



Содержание

Редакционный совет:

В. М. Кутузов
(председатель)
М. Ю. Шестопалов
(заместитель председателя)
В. А. Мейев
(ответственный секретарь)
В. Н. Малышев
(«Радиоэлектроника
и телекоммуникации»)
А. В. Соломонов
(«Физика твердого тела
и электроника»)
М. С. Куприянов
(«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

Бабичев Д. А., Тупик В. А., Селуянова А. В. Математическая модель
и анализ фрактальной антенны дипольного типа 3

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА И ЭЛЕКТРОНИКА

Бессонов В. Б. Доза облучения пациентов при проведении
дентальных рентгенологических исследований с использованием
портативного рентгеновского аппарата «ПАРДУС-Р» 7

Ухов А. А., Герасимов В. А., Кострин Д. К. Методика и аппаратура
для определения спектральных характеристик стекол и зеркал 10

ИНФОРМАТИКА, УПРАВЛЕНИЕ И КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Демьянчук А. А., Молдовян Н. А., Рыжков А. В. Выбор
«идеальных» параметров в схеме двухшаговой аутентификации
и коммутативном шифре 15

Куприянов М. С., Холод И. И., Каршиев З. А. Метод построения
параллельных алгоритмов интеллектуального анализа данных
из потоконезависимых функциональных блоков 19

Мондикова Я. А., Вайчикаускас М. А. Криптосхемы над задачей
дискретного логарифмирования по трудноразложимому модулю 24

Советов Б. Я., Цехановский В. В., Чертовской В. Д., Нечитайленко Р. А.
Формирование математического описания многоуровневой
адаптивной автоматизированной системы управления
производством на стадии планирования 27

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ

Путов В. В., Полушин И. Г., Лебедев В. В., Путов А. В. Обобщение
метода мажорирующих функций в задачах адаптивного управления
нелинейными динамическими объектами 32

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Соловьева Е. Б. Нейронные предкомпенсаторы для борьбы
с нелинейными искажениями в высокочастотном усилителе
мощности 38

Иванов А. Н. Методы расчета электродинамических усилий
в устройствах индукционного нагрева 43

Ваганов М. А., Пименова И. А. Особенности синхронного
неявнополюсного генератора при учете активного сопротивления
обмотки статора 49

Белов М. П. Применение генетических алгоритмов для
параметрической оптимизации электромеханических систем
дробильных агрегатов 55

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Шейнман Е. Л., Шувалова О. Н. Анализ эффективности
алгоритмов идентификации сигналов и оценки дистанции
объектов, обнаруженных в разнесенных системах наблюдения 60

Аббакумов К. Е., Степаненко Н. В. Моделирование электроакустического тракта теневого метода ультразвукового контроля при использовании бесконтактных датчиков 67

БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ В МЕДИЦИНЕ И ЭКОЛОГИИ

Манило Л. А., Немирко А. П., Саламонова И. С. Автоматический анализ формы спирографических петель при искусственной вентиляции легких 73

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ

Имаев Д. Х., Котова Е. Е. Модели и алгоритмы принятия решений о распределении дидактических ресурсов в среде обучения 79

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ, ИННОВАЦИОННЫЙ И АНТИКРИЗИСНЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ

Дрежницкий В. А. Открытые инновации как механизм сетевого взаимодействия организаций, создающих знания 86

Житенева М. И. Оценка экологического ущерба от загрязнения окружающей среды 92

ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ

Яльшиев Р. А. Национальная политика Советского Союза в годы перестройки 96

ИСТОРИЯ НАУКИ, ОБРАЗОВАНИЯ И ТЕХНИКИ

Северинова В. П., Северинов К. М. Становление и развитие Электротехнического института (ЭТИ) 1905–1913 гг. 102

Сведения об авторах 108

Правила представления рукописей авторами 111

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)

Учредитель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В. И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ)
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,
О. Р. Крумина, И. Г. Скачек
Комп. верстка:
А. С. Судовцова, А. И. Рыбца

Подписано в печать 14.10.13.
Формат 60 × 84 1/8.

Бумага офсетная. Печать офсетная.
Гарнитура «Times New Roman».
Уч.-изд. л. 11,2. Печ. л. 14,0.
Тираж 300 экз. (1-й завод 1–120 экз.)
Заказ 108.

Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

197376, Санкт-Петербург,
ул. Проф. Попова, 5
Тел.: (812) 346-45-23
Тел. / факс: (812) 346-28-56



УДК 520.628

Д. А. Бабичев, В. А. Тупик, А. В. Селуянова

Математическая модель и анализ фрактальной антенны дипольного типа

Описывается математическая модель микрополосковой линии передачи дипольного типа. Рассматриваются свойства данного типа антенн. Созданная математическая модель позволяет оценить количество итераций, необходимых для получения заданных частотных характеристик.

Фрактальная антенна, широкополосность, математическая модель

Антенны дипольного типа характеризуются параллельным разветвлением на каждой итерации. При таком разветвлении в центральной узловой точке напряжение U_0 оказывается одинаковым для всех подходящих к нему каналов. Если разветвление на n каналов симметрично и все выходы подключены к одинаковым нагрузкам, то токи во всех выходных каналах $I_i (i=1, \dots, n)$ равны между собой: $I_i = I_0/n$.

Схематично антенна дипольного типа изображена на рис. 1.

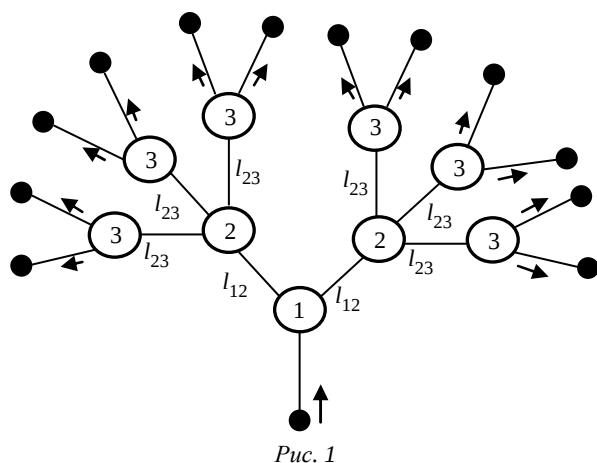


Рис. 1

Предположим, что разветвление производится симметрично на n каналов. Все выходные каналы имеют одинаковые сопротивления. Тогда токи и напряжения во входном плече U_1 и I_1 соответственно, а токи и напряжения в выходных плечах U_2 и I_2 . Для параллельного разветвления

$U_1 = U_2$, $I_1 = nI_2$ и поэтому матрица передачи, связывающая токи и напряжения на входе и одном из выходов, принимает вид

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix}, \text{ или } \begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = A_i \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix}, A_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & n \end{bmatrix}.$$

С помощью матриц передачи элементов анализ процесса прохождения сигнала с общего входа на какой-либо выход симметричной схемы фрактальной антенны дипольного типа, являющейся многополюсником, сводится к анализу каскадной схемы, состоящей из четырехполюсников.

Для описания свойств антенн данного типа создана математическая модель микрополосковой линии передачи (рис. 2). Здесь A_i – матрица передачи фрактального элемента, $B_{i,i+1}$ – матрица передачи узла ветвления микрополосковой линии передачи.

Одиночную ветку микрополосковой линии передачи дипольного типа можно представить в виде последовательного соединения четырехполюсников (рис. 3).

Одновременно схему на рис. 3 можно упростить и представить в виде последовательного соединения четырехполюсников (рис. 4).

Матрицу передачи для рис. 3 можно записать с помощью выражения

$$M_{\Sigma} = A_{11} B_{12} A_{21} B_{23} A_{31} B_{34} A_{41},$$

а матрица передачи для рис. 4 будет выглядеть следующим образом:

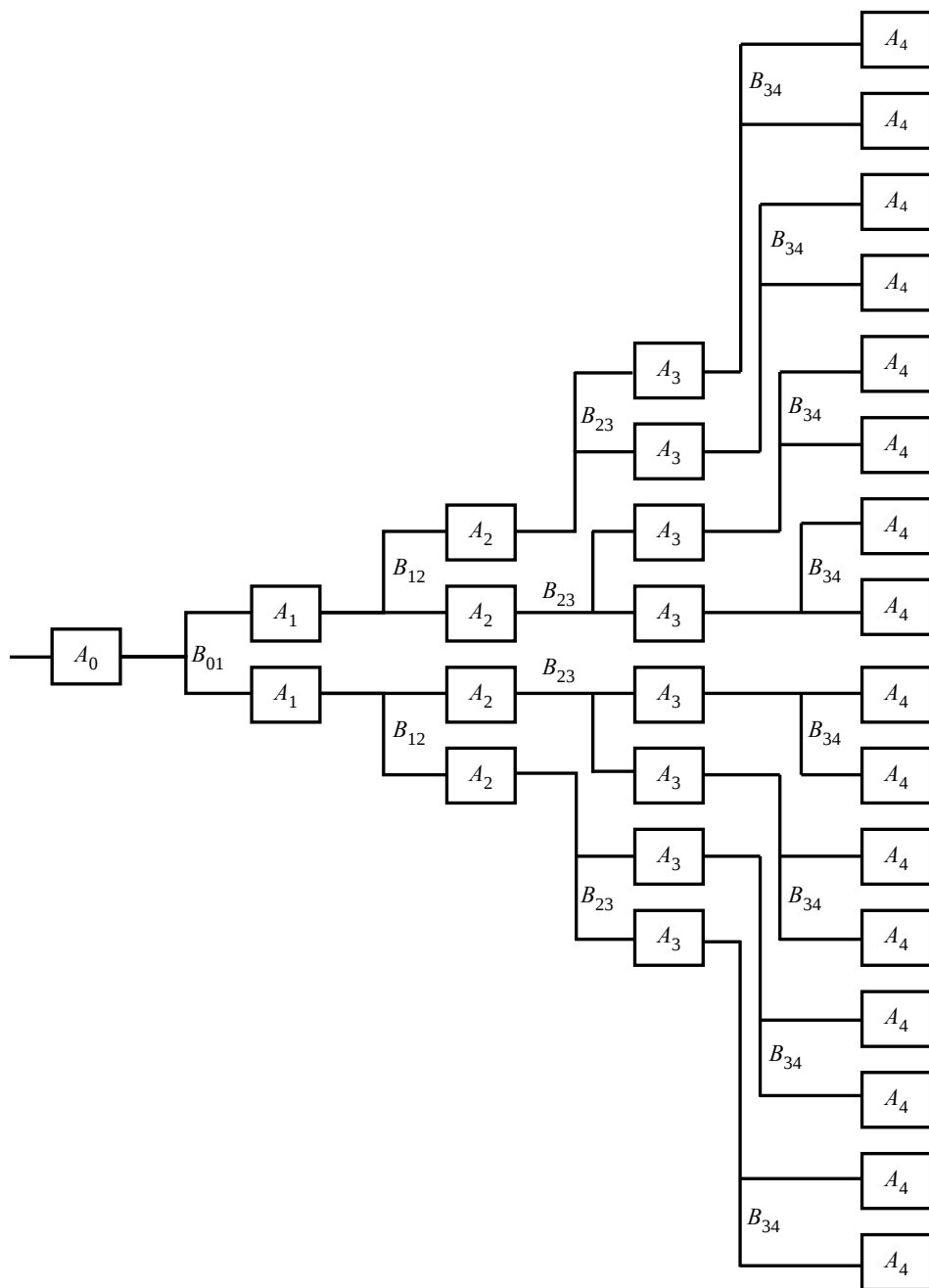


Рис. 2

$$\mathbf{M}_{\Pi\Sigma} = A_1 A_2 A_3 A_4.$$

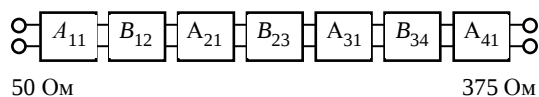


Рис. 3

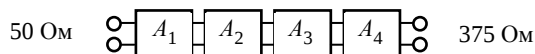


Рис. 4

Введем следующие условные обозначения:
 k – количество ветвей деления;

i – количество итераций;
 n – изменение сопротивления одиночного элемента.

