления рукописей авторами

В редакционный совет журнала «Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»» необходимо представить:

- файлы на дискете либо CD (в отдельных случаях по предварительному согласованию с редсоветом допустима передача материалов по электронной почте):
  - рукопись статьи;
  - сведения об авторе(ах);
- документы на листах формата А4 (1 экз.):
  - рукопись статьи (статья должна быть объемом 4–8 маш. с., обзорная статья – до 16 маш. с.);
  - сведения об авторе(ах);
  - рекомендация кафедры с указанием наименования тематического раздела, в котором предполагается опубликование материала;
  - экспертное заключение о возможности опубликования материала в открытой печати;
  - сопроводительное письмо (только для авторов, не работающих (не обучающихся) в СПбГЭТУ «ЛЭТИ»).

*Сведения об авторах должны содержать:*

1. Фамилию, имя, отчество (полностью) автора.
2. Основное место работы.
3. Должность.
4. Ученую степень, ученое звание.
5. Контактный телефон, адрес электронной почты.

Все сведения печатаются в строку (без пунктов) на русском и английском языках.

### *Правила оформления текста статьи*

Статья должна быть тщательно отредактирована, содержать признаки научной публикации:

- текстовый редактор Microsoft Word версии не ниже 97;
- формат бумаги А4;
- параметры страницы: поля – верхнее 2.5 см, левое и нижнее 2.5 см, правое 2 см, верхний колонтитул 2 см, нижний колонтитул 2 см;
- основной текст статьи: шрифт «Times New Roman» 12 pt; выравнивание по ширине; первая строка с абзацным отступом 1 см; межстрочный интервал «Множитель 1.2».

На первой странице указывается индекс УДК (в левом верхнем углу; шрифт «Times New Roman» 14 pt; межстрочный интервал одинарный); далее даются инициалы и фамилии авторов, затем название статьи, аннотация статьи и ключевые слова на русском языке. Инициалы и фамилии авторов, название статьи, аннотация статьи и ключевые слова на английском языке размещаются в конце публикации после библиографического списка.

*Перечень авторов* разделен запятыми, инициалы перед фамилиями (шрифт «Times New Roman» 12 pt, жирный курсив; выравнивание по правому краю, абзацный отступ справа 1 см; автоматические переносы отключены; интервалы перед абзацем и после него 6 pt, межстрочный интервал одинарный).

*Название статьи* набирается прописными буквами (шрифт «Times New Roman» 14 pt; жирный; выравнивание по левому краю; отступы слева и справа 1 см; автоматические переносы отключены; интервалы перед абзацем 6 pt, после него – 12 pt; межстрочный интервал одинарный).

*Аннотация* содержит 3–7 строк, характеризующих содержание статьи (шрифт «Times New Roman» 10 pt, курсив; выравнивание по ширине; отступы: слева и справа 1.5 см, первая строка 0.75 см; интервалы перед абзацем и после него 0 pt, межстрочный интервал одинарный).

*Ключевые слова* состоят из 3–10 слов и словосочетаний, отражающих содержание статьи, разделенных запятыми, в конце их перечисления точка не ставится; шрифт «Times New Roman» 10 pt, жирный; выравнивание по левому краю; автоматические переносы отключены; интервалы перед абзацем 6 pt, после него 9 pt; межстрочный интервал одинарный).

Далее следует текст статьи.

После основного текста следует библиографический список, который включает:

➤ *заголовок* «Список литературы» набирается прописными буквами (шрифт «Times New Roman» 12 pt; выравнивание по центру; интервалы: перед абзацем 6 pt, после него 6 pt; межстрочный интервал «Одинарный»);

➤ *библиографическое описание источника* с порядковым номером ссылки на него по тексту, начиная с первого, выполненное по ГОСТ 7.3–2003. Библиографическое описание документа. Введ. 01.07.2004 / Госкомстандарт. М., 2004 (отдельным абзацем; шрифт «Times New Roman» 10 pt; первая строка с абзацным отступом 0.7 см; выравнивание по ширине; межстрочный интервал одинарный).

Библиографический список не должен превышать 10 (для обзорных заказных статей – 20) наименований: приводятся только источники, на которые есть ссылки в тексте (ссылки на неопубликованные и нетиражированные работы не допускаются).

Для создания *формул* используются встроенные возможности Word и (или) редактора MathType. Необходимо использовать следующие установки редактора формул. Размеры: «полный» 12 pt, «подстрочный» 10 pt, «под-подстрочный» 8 pt, «символ» 14 pt, «подсимвол» 12 pt; стили: текст, функция, число – шрифт «Times New Roman», вектор-матрица – шрифт «Times New Roman», жирный; греческий малый, греческий большой, символ – шрифт «Symbol», прямой; переменная – шрифт «Times New Roman», курсив; интервалы: перед формулой 6 pt, после нее 6 pt.

На каждый рисунок и таблицу в тексте статьи необходимо дать ссылку. Каждый рисунок и таблица должны быть пронумерованы (напр.: Рис. 1, Табл. 3).

Текст в *таблицах* печатается через 1 интервал, шрифт «Times New Roman»; основной текст 10 pt, индексы 8 pt. Нумерационный заголовок содержит слово «Таблица» и ее номер арабскими цифрами (без знака номера перед ними и без точки на конце); выравнивается по правому краю таблицы и выделяется светлым курсивом; интервалы: перед таблице 4 pt, после нее 4 pt.

Рисунки цифрового формата (в электронном виде) создаются средствами Word или другими программами в черно-белом виде. Цветные рисунки не допускаются. Рисунки не редактируются. Основные линии на рисунках (границы блоков и соединительные линии на схемах, линии графиков) имеют толщину 1.25 pt, вспомогательные (линии-выноски, оси, размерные линии) – 0.75 pt.

Описание содержания рисунка, а также введенных на нем обозначений следует приводить в основном тексте статьи. Подпись под рисунком содержит только его номер (шрифт «Times New Roman», курсив, 10 pt) и располагается по центру рисунка. Все тексты и

обозначения на рисунке даются шрифтом размером 10 pt, индексы 8 pt с единичным межстрочным интервалом; цифровые обозначения на линиях выносок и номер рисунка даются курсивом. Буквенные обозначения фрагментов рисунка (шрифт «Times New Roman», курсив, 10 pt) ставятся внизу фрагмента; интервалы: перед рисунком 6 pt, после него 6 pt.

При невозможности представить электронные версии рисунков следует представить только твердые копии, обеспечивающие качественное воспроизведение рисунков после их сканирования (графики – черной тушью на белой бумаге, фотографии – на матовой бумаге размером не менее 9 × 12 см, не более 21 × 30 см).

*Перечень основных тематических направлений журнала:*

- Радиоэлектроника и телекоммуникации.
- Физика твердого тела и электроника.
- Информатика, управление и компьютерные технологии.
- Автоматизация и управление.
- Электротехника.
- Приборостроение и информационные технологии.
- Биотехнические системы в медицине и экологии.
- Управление качеством, инновационный и антикризисный менеджмент.
- Гуманитарные науки.
- История науки, образования и техники.
- Современные технологии в образовании.

*Рукописи аспирантов печатаются бесплатно.*

Технические вопросы можно выяснить по адресу: [Izvestiya-leti@yandex.ru](mailto:Izvestiya-leti@yandex.ru)