В этом случае в обобщенном виде можно записать:

$$\mathbf{M}_{\Pi\Sigma} = \prod_{i=1}^i A_i,$$

$$\left| \frac{U_i}{I_i} \right| = \mathbf{M}_{\Pi\Sigma} \left| \frac{U_i}{I_i} \right|.$$

Вычислим комплексное сопротивление фрактального элемента A_i :

$$\frac{1}{Z_{\text{общ}i}} = \frac{1}{Z_{i0}} + \frac{1}{Z_{i0}} + \frac{1}{Z_{i0}} + \frac{1}{Z_{i0}} + \dots (k^i \text{ раз}),$$

$$Z_{\text{общ}i} = n^i \frac{Z_1}{k^i}.$$

Следовательно,

$$U_{\text{общ}i} = I_{\text{общ}i} Z_{\text{общ}i} = I_1 n^i \frac{Z_1}{k^i} = n^i \frac{Z_1}{k^i},$$

$$\begin{vmatrix} U_1 \\ I_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} k^i/n^i & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} U_i \\ I_i \end{vmatrix}.$$

Как известно из [см. лит.]:

$$Z_{\text{вх}} = \frac{AZ_{\text{вых}} + B}{CZ_{\text{вых}} + D}.$$

Следовательно,

$$\frac{n^i}{k^i} = 7,5.$$

Одновременно для одиночной ветки микрополосковой линии передачи дипольного типа справедливо выражение:

$$\begin{vmatrix} U_1 \\ I_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} k^i/n^i & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & k^i \end{vmatrix} \begin{vmatrix} U_i \\ I_i \end{vmatrix} \text{ или } (7,5)^{\frac{1}{i}} = n.$$

Ставя главным условием получения широкополосной антенны и максимального согласования одновременно одиночной ветки микрополосковой линии передачи и фрактальной микрополосковой структуры в целом, получаем зависимость $n_k(i)$ (рис. 5).

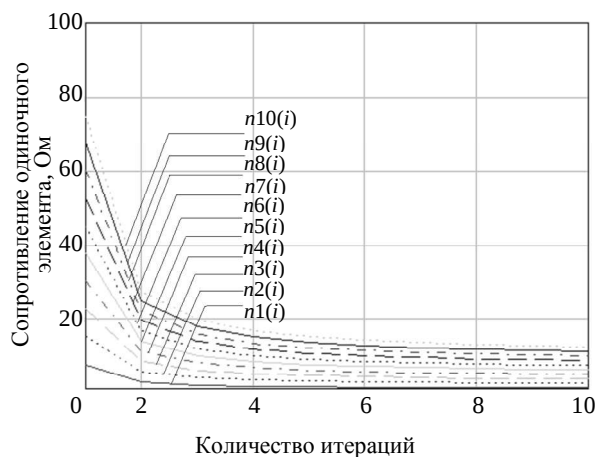


Рис. 5

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. С ростом количества ветвлений увеличивается рассогласованность одиночной ветки фрак-

тальной микрополосковой линии передачи и фрактальной структуры в целом.

2. Для уменьшения рассогласования необходимо увеличивать количество итераций фрактальной антенны.

Антенна является устройством передачи энергии от питающего фидера в окружающее пространство. Качественно данное свойство антенны иллюстрирует рис. 6.

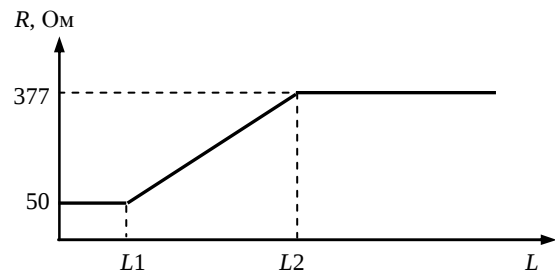


Рис. 6

Для оценки количественного улучшения согласования антенны с окружающим пространством с введением фрактальности выполним следующие преобразования:

$$\frac{n^i}{n^{i+1}} = \frac{7,5^{\frac{1}{i}}}{7,5^{\frac{1}{i+1}}} = 7,5^{\frac{1}{i} - \frac{1}{i+1}} = 7,5^{\frac{1}{i^2+i}}.$$

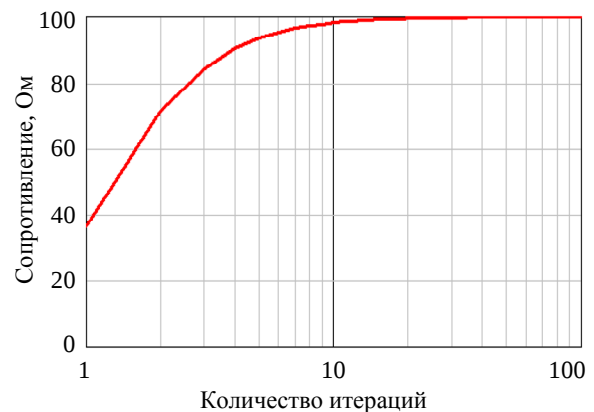


Рис. 7

Количество ветвей деления k	Число итераций i				
	1	2	3	4	5
2	7.5	2.74	1.96	1.65	1.5
3	15	5.48	3.92	3.3	3
4	22.5	8.22	5.88	4.95	4.5
5	30	10.96	7.84	6.6	6
Улучшение согласования, %		36	71	84	91

Количественные характеристики улучшения согласования антенны приведены на рис. 7 и в таблице.

На основе проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. На 5-й итерации достигается 91 % улучшения характеристик широкополосного согласования нагрузки.

2. Самый большой скачок улучшения согласования происходит на 2-й и 3-й итерациях, при дальнейшем увеличении количества итераций улучшение происходит существенно медленнее.

Описанная математическая модель позволяет оценить количество итераций, необходимых для получения заданных частотных характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Сазонов Д. М., Гридин А. Н., Мишустин Б. А. Устройства СВЧ. М.: Высш. шк., 1981.

D. A. Babichev, V. A. Tupik, A. V. Seluyanova

MATHEMATICAL MODEL AND ANALYSIS FRACTAL ANTENNA DIPOLE TYPE

This article the mathematical model of a microstrip transmission line dipole type. We consider the characteristics of this type of antennas. Described by a mathematical model to estimate the number of iterations required to obtain the desired frequency characteristics.

Fractal antenna, broadband, mathematical model



УДК 621.386.2

В. Б. Бессонов

Доза облучения пациентов при проведении дентальных рентгенологических исследований с использованием портативного рентгеновского аппарата «ПАРДУС-Р»

Описана оценка дозы облучения пациентов при проведении дентальных исследований с использованием портативного рентгеновского аппарата «ПАРДУС-Р» по утвержденным в РФ методикам. Проведено сравнение эффективной дозы облучения пациентов с существующими образцами стоматологической рентгенодиагностической аппаратуры.

Дентальная рентгенография, портативный рентгеновский аппарат, эффективная доза облучения, радиационный контроль

Разработка новых методик оказания медицинской помощи в стоматологии и челюстно-лицевой хирургии, например операция хирургической имплантации, потребовала создания новых технических средств рентгенодиагностики в процессе лечения. Применительно к имплантации задача диагностики осложняется тем, что рентгеновские снимки участка челюстно-лицевого отдела необходимо выполнять неоднократно в ходе операции. При этом пациент не может быть направлен в специализированный рентгеновский кабинет. Соответственно, рентгенодиагностические исследования необходимо выполнять непосредственно в стоматологическом кабинете или операционной.

Существующие методики рентгенодиагностических исследований в стоматологии и челюстно-лицевой хирургии и технические средства для их реализации предполагают размещение рентгеновского аппарата на штативе [1]. Очевидно, что проведение дентальной съемки на штативе (даже напольном – передвижном) в условиях стоматологического кабинета крайне неудобно. Поэтому в последние несколько лет на рынке отечественного медицинского оборудования появились портативные рентгеновские аппараты, конструкция которых позволяет проводить рентгенодиагностические исследования без использования штатива. Оценка радиационной нагрузки на медицинский персонал при проведении рентгенодиагностики с использованием аппаратуры подобного класса подробно рас-

смотрена в работах [2], [3]. Однако в связи с постепенным внедрением портативных стоматологических рентгеновских аппаратов в клиническую практику необходимо выполнить оценку воздействия ионизирующего излучения не только на персонал, но и на пациентов.

Целью выполненных исследований явилась оценка радиационной нагрузки на пациента при проведении рентгенодиагностических исследований портативным стоматологическим рентгеновским аппаратом. В ходе исследований измерялись значения эффективной дозы облучения пациента при проведении дентальной съемки первым отечественным портативным рентгеновским аппаратом семейства «ПАРДУС» (см. рисунок).

Измерения проводились в аккредитованной лаборатории радиационного контроля ООО «Корал-сервис» (аттестат аккредитации № САРК.RU.-0001.442136, действителен до 31.12.2014 г.). При проведении измерений использовались следующие нормативно-методические документы:



– СанПиН 2.6.1.2523–09 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)»;

– «Гигиенические требования к устройству и эксплуатации рентгеновских аппаратов и проведению рентгенологических исследований. СанПиН 2.6.1.1192–03»;

– методические указания МУ.2.6.1.2944–11 «Контроль эффективных доз облучения пациентов при проведении медицинских рентгенологических исследований».

Физико-технические условия измерений соответствовали реальному режиму дентальной съемки и составили:

- анодное напряжение 65 кВ;
- анодный ток 0.15 мА;
- время экспозиции 0.3 с.

Объект съемки – тканезквивалентный (водный) фантом диаметром 150 мм и высотой 250 мм.

Доза облучения пациентов определяется расчетными методами по утвержденной в Российской Федерации методике (в соответствии с разд. 5 МУ 2.6.1.2944–11 «Контроль эффективных доз облучения пациентов при проведении медицинских рентгенологических исследований»). Расчет дозы основан на использовании измеренного значения радиационного выхода рентгеновского аппарата.

При рентгенодиагностике с использованием портативных дентальных рентгеновских аппаратов подразумевается, что рентгенолаборант при исследованиях держит аппарат в руках (обычно на расстоянии вытянутой руки) [4], [5]. Минимально допустимое кожно-фокусное расстояние в данном случае обеспечивается конструкцией аппарата.

Значение эффективной дозы E [мкЗв/ч] облучения пациентов при проведении рентгенологического исследования определяется с помощью выражения

$$E = R \cdot i \cdot t \cdot K_e,$$

где R – радиационный выход рентгеновского излучателя, мГр·м²/(мА·с); i – ток рентгеновской трубки, мА; t – время проведения исследования, с; K_e – коэффициент перехода от значения радиационного выхода рентгеновского излучателя к эффективной дозе облучения пациента с учетом вида проведенного рентгенологического исследования, проекции, размеров поля облучения, фокусного расстояния и анодного напряжения, мкЗв/(мГр·м²).

Значение коэффициента K_e для рентгенологических стоматологических исследований (для контактной съемки) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исследование	U, кВ	K _e , мкЗв/(мГр·м ²)	
		Верхняя челюсть	Нижняя челюсть
Резцы	50...0	55	30
Премоляры	50...70	40	20
Моляры	50...70	25	15
Съемка прикуса	50...70	75	40

Таким образом, для расчета эффективной дозы облучения пациента при проведении прицельных дентальных рентгенологических исследований необходимо определить радиационный выход рентгеновского аппарата, а также режимы съемки.

Радиационный выход рентгеновского аппарата равен мощности поглощенной (или экспозиционной) дозы в свободном воздухе на расстоянии 1 м от фокуса рентгеновской трубки на оси первичного пучка рентгеновского излучения при заданном значении анодного напряжения, приведенной к значению анодного тока 1 мА.

Для получения радиационного выхода R [мГр·м²/(мА·с)] рентгеновского аппарата по результатам проведенных измерений мощности поглощенной дозы D [мГр/ч] при анодном токе рентгеновской трубки i на расстоянии r [м] от ее фокуса используется выражение

$$R = \frac{D \cdot r^2}{3600 \cdot i}.$$

Значения радиационного выхода портативного рентгеновского аппарата «ПАРДУС-Р» для различных значений анодного напряжения приведены в табл. 2.

Таблица 2

Анодное напряжение, кВ	55	60	65
Радиационный выход, $\frac{\text{мГр} \cdot \text{м}^2}{\text{мА} \cdot \text{с}}$	0.06	0.072	0.083

Проведенные ранее клинические исследования [6] позволили создать таблицу параметров экспозиции, которые рекомендуется устанавливать при проведении рентгенологических исследований пациентов различного пола и возраста (табл. 3).

С учетом полученных в результате исследований данных можно рассчитать эффективную дозу облучения пациентов при проведении различных типов дентальных исследований с использованием портативного рентгеновского аппарата «ПАРДУС-Р» (табл. 4).

Таблица 3

Пациент	Номер зуба	Напряжение, кВ	Время экспозиции, с	Количество электричества, мА · с
Мужчина	1–3	65	0.1	0.015
	4–5	65	0.15	0.0225
	6–7	65	0.2	0.03
	8	65	0.3	0.045
Женщина	1–3	60	0.1	0.015
	4–5	60	0.15	0.0225
	6–7	60	0.2	0.03
	8	60	0.3	0.045
Ребенок	1–3	55	0.1	0.015
	4–5	55	0.15	0.0225
	6–7	55	0.2	0.03
	8	55	0.3	0.045

Полученные в ходе проведения исследований результаты показывают, что лучевая нагрузка на пациентов при наиболее «жестких» условиях эксплуатации портативного рентгеновского аппарата

данным, полученным с использованием специализированного программного обеспечения для расчета дозы облучения пациентов, разработанного на кафедре ЭПУ СПбГЭТУ [6]. Для сравнения можно привести следующие данные:

– в течение длительного перелета на самолете (7...8 ч) пассажиры накапливают эффективную дозу в размере 40...60 мкЗв;

– средний радиационный фон на территории Санкт-Петербурга составляет 0.1...0.2 мкЗв/ч.

Эффективная доза облучения пациентов на современной рентгеновской аппаратуре, предназначенной для получения прицельных рентгенограмм в стоматологии, составляет от 2 до 10 мкЗв.

Таким образом, использование портативного рентгеновского аппарата «ПАРДУС-Р» позволяет снизить дозу облучения пациентов при проведе-

Таблица 4

Тип исследования	Количество электричества, мА · с	Эффективная доза, мкЗв					
		Мужчина		Женщина		Ребенок	
		Верхняя челюсть	Нижняя челюсть	Верхняя челюсть	Нижняя челюсть	Верхняя челюсть	Нижняя челюсть
Резцы	0.015	0.068	0.037	0.060	0.033	0.050	0.027
Премоляры	0.030	0.098	0.049	0.088	0.044	0.072	0.036
Моляры	0.045	0.092	0.055	0.082	0.049	0.068	0.041
Съемка прикуса	0.060	0.369	0.197	0.329	0.175	0.270	0.144

для стоматологии «ПАРДУС-Р» составляет не более 0.4 мкЗв. Приведенные значения соответствуют

нии дентальных диагностических исследований и, как следствие, повысить эффективность лечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СанПин 2. 6. 1. 1192-03. Здравоохранение России. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность: Гигиенические требования к устройству и эксплуатации рентгеновских кабинетов, аппаратов и проведению рентгенологических исследований. Введ. 01.05.2003. М.: Деан, 2003.
2. Потрахов Н. Н., Грязнов А. Ю., Барковский А. Н. Радиационная нагрузка при проведении рентгенодиагностических исследований методами микрофокусной рентгенографии // Радиационная гигиена. 2008 Т. 1, № 1. С. 1–5.
3. Потрахов Н. Н., Потрахов Е. Н., Грязнов А. Ю. Особенности и физико-технические условия съемки на рентгенодиагностическом комплексе «ПАРДУС-Стома» // Мед. техника. 2009. № 3. С. 36–38.
4. Микрофокусная рентгенография: опыт внедрения разработки вуза в производство / Н. Н. Потрахов, Е. Н. Потрахов, К. К. Жамова, В. Б. Бессонов, Д. А. Шишов, А. Ю. Грязнов // Материалы XI Всерос. науч.-практ. конф. «Планирование и обеспечение подготовки кадров для промышленно-экономического комплекса региона». СПб., 2012. С. 85–90.
5. Микрофокусная рентгенография – новое направления развития медицинской диагностики / В. Б. Бессонов, А. Ю. Грязнов, Е. Н. Потрахов, Н. Н. Потрахов // 13-я НТК «Медико-технические технологии на страже здоровья»: сб. тр. М., 2011. С. 237–241.
6. Бессонов В. Б. Программа расчета радиационной нагрузки на пациентов при проведении медицинских рентгенологических исследований // 67-я НТК НТОРЭС им. А. С. Попова. СПб., 2012. С. 271–273.

V. B. Bessonov

PATIENT DOSE DURING X-RAY STUDY WITH THE USE OF PORTABLE INTRAORAL X-RAY "PARDUS-R"

The paper describes the assessment of patient doses during dental examination using a portable intraoral X-ray "Pardus-R" on the approved methods in the Russian Federation. A comparison of the effective dose in patients with existing patterns of dental X-ray equipment.

Intraoral X-Ray, portable X-ray, effective dose, radiation monitoring

УДК 535.312; 681.785

А. А. Ухов, В. А. Герасимов, Д. К. Кострин

Методика и аппаратура для определения спектральных характеристик стекол и зеркал

Рассмотрены основные типы конструкций зеркал. Приведены их основные спектральные характеристики. Показана возможность расчета параметров зеркал по спектрам отражения и пропускания, получаемых с помощью оптического спектрометра. Продемонстрировано экспериментальное подтверждение эффективности разработанной методики расчета.

Автомобильное зеркало, спектральная характеристика, оптический спектрометр

Зеркала заднего вида являются важным элементом безопасности автомобиля. Минимально необходимые требования к зеркалам заднего вида оговорены международными стандартами. Отражающая способность автомобильного зеркала должна быть не менее 40 %. При таком ее значении обеспечивается достаточная яркость изображения в зеркале в сумерках, а также возможность различать предметы в зеркале при ярком фронтальном освещении.

Можно выделить два вида зеркал: с зеркальным покрытием, нанесенным на внутреннюю по отношению к окружающей среде поверхность стекла, и с наружным зеркальным покрытием, нанесенным на сторону стекла, обращенную в окружающую среду. Наружное расположение отражающего слоя обеспечивает существенное повышение четкости и контрастности изображения в зеркале. В традиционном зеркале, с амальгамой на внутренней стороне, лучи света проходят через наружную поверхность стекла, затем через его толщину отражаются на его внутренней поверхности и повторяют путь в обратном направлении. Как поверхность, так и объем стекла могут содержать дефекты, не заметные для глаза: микроскопические царапины, неоднородности химического состава. На этих дефектах часть энергии светового пучка рассеивается, кроме того, само стекло обладает некоторой отражающей способностью. Эти явления приводят к снижению контрастности и четкости изображения. По типу зеркального покрытия оптических элементов образцы можно разделить на зеркала: белого цвета (рис. 1, а), голубого цвета (рис. 1, б) и желтого цвета (рис. 1, в).

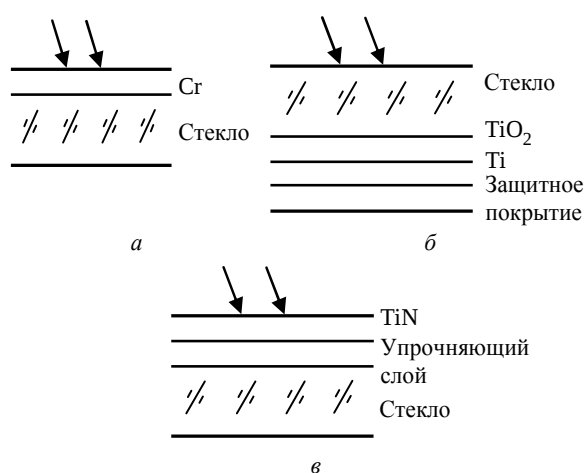


Рис. 1

Оптические или спектральные средства защиты от ослепления основаны на соотношении спектральных характеристик излучения ламп, используемых в автомобильных фарах, спектров отражения зеркал со специальными покрытиями и спектральной чувствительности человеческого зрения [1]. Спектральные средства защиты являются оптимальным решением проблемы ослепления с точки зрения соотношения цены и результата.

Принцип действия спектральных средств защиты от ослепления заключается в специальном подборе спектра отражения зеркала. Такое зеркало приобретает определенный цветовой оттенок – тон. Тон зеркал бывает, как правило, синий, голубой или зелено-голубой, желто-золотистый, также встречаются зеркала, имеющие розовый оттенок. На рис. 2 приведены спектральные характеристики человеческого зрения и отражения зеркал (I – спектральная чувствительность, λ – длина волны): 1 – ночное зрение; 2 – дневное зрение; 3 – синее зеркало; 4 – голубое зеркало; 5 – золотистое зеркало.

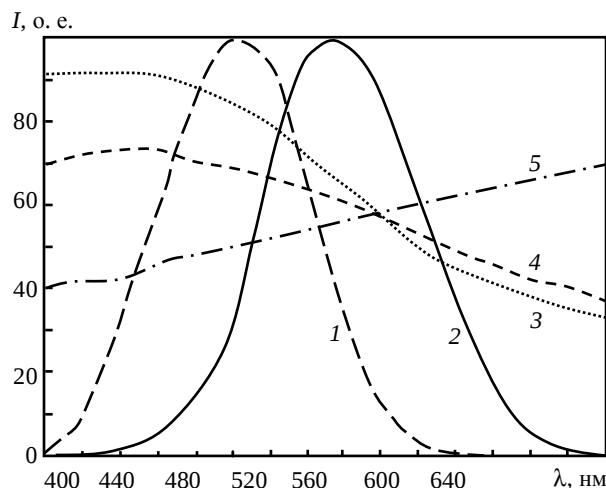


Рис. 2

У голубых зеркал спектр отражения подбирается таким образом, чтобы наиболее интенсивные составляющие света лампы накаливания – красная и желтая ослабились, а голубая и зеленая, имеющие малую интенсивность, отражались без потерь. Селективное ослабление красной и желтой составляющих создает защиту от ослепления. Зеркала с синим или голубым оттенком обладают рядом недостатков. Во-первых, зеркало имеет характерный голубой цвет, а чувствительность человеческого зрения распределена по спектру неоднородно – спектральная характеристика чувствительности дневного зрения смещена относительно ночного в сторону желтого и красного цвета (рис. 2, характеристики 2 и 1 соответственно). Голубое зеркало не учитывает эти особенности зрения, что может приводить к неверному восприятию цвета [1] и характера перемещения объектов. Во-вторых, эти зеркала не защищают от света современных ксеноновых ламп, так как максимум их яркости приходится именно на синий и голубой участки спектра, соответствующие наивысшему отражению таких зеркал.

Принцип действия зеркал с желто-золотистым оттенком основан на особенностях дневного и ночного зрения человека. Спектральная характеристика темнового зрения человека смещена относительно светового в коротковолновую область спектра (рис. 2). При этом оба типа зрения действуют независимо друг от друга и в большинстве реальных случаев (при реальных уровнях освещенности) они работают одновременно. Это реализуется за счет подобранной спектральной характеристики коэффициента отражения зеркал, позволяющей при ослеплении одного типа зрения добиться того, что другой будет продолжать эффек-

тивно работать, различая предметы. Зеркало эффективно отражает длинноволновую (красную и желтую) часть спектра, но подавляет отражение в коротковолновой (голубой) области. При отсутствии в зеркале ослепляющего фактора изображение воспринимается обоими типами зрения, а при наличии – механизм светового зрения может быть ослеплен, однако темновое зрение оказывается защищенным и продолжает работать, передавая мозгу полную информацию об обстановке на дороге.

Для обеспечения высокого качества автомобильных зеркал необходимо применение измерительного оборудования, позволяющего проводить объективную оценку цветопередачи и качества поверхности стекол. Метод оценки состоит в определении нормального светопропускания стекла τ_v по интенсивности светового потока, пропускаемого испытываемым стеклом, и расчете спектрального коэффициента пропускания $\tau(\lambda)$ стекла. Решение задачи определения качества зеркала обеспечивает проверка важнейшего параметра зеркал – отражающей способности. Внешний вид установки для оценки качества зеркал представлен на рис. 3.

Данная установка представляет собой оптический спектрометр [2]–[6] с применением интегрирующей сферы для повышения точности получаемых результатов.

Оптическая схема спектрометра имеет постоянную линейную дисперсию. Таким образом, линейная зависимость углового положения спектральной линии от длины волны позволяет существенно сократить объем вычислений при обработке спектров. Структурная схема оптической части спектрометра однокаскадного на основе вогнутой дифракционной решетки [5] представлена на рис. 4 (1 – входное окно, 2 – внутренний

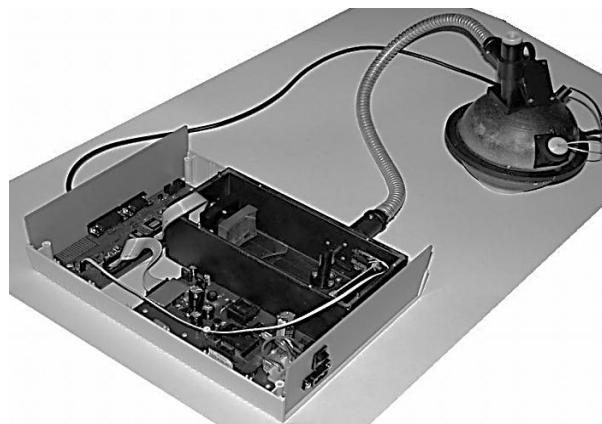


Рис. 3

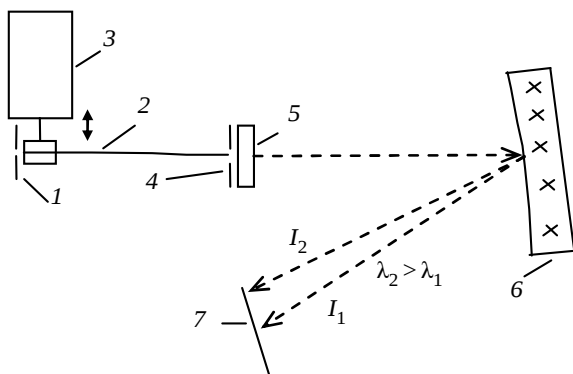


Рис. 4

световод, 3 – электромагнит, 4 – входная щель спектрометра, 5 – фильтр, 6 – дифракционная решетка, 7 – фотоприемник).

Пучок света, спектральный состав которого несет информацию об оптических свойствах поверхности, от которой отразился, подводится к входному отверстию 1 диаметром 1 мм и проходит по внутреннему световоду 2 к входной щели спектрометра 4, ширина которой равна 50 мкм. С помощью электромагнита 3 торец внутреннего световода может позиционироваться либо точно напротив отверстия 1, либо сбоку от входного отверстия. Во втором случае оптическое излучение не попадает внутрь спектрофотометра, что позволяет измерить темновой сигнал [4]. Свет попадает на вогнутую дифракционную решетку 6, с помощью которой изображение щели строится на поверхности фотоприемника 7.

Комплексная задача измерения спектральных характеристик стекол и зеркал достаточно сложна. Характеристическими параметрами стекол и зеркал являются:

- спектральные коэффициенты пропускания $\tau(\lambda)$ и отражения $\rho(\lambda)$ в интервале длин волн 280...2500 нм;
- коэффициенты светопропускания τ_v и светототражения ρ_v ;
- коэффициенты прямого солнечного пропускания τ_e и прямого солнечного отражения ρ_e ;
- коэффициент общего пропускания солнечной энергии g ;
- коэффициент пропускания УФ τ_{uv} ;
- общий показатель передачи цвета R_Q .

Для характеристики стекла основными параметрами являются τ_v и g , для зеркал – $\rho(\lambda)$ и ρ_e ;

остальные параметры являются дополнительными для получения дополнительной информации.

Для примера рассмотрим измерение коэффициента отражения зеркал ρ_v . Данный параметр может быть рассчитан по следующей формуле:

$$\rho_v = \frac{\int_{380}^{780} D_\lambda \rho(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} D_\lambda V(\lambda) d\lambda} \approx \frac{\int_{380}^{780} D_\lambda \rho(\lambda) V(\lambda) \Delta\lambda}{\int_{380}^{780} D_\lambda V(\lambda) \Delta\lambda},$$

где D_λ – относительное распределение спектральной мощности осветителя; $V(\lambda)$ – функция эффективности свечения, определяющая стандартного наблюдателя для фотометрии.

В случае многослойной структуры спектральные коэффициенты отражения $\rho(\lambda)$ могут быть рассчитаны из спектральных коэффициентов пропускания и отражения отдельных компонентов следующим образом:

- для двуслойной структуры:

$$\rho(\lambda) = \rho_1(\lambda) + \frac{\tau_1^2(\lambda) \rho_2(\lambda)}{1 - \rho_1'(\lambda) \rho_2(\lambda)},$$

где $\rho_1(\lambda)$ – спектральный коэффициент отражения наружного слоя, замеренный в направлении падающего излучения; $\tau_1(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания наружного слоя; $\rho_2(\lambda)$ – спектральный коэффициент отражения второго слоя, замеренный в направлении падающего излучения; $\rho_1'(\lambda)$ – спектральный коэффициент отражения для наружного слоя, замеренный в направлении, противоположном направлению падающего излучения;

- для трехслойной структуры:

$$\rho(\lambda) = \rho_1(\lambda) + \frac{\tau_1^2(\lambda) \rho_2(\lambda) [1 - \rho_1'(\lambda) \rho_3(\lambda)] + \tau_1^2(\lambda) \tau_2^2(\lambda) \rho_3(\lambda)}{[1 - \rho_1'(\lambda) \rho_2(\lambda)] [1 - \rho_1'(\lambda) \rho_3(\lambda)] - \rho_2^2(\lambda) \rho_1'(\lambda) \rho_3(\lambda)},$$

где $\rho_3(\lambda)$ – спектральный коэффициент отражения третьего слоя, замеренный в направлении падающего излучения; $\tau_2(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания второго слоя.

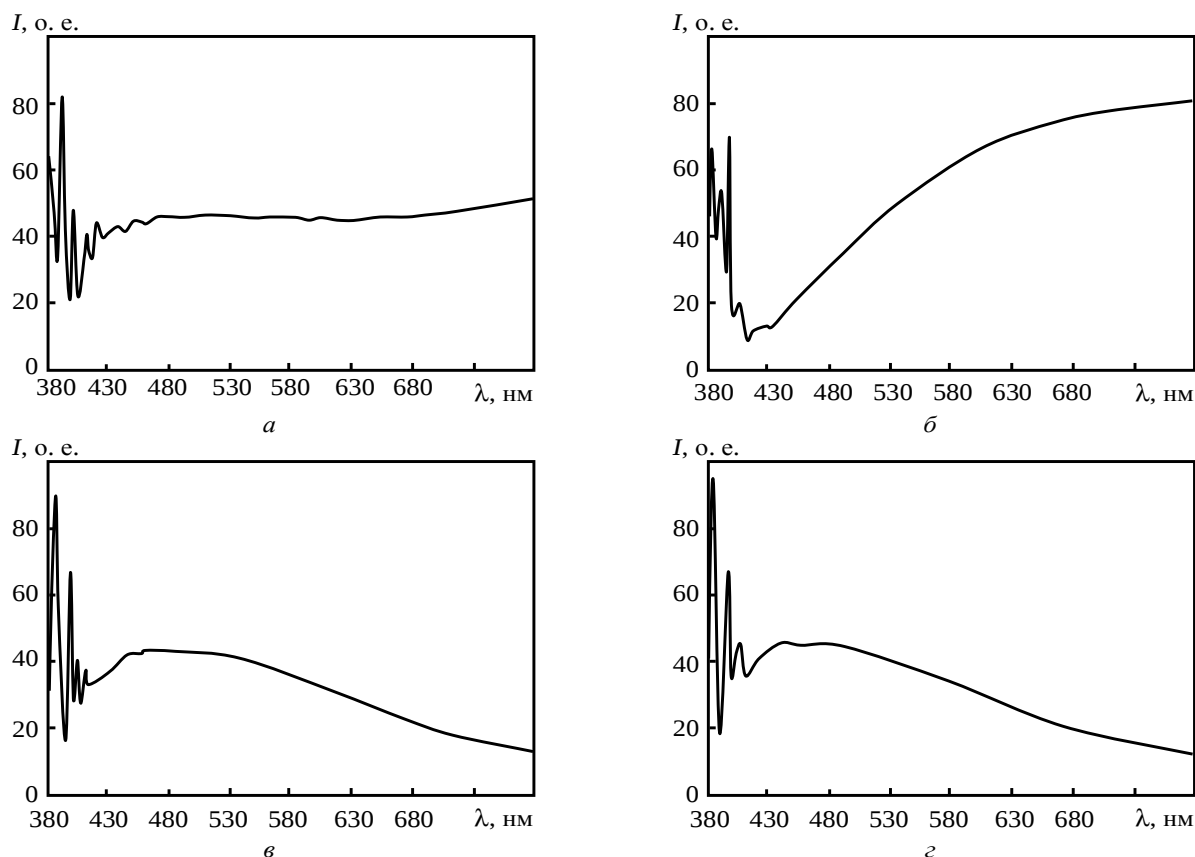


Рис. 5

При проведении экспериментов при условии нормировки по спектру эталона *A* в качестве источника света может быть применена галогенная лампа [7]. На рис. 5 приведены спектры отражения для четырех образцов зеркал: *а* – плоское белое зеркало из хрома с расчетным коэффициентом отражения 70.1 %; *б* – сферическое зеркало из нитрида титана желто-золотистого цвета (коэффициент отражения 54.5 %); *в* – голубое плоское зеркало из слоев титана и оксида титана (коэффициент отражения 43 %); *г* – голубое сферическое зеркало из слоев титана и оксида титана (коэффициент отражения 40.8 %).

На спектрах отражения всех образцов в диапазоне 380...430 нм проявляются шумы. Данный факт связан с недостатком интенсивности излучения галогенной лампы в данном диапазоне, поэтому для перекрытия неинформативной обла-

сти целесообразно применение дополнительного источника излучения. Самым удобным и дешевым вариантом может быть ультрафиолетовый диод [7]. Галогенная лампа хорошо перекрывает область 430...780 нм, ультрафиолетовый диод – 380...430 нм, поэтому для получения спектра во всем видимом диапазоне рационально совмещение обоих источников света.

Вычисленные по приведенной методике данные достаточно близки к результатам, полученным альтернативным способом в сертификационной лаборатории. В данной статье было рассмотрено определение спектрального коэффициента отражения зеркал и приведены экспериментальные данные, полученные по данной методике. Однако разработанные методика и аппаратура позволяют осуществлять комплексную задачу измерения спектральных характеристик стекол и зеркал.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кострин Д. К., Ухов А. А. Метод подбора близких по цветовым характеристикам белых светодиодов для систем освещения // Контроль. Диагностика. 2013. № 7. С. 47–50.
2. Кострин Д. К., Ухов А. А. Интерференция в поверхностном слое и метрологические параметры спектрометров с ПЗС-фотоприемниками // Датчики и системы. 2013. № 5. С. 13–15.
3. Кострин Д. К., Ухов А. А. Влияние изгибов оптоволоконного спектрометра на результаты колориметрических измерений // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. Вып. 1. С. 9–12.

4. Кострин Д. К., Ухов А. А. Светосигнальная характеристика ПЗС-фотоприемника в области больших световых потоков // Контроль. Диагностика. 2013. № 5. С. 40–42.

5. Кострин Д. К., Ухов А. А. Обнаружение и компенсация ложных спектральных линий в спектрометре с вогнутой дифракционной решеткой // Контроль. Диагностика. 2013. № 6. С. 26–28.

6. Ухов А. А., Кострин Д. К. Оптимизация системы регистрации многоканального оптического спектрометра // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. Вып. 4. С. 8–12.

7. Повышение точности и воспроизводимости результатов колориметрических измерений светоизлучающих диодов / Р. В. Юдин, Д. К. Кострин, Д. И. Шишов, А. А. Ухов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. Вып. 3. С. 8–13.

A. A. Uhov, V. A. Gerasimov, D. K. Kostrin

METHOD AND EQUIPMENT FOR DETERMINATION OF SPECTRAL CHARACTERISTICS OF GLASSES AND MIRRORS

Basic types of mirrors designs are considered. Their main spectral characteristics are given. Possibility of calculation of parameters of mirrors on spectrums of reflection and transmission, received by means of an optical spectrometer is shown. Experimental confirmation of efficiency of the developed calculation procedure is presented.

Automobile mirror, spectral characteristic, optical spectrometer



УДК 681.3

А. А. Демьянчук, Н. А. Молдовян, А. В. Рыжков

Выбор «идеальных» параметров в схеме двухшаговой аутентификации и коммутативном шифре

Предложены способы реализации алгоритмов коммутативного шифрования и двухшаговых протоколов с нулевым разглашением секрета со специальным выбором параметров криптосхем указанных типов. В случае коммутативных шифров достигается устранение слабых сообщений, которые могли бы быть использованы для выполнения атак на основе специально подобранных текстов, а в случае протоколов с нулевым разглашением достигается их упрощение.

Шифрование, коммутативное шифрование, протокол с нулевым разглашением, защита информации

Интересные для практических применений алгоритмы коммутативного шифрования (АКШ) основаны на вычислениях в конечных циклических группах достаточно большого порядка Ω [1], [2]. При этом предполагается, что шифруемые исходные сообщения m представляют собой битовые последовательности некоторой заданной длины. Секретный ключ формируется в виде двух чисел e и d , которые удовлетворяют условию $d = e^{-1} \bmod \Omega$. Шифрование сообщения m осуществляется кодированием его элементом группы, обозначаемым M , и вычислением криптограммы в виде элемента C группы по формуле $C = M^e$ (в случае мультипликативной группы) или по формуле $C = eM$ (в случае аддитивной группы). Расшифровка криптограммы C выполняется по формуле $M = C^d$ или $M = dC$ соответственно с последующим декодированием элемента группы M в сообщение m . В ряде важных для практики случаев АКШ используются в криптографических протоколах, в ходе которых возникают условия, когда потенциальный нарушитель знает исходное шифруемое значение и получаемую из него криптограмму и пытается вычислить секретный ключ. Стойкость АКШ обеспечивается вычислительной сложностью задачи дискретного логарифмирования (ЗДЛ) в используемой циклической конечной группе.

Для АКШ актуальным вопросом является обеспечение достаточно малой вероятности существования сообщений, имеющих малое значение

порядка или имеющих порядок, не содержащий ни одного большого простого делителя [2]. В алгоритмах коммутативного шифрования, основанных на трудности ЗДЛ в простом конечном поле $GF(p)$, эта проблема решается соответствующим выбором простого числа p . Для практического использования таких алгоритмов коммутативного шифрования этого достаточно. Однако теоретически идеальным случаем синтеза алгоритмов коммутативного шифрования над ЗДЛ является получение значения большого простого порядка для всех возможных значений шифруемых сообщений. При построении АКШ с использованием вычислений в поле $GF(p)$ принципиально невозможно получение большого значения порядка для всех возможных значений шифруемых сообщений. Это связано с тем, что в таких полях всегда присутствует элемент, имеющий порядок, равный двум.

В настоящей статье описывается задача синтеза «идеального» коммутативного шифра, основанного на трудности ЗДЛ. Для этого используются вычисления в конечном двоичном поле и вычисления на идеальной эллиптической кривой (ЭК). Описаны двухшаговые протоколы с нулевым разглашением секрета, основанные на применении схем открытого согласования ключей, и показано, что используемые «идеальные» параметры для АКШ при применении в указанных протоколах снижают вычислительную сложность шага, связанного с формированием ответа на запрос.

Под идеальным коммутативным шифром понимается такой АКШ, для которого все возможные сообщения имеют большой простой порядок, равный порядку используемой циклической группы. Использование групп с простым значением порядка связано с тем, что наличие сравнительно малых простых делителей порядка позволяет подобрать сообщения, по криптограмме которых можно получить существенную информацию о ключе, применяя для решения ЗДЛ способ, известный как метод больших и малых шагов [3].

Двоичные многочлены, заданные над полем $GF(2)$ и имеющие степень, не превышающую значение $s - 1$, образуют поле двоичных многочленов $GF(2^s)$ при задании операции умножения многочленов по модулю неприводимого двоичного многочлена $\eta(x)$ степени s . Известно, что мультипликативная группа любого конечного поля является циклической. В случае поля двоичных многочленов $GF(2^s)$ порядок мультипликативной группы равен $q = 2^s - 1$. Если выбрать такое значение s , что число q окажется простым, то все двоичные многочлены поля $GF(2^s)$ будут иметь порядок q .

Множество всех возможных значений шифруемых сообщений представляются ненулевыми битовыми цепочками длины s . При этом все сообщения будут иметь одинаковое значение порядка, равное $q = 2^s - 1$. При соответствующем выборе значения s порядок q будет достаточно большим и получение какой-либо информации о секретном ключе будет вычислительно невыполнимым при известных криптограммах, полученных шифрованием любых возможных исходных сообщений.

Коммутативное шифрование с использованием вычислений в поле $GF(2^s)$ осуществляется следующим образом. Генерируется случайный секретный ключ шифрования e ($e < q$). Затем вычисляется секретный ключ расшифровки $d = e^{-1} \bmod q$. Шифрование s -битовых сообщений $\mu(x)$ выполняется по формуле

$$c(x) = (\mu(x))^e \bmod \eta(x).$$

Расшифровка криптограммы, представляющей собой двоичный многочлен $c(x)$, осуществляется по формуле

$$\mu(x) = (c(x))^d \bmod \eta(x).$$

Рассматривая потенциальные атаки на основе известного или специально подобранного исход-

ного текста, легко заметить, что возникает ЗДЛ в конечном поле многочленов, причем порядок основания логарифма не зависит от сообщения и всегда равен q . Другими словами, сложность возникающей ЗДЛ не зависит от выбираемого сообщения. Это означает, что не существует «слабых» входных сообщений.

Дискретное логарифмирование в поле двоичных многочленов представляет собой вычислительно трудную задачу, если значение s удовлетворяет условию $s \geq 1024$ [2]. Возникает вопрос существования значений $s \geq 1024$, таких, что число $q = 2^s - 1$ является простым. Простые числа вида $2^s - 1$ известны как простые числа Мерсенна. Для следующих значений степени $s \geq 1024$ имеем простые значения q : 1279, 2203, 2281, 3217, 4253, 4423, 9689, 9941, 11 213, 19 937, 21 701, 23 209, ...*. Найдено еще много других значений $s \geq 44 497^*$, задающих простые числа Мерсенна, однако они в настоящее время представляют меньший интерес для использования в предложенном алгоритме коммутативного шифрования, поскольку при их применении уменьшается производительность процедуры коммутативного шифрования.

В криптографии используются ЭК, которые представляют собой конечные множества пар элементов (x, y) некоторого конечного поля F , удовлетворяющих уравнению третьей степени (уравнению ЭК) некоторого достаточно простого вида.

Важнейшим параметром ЭК является ее порядок $\#E$ – число точек на ЭК. Известны общие методы вычисления порядка кривой [5] по заданному полю $GF(p)$ и коэффициентам a и b . В частных случаях формирования ЭК ее порядок может быть вычислен по значениям p , a и b , используя известные достаточно простые формулы. Варианты ЭК, пригодные для построения криптосхем, с указанием значения их порядка приведены в стандарте [6].

Для некоторых ЭК порядок равен простому числу. Такие ЭК называются идеальными. Использование идеальных ЭК для построения коммутативных шифров – еще один способ построения идеальных АКШ.

Удобные и стойкие протоколы строгой аутентификации удаленных пользователей могут быть построены на основе использования схем открытого согласования ключей. Рассмотрим вариант реализации с использованием схемы Диффи–Хелл-

* <http://oeis.org/A000043>

мана, в которой системными параметрами являются большое простое число p и примитивный элемент α по модулю p . В этой схеме каждый пользователь выбирает случайный секретный ключ x и вычисляет открытый ключ y по формуле $y = \alpha^x \bmod p$.

Открытый ключ делается общеизвестным, и любой желающий имеет принципиальную возможность однозначно вычислить значение секретного ключа x , хотя эта возможность практически нереализуема, если число p имеет размер не менее 1024 бит, а число $p - 1$ содержит простой делитель q размером не менее 160 бит.

Протокол с нулевым разглашением секрета – это такой протокол, многократное выполнение которого не уменьшает сложность вычисления секретного ключа по открытому ключу. Протокол аутентификации удаленных пользователей с нулевым разглашением использует значение α , имеющее по модулю p порядок, равный q , и включает следующие 2 шага:

1. Проверяющий генерирует случайное число k и вычисляет значение своего разового открытого ключа $U = \alpha^k \bmod p$ и значение $Z = y^k \bmod p$, где y – открытый ключ доказывающего (пользователя, подлинность которого проверяется), после чего передает доказывающему значение U в качестве своего запроса, на который он ожидает ответ доказывающего.

2. Доказывающий вычисляет значение ω , которое является порядком числа U по модулю p . Если $\omega = q$, то он вычисляет значение $Z = U^x \bmod p$ и направляет Z проверяющему в качестве своего ответа на полученный запрос. Если ω не равно q , то доказывающий направляет ответ «Некорректный запрос».

Если проверяющий получил правильное значение Z , т. е. то значение, которое он вычислил до направления своего запроса доказывающему, то им делается вывод о подлинности доказывающего. Проверка на втором шаге порядка числа U является принципиальным моментом. Если эта проверка не делается, то становится возможна атака со стороны проверяющего, результатом которой будет вычисление части или всего секретного ключа доказывающего. Действительно, это можно сделать посылая в качестве запроса значения U , порядок которых содержит только небольшие простые делители числа $p - 1$.

Возможны различные варианты реализации описанного протокола с использованием задачи дискретного логарифмирования в скрытой циклической подгруппе конечной некоммутативной группы [7], [8] или на основе трудности задачи дискретного логарифмирования на ЭК. В последнем случае при применении идеальных ЭК обеспечивается существенное уменьшение вычислительной сложности второго шага протокола – для проверки корректности запроса достаточно проверить то, что запрос представляет собой точку ЭК $U = (x_U, y_U)$. Для последнего достаточно вычислить значение $w = (x_C^3 + ax_C + b) \bmod p$ и индекс Лежандра $\lambda = w/p$. Если $\lambda = 1$, то запрос корректен, в противном случае нет.

Наиболее простая реализация протокола связана с использованием вычислений в поле двоичных многочленов $GF(2^s)$, порядок мультипликативной группы которых q равен простому числу вида $2^s - 1$ (числа Мерсена). Числа такого вида являются простыми только при определенных значениях s . Практический интерес для реализации протокола с нулевым разглашением представляют, например, значения $s = 1279$ и 2203 .

Примерами неприводимых двоичных многочленов таких степеней являются трехчлены $\eta_1(x) = x^{1279} + x^{216} + 1$ и $\eta_2(x) = x^{1279} + x^{418} + 1$ [9], а также пятичлен $\eta_3(x) = x^{2203} + x^{14} + x^6 + x^5 + 1$. При выборе указанных трехчленов $\eta_1(x)$ и $\eta_2(x)$ в качестве модуля операция модульного умножения двоичных многочленов в поле $GF(2^{1279})$ может быть выполнена с помощью одной операции арифметического умножения многочленов, двух операций арифметического сдвига и шести операций сложения. Выполнять операцию деления многочленов не требуется, что существенно снижает сложность вычислений в поле $GF(2^{1279})$ и повышает быстродействие протокола аутентификации. В поле $GF(2^{2203})$ операция умножения может быть задана по модулю неприводимого пятичлена $\eta_3(x)$. В этом случае умножение в поле $GF(2^{2203})$ можно выполнить также без осуществления операции деления многочленов, так как оно реализуется с помощью одной операции арифметического умножения многочленов, шести операций арифметического сдвига и десяти операций сложения.

В двухшаговом протоколе аутентификации на основе трудности ЗДЛ в поле $GF(2^{1279})$ открытый ключ формируется по формуле $y(x) = (\alpha(x))^k \bmod \eta_1(x)$, где k – секретный ключ; $\alpha(x)$ – некоторый специфицированный многочлен, а протокол описывается следующими шагами:

1. Проверяющий генерирует случайное число t и вычисляет запрос в виде многочлена $u(x) = (\alpha(x))^t \bmod \eta_1(x)$ и многочлен $z(x) = (y(x))^t \bmod \eta_1(x)$, после чего пересылает доказывающему двоичный многочлен $u(x)$ в качестве своего запроса.

2. Доказывающий вычисляет двоичный многочлен $z'(x) = (u(x))^k \bmod \eta_1(x)$ и направляет $z'(x)$ проверяющему в качестве ответа.

Если $z'(x) = z(x)$, то проверяющий делает вывод о подлинности доказывающего. В этом варианте протокола нет необходимости выполнять проверку корректности запроса, поскольку любая ненулевая битовая строка, интерпретируемая как элемент поля $GF(2^{1279})$, имеет порядок, равный простому числу $2^{1279} - 1$, т. е. никакие запросы со стороны проверяющего не могут быть им использованы для получения хотя бы одного бита информации о ключе.

Предложенный идеальный алгоритм коммутативного шифрования, основанный на трудности ЗДЛ в двоичных полях $GF(2^s)$, представляет практический интерес благодаря тому, что операция умножения в двоичном поле многочленом выполняется достаточно эффективно аппаратными и программными средствами при выборе неприводимых двоичных многочленов с малым числом

ненулевых коэффициентов. В алгоритме реализуется идеальная ситуация, характеризующаяся тем, что все возможные входные сообщения имеют одно и то же значение простого порядка большого размера, однако существует ограниченное число значений степени расширения двоичного поля $GF(2^s)$, при которых мультипликативная группа поля имеет простой порядок. В настоящее время представляют интерес для практической реализации разработанного алгоритма следующие 6 значений s : 1279, 2203, 2281, 3217, 4253, 4423, поскольку при их использовании достигается приемлемый компромисс между стойкостью и производительностью. Несмотря на ограниченный выбор значений s , большое разнообразие конкретных вариантов предложенного алгоритма коммутативного шифрования достигается возможностью выбора большого числа различных неприводимых двоичных многочленов $\eta(x)$.

Другим способом реализации идеального коммутативного шифра является его построение с использованием вычислений на ЭК простого порядка. Данный способ также представляет большое разнообразие вариантов построения идеальных АКШ.

В предложенном протоколе аутентификации удаленных пользователей с нулевым разглашением важна проверка корректности запроса проверяющего. Для упрощения этой проверки можно использовать идеальные ЭК, а полностью исключить ее удастся при построении двухшагового протокола аутентификации с использованием вычислений в двоичных полях, порядок мультипликативной группы которых является достаточно большим простым числом Мерсенна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. США № 4424414 / М. Е. Hellman, S. C. Pohlig. Exponentiation cryptographic apparatus and method. 1984.
2. Повышение производительности процедур коммутативного шифрования / П. А. Молдовяну, Д. Н. Молдовян, Е. В. Морозова, С. В. Пилькевич // *Вопр. защиты информации*. 2009. № 4. С. 24–31.
3. Menezes A. J., Vanstone S. A. Handbook of Applied Cryptography. CRC Press, 1996.
4. Dewaghe L. Remarks on the Schoof-Elkies-Atkin algorithm // *Mathematics of Computation of the American Mathematical Society*. 1998. Т. 67, № 223. С. 1247–1252.
5. FIPS P. U. B. 186-2. Digital Signature Standard (DSS) // *National Institute of Standards and Technology (NIST)*. 2000.

6. Молдовян Д. Н. Прimitивы криптосистем с открытым ключом: конечные некоммутативные группы с четырехмерных векторов // *Информационно-управляющие системы*. 2010. № 5. С. 43–50.
7. Moldovyan D. N. Non-commutative finite groups as primitive of public key cryptosystems // *Quasigroups Relat. Syst.* 2010. Т. 18, № 2. С. 165–176.
8. Болотов А. А., Гашков С. Б., Фролов А. Б. Элементарное введение в эллиптическую криптографию. Протоколы криптографии на эллиптических кривых. М.: КомКнига, 2006.

A. A. Demyanchuk, N. A. Moldovyan, A. V. Ryzhkov

CHOOSING IDEAL PARAMETERS FOR ZERO-KNOWLEDGE AUTHENTICATION PROTOCOLS AND COMMUTATIVE CIPHERS

It has been proposed a method for commutative encryption and zero-knowledge two-step protocols with a special choice of parameters for this cryptoschemes. Advantage of the method is eliminating weak messages in case of commutative encryption and simplification of zero-knowledge protocols.

Encryption, commutative encryption, zero-knowledge protocol, information security

УДК: 20.53.19, 28.23.13

М. С. Куприянов, И. И. Холод, З. А. Каршиев

Метод построения параллельных алгоритмов интеллектуального анализа данных из потоконеависимых функциональных блоков

Описывается метод построения параллельных алгоритмов интеллектуального анализа данных, опирающийся на представление алгоритма в виде иерархии вложенных функциональных потокобезопасных блоков.

Интеллектуальный анализ данных, параллельные алгоритмы, интеллектуальный анализ распределенных данных

В соответствии с формальной моделью [1] алгоритм интеллектуального анализа данных (ИАД) можно декомпозировать на отдельные потокобезопасные функциональные блоки. Каждый блок должен получать на вход обрабатываемые данные, настройки алгоритма и созданную на предыдущих этапах модель знаний. При этом реализуется следующий принцип: данные и настройки не подлежат изменению – меняться может только модель знаний. Изменение модели знаний можно рассматривать как создание внутри блока новой модели знаний на основе переданных в него параметров: набора данных, настройки алгоритма и исходной модели знаний. Таким образом, каждый блок является «монолитным» с точки зрения основного алгоритма. По сути, он представляет собой мини-алгоритм.

Функциональные блоки являются потоко безопасными, если в процессе выполнения своих вычислений не модифицируют значения глобальных переменных. Для достижения этого требования при разбиении алгоритма на блоки необходимо соблюдать следующие правила:

- каждый блок может представлять собой или некоторую операцию, выполняемую над моделью, или некоторый структурный элемент, характерный для алгоритма ИАД;
- блок, реализующий некоторую операцию, должен изменять модель знаний, поданную на вход таким образом, чтобы она оставалась целостной (т. е. должны выполняться все ограничения, накладываемые на модель);
- внутри функционального блока не должно происходить обращений к внешним переменным, вся работа должна выполняться на основании набора данных, настроек и исходной модели знаний, переданных в функциональный блок.

Функциональный блок может содержать как исполняемый код (неразделимую операцию), так и последовательность других функциональных блоков. В общем случае блок может содержать не одну последовательность.

В результате алгоритм ИАД можно представить как иерархию вложенных функциональных потокобезопасных блоков (рис. 1). Сам алгоритм, являющийся корневым функциональным блоком

в данной структуре, также обладает свойством потокобезопасности.

Свойство потокобезопасности функциональных блоков позволяет выполнять их параллельно. По сути, алгоритмы, состоящие из таких потокобезопасных функциональных блоков, можно распараллеливать (распределять функциональные блоки по параллельным потокам) автоматически, подбирая параллельную структуру с лучшими характеристиками.

Блок решения содержит проверяемое условие и две последовательности блоков. По результатам проверки условия выполняется та или иная вложенная последовательность блоков.

Как уже отмечалось, одним из основных преимуществ разделения алгоритма ИАД на потоко-независимые функциональные блоки является возможность их параллельного выполнения. Для этих целей должны быть добавлены функциональные блоки, обеспечивающие распараллели-

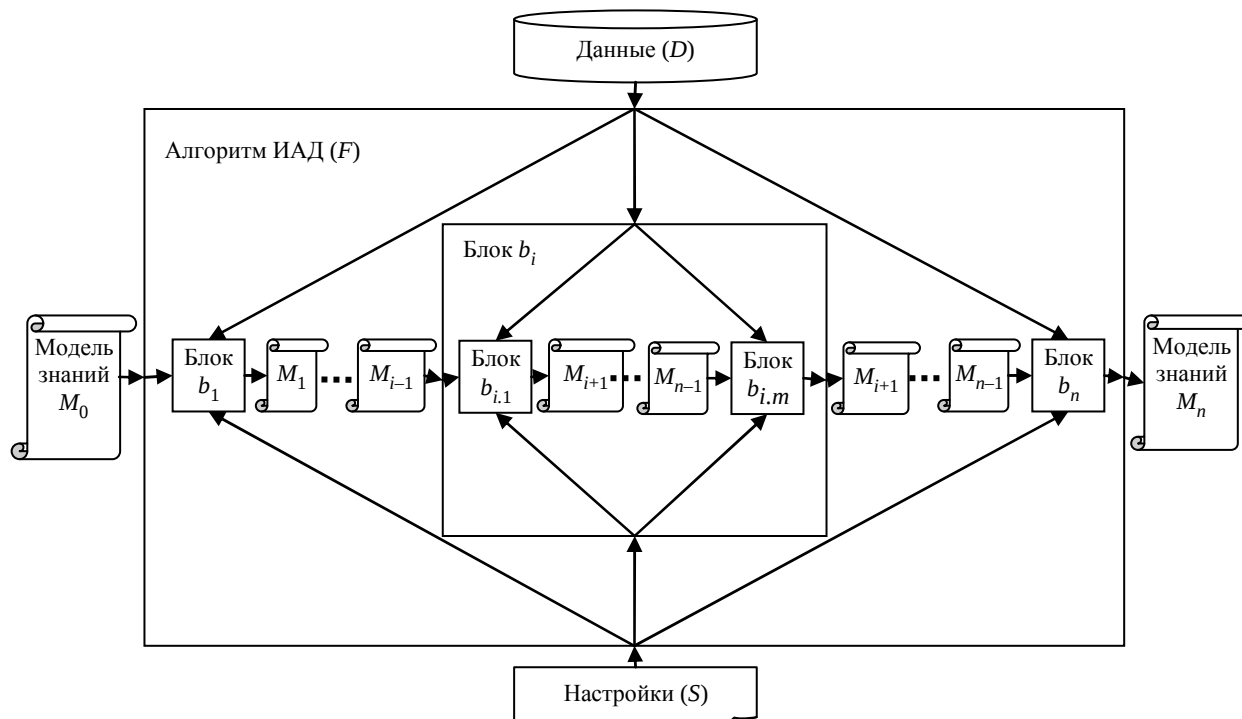


Рис. 1

Рассмотрим функциональные блоки, из которых могут состоять алгоритмы ИАД.

Линейный блок выполняет некоторую операцию над моделью знаний: добавление, удаление или изменение ее элементов. Не содержит вложенных блоков.

Блок цикла содержит вложенную последовательность блоков и определяет операции, выполняемые при инициализации цикла, до и после выполнения каждой итерации, а также условие выхода из цикла. В программной реализации данные функции должны выполняться в следующем порядке:

- 1) инициализация цикла;
- 2) проверка условия выхода из цикла;
- 3) функция, выполняемая перед итерацией;
- 4) выполнение вложенной последовательности блоков;
- 5) функция, выполняемая после итерации.

вание алгоритмов ИАД. Рассмотрим, какие блоки необходимы для реализации различных видов параллельного выполнения.

Параллельный блок может содержать одну или больше последовательностей блоков. В случае параллелизации по данным он содержит одну последовательность блоков, которая должна клонироваться на несколько параллельных обработчиков. В случае параллелизации по задачам он содержит несколько последовательностей блоков (по одной на каждую ветвь алгоритма). Кроме того, данный блок может содержать вложенную последовательность блоков для диспетчеризации параллельных блоков. Унифицированный интерфейс данного блока должен описывать выполнение операций: разделения на потоки (split) и объединения (join). При этом порядок выполнения должен быть следующий:

- 1) выполнение операции разделения на параллельные блоки (split);
- 2) запуск блока диспетчера (если он есть);
- 3) запуск параллельных блоков;
- 4) выполнение операции объединения (join).

Блок-отправитель включает в себя вложенный блок, выполняющий подготовку данных для их отправки в другие, параллельно выполняющиеся параллельные блоки. Унифицированный интерфейс должен описывать операцию отправки данных. Последовательность выполнения должна быть следующая:

- выполнение вложенного блока;
- выполнение операции отправки.

Блок-получатель включает в себя вложенный блок, выполняющий обработку данных после их получения от других параллельно выполняющихся блоков. Унифицированный интерфейс должен описывать операцию получения данных. Последовательность выполнения должна быть следующая:

- выполнение операции получения;
- выполнение вложенного блока.

При декомпозиции алгоритма ИАД в иерархическую структуру потокобезопасных функциональных блоков, представленную на рис. 1, необходимо выполнить следующие действия:

- 1) декомпонировать алгоритм ИАД на элементарные операции;
- 2) сгруппировать в функциональные блоки действия, выполняющие дискретное изменение модели знаний;
- 3) выделить структурные элементы и вложенные в них последовательности функциональных блоков;
- 4) добавить в структуру функциональные блоки для параллельного выполнения.

На первом шаге структура алгоритма должна быть декомпонирована на элементарные операции, выполняющиеся над моделью знаний: добавление, удаление и изменение отдельных элементов модели знаний. При этом в структуре алгоритма должны быть явно выделены основные управляющие операторы: циклы, условные переходы и др. Декомпозиция должна выполняться с учетом следующих условий:

- после выполнения каждой операции сохраняется целостность модели знаний;

– количество переменных, используемых различными операциями, должно быть минимизировано и локализовано (переменные должны использоваться только для следующих друг за другом операций).

При выполнении декомпозиции крайними случаями являются:

– монолитный алгоритм – когда декомпонировать алгоритм ИАД на составные потокобезопасные функциональные блоки не удалось и алгоритм представляется одним потокобезопасным функциональным блоком;

– слабосвязанный алгоритм – когда каждую операцию алгоритма можно представить отдельным потокобезопасным функциональным блоком.

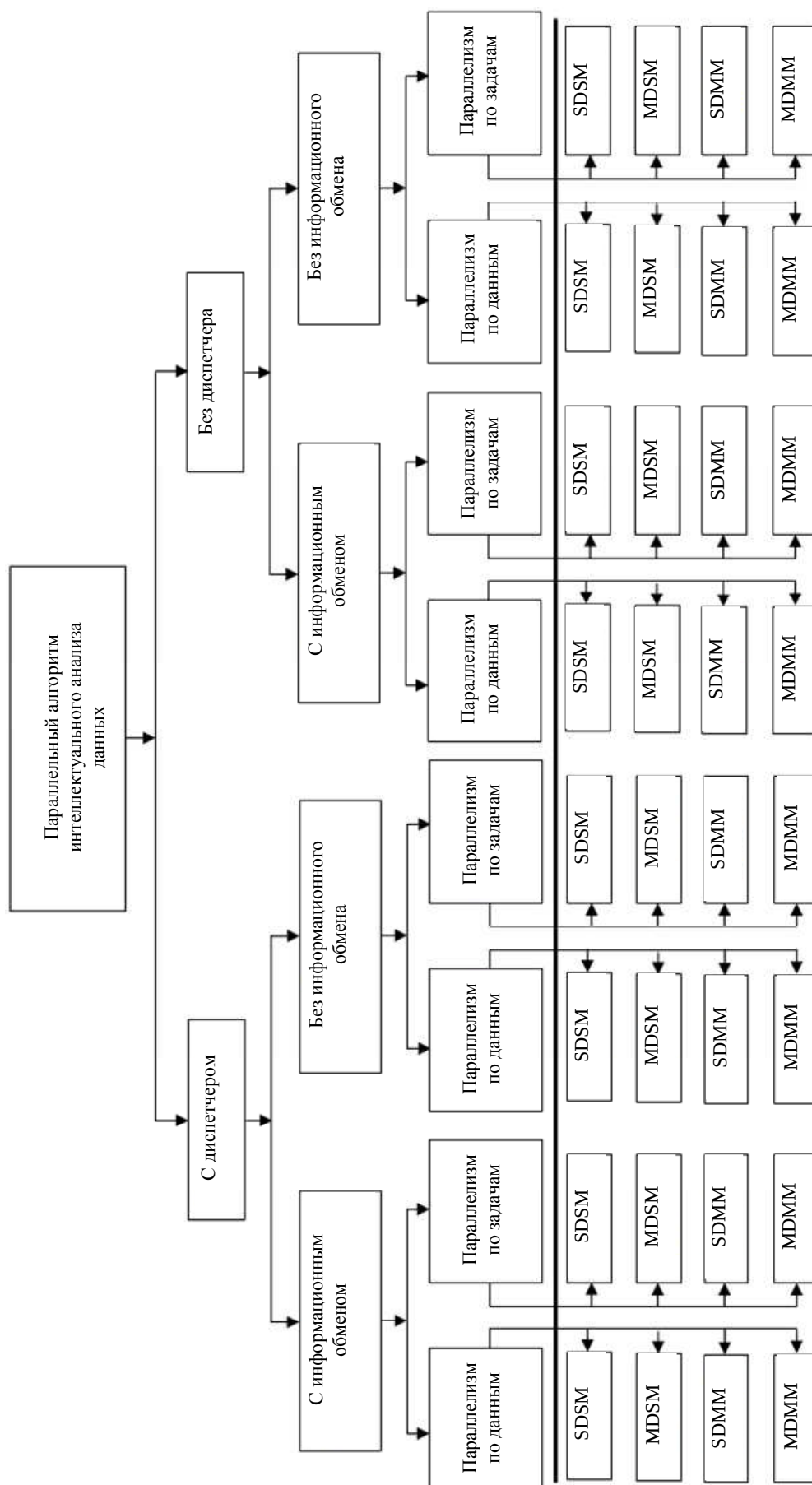
На данном шаге допускается наличие элементарных операций, не изменяющих модель знаний.

На втором шаге действия группируются в функциональные блоки, выполняющие дискретное изменение модели знаний. Группировка должна выполняться исходя из набора правил:

1. В функциональный блок группируются операции, связанные между собой общими локальными переменными. Базовыми в таких блоках являются операции, изменяющие состояние модели знаний, к которым добавляются предшествующие и/или последующие операции, не меняющие модель. Группировка операций, не меняющих модель, со смежными базовыми операциями выполняется исходя из их логической принадлежности к ним. Признаком такой логической связи может служить использование промежуточных (локальных) переменных. Такие переменные должны быть локализованы внутри создаваемого функционального блока.

2. Выделяемый функциональный блок должен целиком входить в управляющий оператор (условие, цикл и др.). Например, в одном функциональном блоке не должно быть операций, выполняющихся как в цикле, так и вне цикла.

На третьем шаге формируются структурные блоки. Управляющие операторы (циклы, условные переходы и т. п.) не изменяют состояния модели, однако они должны быть выделены в отдельные функциональные блоки. В них должны быть включены функциональные блоки, операции которых выполняются внутри управляющих операторов.



Puc. 2

На последнем шаге для построения параллельного алгоритма ИАД в полученную структуру могут быть введены структурные блоки, обеспечивающие параллельное выполнение:

- параллельный блок;
- блок-отправитель;
- блок-получатель.

Учитывая свойство потокобезопасности полученных функциональных блоков, параллельный блок может быть добавлен в любое место иерархии. При этом должны быть определены функциональные блоки, входящие в параллельный блок как вложенная последовательность. Основным условием такого вхождения является то, что все функциональные блоки, входящие в параллельный блок, должны относиться к одному уровню иерархии.

Параллельный блок может включать в себя и функциональные блоки самого верхнего уровня иерархии, т. е. в этом случае параллельно будет выполняться весь алгоритм. При этом блоки, находящиеся под ним, будут вложены в параллельный блок.

Блоки отправителя и получателя должны добавляться совместно в параллельные последовательности функциональных блоков, вложенных в параллельный блок, если требуется обмен информацией между этими последовательностями.

Типы структур параллельных алгоритмов ИАД, которые можно построить предложенным методом, классифицированы как показано на рис. 2 [2]. При этом способы параллелизации верхнего уровня связаны со структурными изменениями алгоритмов – перемещением параллельных блоков в структуре функциональных блоков алгоритмов ИАД. Типы параллелизации нижнего уровня можно изменить за счет настройки алгоритмов ИАД.

Таким образом, описанный метод построения параллельных алгоритмов ИАД позволяет получить различные типы параллельных структур алгоритмов ИАД [2]:

- с параллелизацией по задачам/по данным;
- с/без взаимодействия между параллельными ветвями для систем с распределенной памятью;
- с/без диспетчера.

Для построения алгоритма ИАД с диспетчером необходимо выделить в соответствующую последовательность параллельного блока или существующие функциональные блоки алгоритма, или добавить новые функциональные блоки, решающие задачи диспетчеризации. При отсутствии диспетчерской последовательности функциональных блоков в параллельном блоке будет получен параллельный алгоритм без диспетчера.

При формировании в параллельном блоке последовательностей функциональных блоков из одинаковых блоков (клонирование блоков) и разделения между ними набора данных будет получена параллельная структура алгоритма ИАД с параллелизацией по данным. Если последовательности параллельного блока будут содержать разные функциональные блоки, обрабатывающие одни и те же данные, будет получена структура с параллелизацией по задачам.

Структуры параллельных алгоритмов ИАД с взаимодействием и без могут быть получены соответственно добавлением или нет функциональных блоков отправителя и получателя.

Данная статья и проведенная научная работа поддержаны в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (контракт 14.B37.21.0589).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куприянов М. С., Каршиев З. А. Формальная модель выполнения алгоритмов интеллектуального анализа // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2012. Вып. 9. С. 60–68.
2. Холод И. И., Каршиев З. А. Методика распараллеливания алгоритмов интеллектуального анализа данных // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. Вып. 3. С. 38–45.

M. S. Kupriyanov, I. I. Kholod, Z. A. Karshiyev

METHOD OF CREATING PARALLEL ALGORITHMS OF INTELLECTUAL ANALYSIS OF DATA USING FLOW-INDEPENDENT FUNCTIONAL BLOCKS

The paper describes a new method of creating parallel algorithms of intellectual analysis of data. The method is based on representing the algorithm using the hierarchy of embedded functional flow-safe blocks.

Intellectual analysis of data, parallel algorithms, intellectual analysis of distributed data

УДК 681.3

Я. А. Мондикова, М. А. Вайчикаускас

Криптосхемы над задачей дискретного логарифмирования по трудноразложимому модулю

Предложен механизм построения новых криптосхем на основе трудности одновременного решения двух вычислительно-сложных задач. Представлены алгоритмы открытого шифрования, основанные на задаче дискретного логарифмирования по трудноразложимому модулю.

Криптографические протоколы, трудная задача, задача дискретного логарифмирования, вычислительно - трудная задача, задача факторизации

Криптографические методы защиты информации постоянно развиваются и совершенствуются, появляются новые криптографические примитивы, более стойкие, а потому более надежные. Однако стоит отметить, что в настоящее время безопасность большинства криптографических систем базируется на решении некоторой вычислительно-трудной задачи [1] (под вычислительно-трудной задачей понимается задача, которая имеет решение, однако его нахождение связано с большими вычислительными ресурсами и временными затратами). Это связано с текущим состоянием теории вычислительной сложности. Следует отметить, что не доказано, что не существует эффективных способов решить ту или иную сложную задачу. Таким образом, можно утверждать, что безопасность криптосистемы также базируется на малой вероятности того, что будут разработаны такие способы. Но не стоит забывать о бурных темпах развития компьютерной техники и технологий. Существует вероятность того, что теоретические достижения могут снизить уровень безопасности систем ниже критического.

Понятие безопасности криптографических алгоритмов и протоколов отражает следующие 2 факта: 1) известные алгоритмы их взлома вычислительно нереализуемы и 2) вероятность появления в обозримом будущем прорывных подходов к их взлому является пренебрежимо малой. Обычно двухключевые криптосхемы построены на одной вычислительно трудной задаче, способы решения которой задают уровень стойкости (число операций некоторого типа, которые требуется выполнить для взлома криптосхемы). Понятие стойкости относится к первому факту, а ее повы-

шение обеспечивается увеличением размера параметров криптосхемы. Однако это не затрагивает второй факт, т. е. при появлении прорывного алгоритма взлома криптосистемы увеличение размера параметров не предотвратит критического снижения стойкости. Для увеличения безопасности криптосхем путем снижения вероятности их взлома за счет появления прорывных решений трудных задач был предложен подход к использованию трудности одновременного решения двух независимых трудных задач. В рамках данного подхода криптосхема разрабатывается таким образом, что ее взлом требует одновременного решения двух трудных задач. При этом значение стойкости криптосхемы увеличивается несущественно, но уровень безопасности увеличивается значительно за счет существенно более низкой вероятности одновременного появления прорывных решений двух независимых трудных задач. В качестве последних обосновано использование задачи дискретного логарифмирования (ЗДЛ) и задачи факторизации (ЗФ) [2].

В данной статье развивается подход к построению криптосхем, основанных на сложности ЗДЛ по трудноразложимому модулю, и показывается, что их взлом требует одновременного решения ЗФ и ЗДЛ по простому модулю. При этом обеспечивается универсальность построения, а именно, все типы криптосхем, разработанные ранее на основе трудности ЗДЛ по простому модулю, могут быть естественным способом преобразованы в схемы, взлом которых требует одновременного решения ЗДЛ и ЗФ по простому модулю.

Предлагаемый подход состоит в модифицировании известных криптосхем с открытым ключом, основанных на сложности ЗДЛ в конечном простом поле, заменой последней задачи на ЗДЛ в конечном кольце вычетов по составному модулю $n = rq$, равному произведению двух простых чисел r и q . Размер числа r равен 1024 бит, а размер числа q – 512 бит. Известные криптосхемы на основе ЗДЛ реализуются над кольцом вычетов по модулю p размером 1024 бит. Переход от простого модуля к составному означает, что в модифицированных криптосхемах используется трудность ЗДЛ по составному модулю. Последняя задача принципиально отличается от ЗДЛ по простому модулю. Для решения ЗДЛ по составному модулю могут быть применены общие методы дискретного логарифмирования [1], имеющие экспоненциальную сложность, или метод сведения к ЗДЛ по простому модулю, имеющий субэкспоненциальную сложность и включающий факторизацию составного модуля и использование китайской теоремы об остатках [2]. Можно также показать, что алгоритм вычисления дискретного логарифма по составному модулю n может быть использован для факторизации числа n . Кроме того алгоритм решения ЗДЛ по составному модулю n может быть использован для решения ЗДЛ и ЗФ по простому модулю. Это подтверждает принципиальное различие ЗДЛ по простому и составному модулям.

При нахождении прорывных решений ЗФ решение ЗДЛ по составному модулю n все еще будет требовать решения ЗДЛ по простым модулям q и r . Так как размер числа r в 2 раза больше размера q , то основной вклад в трудоемкость дискретного логарифмирования в рассматриваемом случае будет вносить ЗДЛ по простому модулю r . При 1024-битовом размере числа r трудоемкость ЗДЛ по простому модулю r равна 280 операциям модульного умножения. Это обеспечит 80-битовую стойкость криптосхем, основанных на трудности ЗДЛ по модулю n , даже в случае появления прорывных алгоритмов факторизации. Если будут найдены прорывные решения ЗДЛ по простому модулю, то эти методы смогут быть применены для взлома предлагаемых криптосхем только после решения ЗФ модуля n . Таким образом, для взлома предлагаемых криптосхем потребуется решить как ЗФ, так и ЗДЛ по большому простому модулю r .

В криптосхемах, создаваемых в рамках предложенного подхода, используется открытый ключ,

представляемый тройкой чисел $\{n, \alpha, y\}$, где y вычисляется по следующей формуле:

$$y = \alpha^x \pmod{n}. \quad (1)$$

Личным секретным ключом пользователя является тройка чисел (r, q, x) , где $n = rq$, r – простое 1024-битовое число, q – простое 512-битовое число, x – случайное число, $x < \gamma$, где γ – порядок числа α по модулю n . При этом числа r , q и α не должны удовлетворять одному из следующих двух требований для обеспечения сложности задачи факторизации:

1. Простые числа r и q имеют следующую структуру: $r = N_r \gamma + 1$, $q = N_q \gamma + 1$, где N_r и N_q – 2 больших четных числа, содержащих большой простой делитель. Параметр γ имеет размер не менее 160 бит и не является секретным.

2. Простые числа r и q представляются в виде $r = N_r \gamma' + 1$ и $q = N_q \gamma' + 1$, где N_r и N_q – 2 больших четных числа, содержащих большой простой делитель. Значение порядка числа α равно $\gamma = \gamma' \gamma''$. Каждое из чисел γ' и γ'' имеет размер не менее 80 бит, а параметр γ является дополнительным элементом секретного ключа.

Рассмотрим модифицированную схему распределения ключей.

В данной криптосхеме каждый абонент выбирает случайный секретный ключ x и вырабатывает открытый ключ y в соответствии с формулой (1).

Все абоненты размещают свои открытые ключи в общедоступном справочнике, который должен быть заверен специально созданным доверительным центром [3], чтобы исключить возможные нападения путем подмены открытых ключей или навязывания ложных открытых ключей.

Если 2 абонента A и B хотят установить секретную связь, то они поступают следующим образом. Абонент A берет из справочника открытый ключ абонента B и, используя свой секретный ключ, вычисляет общий секретный ключ:

$$Z_{AB} = (y_B)^{x_A} = (a^{x_B})^{x_A} = a^{x_B x_A} \pmod{n},$$

где y_B – открытый ключ абонента B ; x_A и x_B – соответствующие секретные ключи.

Абонент B аналогичным способом вычисляет значение Z_{AB} :

$$Z_{AB} = (y_A)^{x_B} = (a^{x_A})^{x_B} = a^{x_A x_B} \pmod{n},$$

где y_A – открытый ключ абонента A .

Рассмотрим второй вариант модифицированной схемы Диффи–Хеллмана [1], [2]:

1. Абонент A генерирует модуль n и случайный секретный ключ x_A , вырабатывает открытый ключ $y_A : y_A = \alpha^{x_A} \pmod{n}$.

2. Абонент B генерирует модуль n и случайный секретный ключ x_B , вырабатывает открытый ключ $y_B : y_B = \alpha^{x_B} \pmod{n}$.

3. Абоненты размещают свои открытые ключи в общедоступном справочнике.

4. Абонент A генерирует вспомогательный ОК по открытым элементам a_B , n_B абонента B :

$R_A = \alpha_B^{x_A} \pmod{n_B}$ и первый вспомогательный общий секрет: $Z_A = y_B^{x_A} \pmod{n}$.

5. Абонент A отправляет значение R_A абоненту B .

6. Абонент B генерирует вспомогательный ОК по открытым элементам a_A , n_A абонента A :

$R_B = \alpha_A^{x_B} \pmod{n_A}$ и вспомогательный общий секрет: $Z_B = y_A^{x_B} \pmod{n}$.

7. Абонент B отправляет значение R_B абоненту A .

8. Пользователь A вычисляет общий секрет по формуле $Z_{\text{общ}} = Z_A[(R_B)^{x_A} \pmod{n_A}]$.

9. Пользователь B вычисляет общий секрет по формуле $Z_{\text{общ}} = Z_B[(R_A)^{x_B} \pmod{n_B}]$.

Рассмотрим модифицированный алгоритм открытого шифрования Эль-Гамала [4]. В данной криптосхеме выбор параметров для вычисления открытого ключа u происходит по аналогии модифицированной схемы открытого распределения ключей Диффи–Хеллмана.

Каждый пользователь сети выбирает секретный ключ x ; вычисляет открытый ключ по формуле (1); помещает u в заверенный справочник. Шифрование сообщения T , отправляемого пользователю i :

1. Выбрать случайное число k , которое является секретным ключом отправителя.

2. Вычислить $R = \alpha^k \pmod{n}$ – разовый открытый ключ отправителя.

3. Используя открытый ключ получателя, вычислить $C = y^k T \pmod{n}$.

4. Отправить блок шифротекста (R, C) получателю i .

Расшифровка:

1. Вычислить значение $Z = R^x \pmod{n}$, которое по своей сути является разовым общим секретом (Z_{AB}) получателя и отправителя.

2. Вычислить значение $Z^{-1} = (R^x)^{-1} \pmod{n}$.

3. Расшифровать криптограмму C : $T = CZ^{-1} \pmod{n}$.

Таким образом, в данной статье описаны разработанные авторами алгоритмы открытого распределения ключей, взлом которых требует решения вычислительно-трудной задачи факторизации и задачи дискретного логарифмирования. К основным достоинствам данных схем можно отнести повышение стойкости схемы к взлому и уменьшение вероятности появления в обозримом будущем прорывных решений сразу двух трудных задач, положенных в основу данного алгоритма.

Также разработан алгоритм открытого шифрования, взлом которого требует решения вычислительно-трудной задачи факторизации и задачи дискретного логарифмирования. К основным достоинствам данной схемы можно отнести повышение стойкости схемы к взлому и уменьшение вероятности появления в обозримом будущем прорывных решений сразу двух трудных задач, положенных в основу данного алгоритма. Среди недостатков разработанного алгоритма самым существенным является увеличившееся количество операций, требуемых для выработки трудноразложимого модуля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Молдовян Н. А. Теоретический минимум и алгоритмы цифровой подписи. СПб.: БХВ-Петербург, 2010.
2. Молдовян Н. А., Молдовян А. А. Введение в криптосистемы с открытым ключом. СПб.: БХВ-Петербург, 2005.

3. Основы криптографии / А. П. Алферов, А. Ю. Зубов, А. С. Кузьмин, А. В. Черемушкин. М.: Гелиос АРВ, 2002.
4. Дернова Е. С., Молдовян Н. А., Молдовян Д. Н. Криптографические протоколы. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010.

I. A. Mondikova, M. A. Vaichikauskas

CRYPTO SCHEMES BASED ON DIFFICULT DISCRETE LOGARITHM TASK

It is proposed algorithms and protocols, cracking of which is required solving two hard computational tasks simultaneously: discrete logarithm task and factorization task. In compare of existing schemes, which could be cracked by solving one hard computational task, these schemes provide higher level of security, because of requirement of solving two hard computational tasks of different types simultaneously.

Cryptographic protocols, hard task, discrete logarithm task, hard computational (mathematical) task, factorization task

УДК 681.5

Б. Я. Советов, В. В. Цехановский, В. Д. Чертовской, Р. А. Нечитайленко

Формирование математического описания многоуровневой адаптивной автоматизированной системы управления производством на стадии планирования

Рассмотрены требования к методам описания трехуровневых адаптивных автоматизированных систем управления производством (ААСУП). Проведен анализ локальных методов описания, предложены глобальные математические методы исследования ААСУП.

Адаптивное управление, анализ методов, выбор методов, формирование, глобальное описание, планирование, требования к методам

Адаптивные автоматизированные системы управления производством начали развиваться как новый класс систем на рубеже столетий [1]. Особый интерес к таким системам проявляется после перехода России к рыночным отношениям. Вместе с тем этот класс адаптивных систем является специфическим, и для его формального системного описания не подходят существующие теоретические методы ни автоматизированного, ни автоматического управления. Потребовалось сформировать новые методы на основе исследования известных методов. Такая процедура потребовала применения системного анализа к изучению адаптивных систем, включающего процедуры определения системной цели функционирования, структуры и ее функционального наполнения.

Первые две процедуры рассмотрены в публикации [2], продолжением которой является настоящая статья.

Постановка задачи. Провести системное функциональное наполнение трехуровневой структуры [2] адаптивной системы. Для этого необходимо сформулировать требования к математическому описанию, провести анализ известных методов и построить новый метод, пригодный для исследования адаптивных систем.

Решение задачи. Особенности воздействия среды и автоматизированного управления проявили специфические и порой жесткие требования к методам математического описания процессов:

1. Достаточная адекватность описания процессов, происходящих в реальной системе.
2. Учет многоуровневого характера структуры систем с изменением масштабов описания по времени и координатам.
3. Системность и наглядность метода математического описания и простота алгоритма приложения.

4. Интеграция процессов функционирования и адаптации с элементами интеллекта.

5. Поддержание оптимальных режимов работы с помощью компьютерной техники.

6. Системное описание процессов оптимального планирования и управления с учетом линейных ограничений.

7. Однородность (однотипность) системного описания процессов оптимального планирования и управления.

8. Согласование (векторных) экономических интересов и координация темпов работы целенаправленных элементов, что позволяет увеличить эффективность работы системы управления.

9. Малое время расчетов и возможность работы в реальном масштабе времени.

10. Совместная оценка экономических свойств (через экономический интерес) и управленческих свойств.

11. Учет неопределенности в получении данных при идентификации управляющей части системы.

12. Учет значительной доли неформальных процедур. При формировании описания возникает много неоднозначностей, которые приходится исследовать дополнительно.

В формировании математического описания адаптивной системы можно выделить следующие этапы:

1. Описание отдельного элемента без учета специфики уровней структуры.

2. Описание отдельного элемента с учетом специфики уровней.

3. Описание взаимодействия элементов.

Два последних этапа составляют методы системного (глобального) описания процессов в системе. Здесь ограничимся первым этапом.

Необходимо, следовательно, определить системный метод совместного описания разнородных по сути и структуре процессов планирования и управления.

Такое описание может быть двух видов:

- названные процессы описываются одним *однородным* методом;

- процессы представлены разными согласованными методами (*системный* или *интегральный* метод).

Как показал анализ методов, в литературе фактически отсутствует однородный метод. В связи с этим анализ методов описания процессов планирования и управления проведем порознь для последующего формирования системного метода.

Одной из первых работ по описанию многоуровневых систем явилась публикация [3]. В ней рассматривались лишь двухуровневые системы, а предложенный теоретико-множественный метод не позволял получать конструктивные результаты.

Первоначально для описания пытались использовать частотные методы систем автоматического управления, однако описание ограничивалось либо двумя уровнями [4] без учета горизонтальных связей, либо одним элементом на нижнем уровне [5]. Требованиям относительной автономности процесса планирования и оптимизации процессов при этом не уделялось внимания.

Другая группа работ [6]–[8] учитывала преимущественно динамику систем без учета требований оптимальности и процесса планирования. К тому же описание вертикального взаимодействия характеризовалось очень сложным алгоритмом со значительным привлечением неформальных процедур. Ввести интеллектуальность в такие математические модели весьма проблематично, а оценить экономические свойства и целенаправленность не представляется возможным.

К тому же работы [6], [8] имеют целью скорее исследование динамических свойств одноуровневой системы декомпозицией и переходом к двухуровневой структуре. Такие задачи являются согласованными по определению.

Применение таких методов, как оптимизация по силе, энергии, линейно-квадратичная оптимизация [9], сильно затруднено сложностью экономической интерпретации. Речь идет к тому же об описании отдельного структурного элемента, что затрудняет учет процедуры взаимодействия элементов.

Работа [10] посвящена процессу планирования в двух- и трехуровневых системах с так называемой всеерной структурой, т. е. без учета горизонтальных связей.

Анализ известных методов показал, что сформулированным ранее требованиям не удовлетворяет ни один локальный метод. Следовательно, необходимо из локальных методов составить глобальные, предварительно более подробно ознакомившись с возможностями отдельных локальных методов.

Методы, пригодные для описания процессов планирования и управления, рассмотрим отдельно. В рамках данной статьи рассмотрим функцию планирования.

Планирование. Как упоминалось, в традиционных автоматизированных системах управления

производством решаются преимущественно задачи «прямого счета». При их использовании нельзя говорить даже о рациональном режиме работы системы, тем более – об оптимальном режиме.

В ERP-системах в дополнение к задачам «прямого счета» используются алгоритмы-ограничения.

Так, если a_{ij} – норма расхода материала на единицу продукции j , P_j – размер заказа клиента, b_i – наличное количество материала, то должно соблюдаться неравенство

$$\sum_{j=1}^J a_{ij} P_j \leq b_i. \quad (1)$$

Пусть t_{ij} – время изготовления детали j на оборудовании вида i ; t_{kr} – время сборки изделия r на оборудовании вида k ; P_j – план выпуска деталей (изделий); A_i – фонд времени работы оборудования.

Тогда при выпуске деталей (изделий) справедливо выражение

$$\sum_{j=1}^J t_{ij} P_j \leq A_i. \quad (2)$$

В то же время этот метод при последовательном рассмотрении выражений (1)–(2) имеет ограниченную сферу применения.

Итеративный характер расчета сильно затрудняет учет динамических изменений спроса и ресурсного обеспечения. Только ограничения на ресурсы не позволяют выявить лучшие режимы использования ресурсов даже при стабильном спросе.

Попытка описания многоуровневой схемы предпринималась в работе [7].

Пусть имеется модель, состоящая из K ($k = 1, K$) соединенных структурных элементов (подсистем). Ее частным случаем является модель с последовательным соединением подсистем. В этом случае возможно последовательное решение сначала для подсистемы 1, затем подсистемы 2 и т. д.

В более общем случае в силу однотипности структурных элементов можно математически описать лишь k -й элемент.

Тогда модель получает вид

$$\begin{aligned} y_k &= S_k(M_k, x_k), \\ z_k &= T_k(M_k, x_k), \end{aligned}$$

где x_k – вектор входа структурного элемента; y_k – вектор выхода структурного элемента; z_k – вектор

связей элементов; T_k, S_k – векторные функции; M_k – вектор управления k -й подсистемы.

Могут существовать нелинейные ограничения, описываемые векторной функцией

$$h_k(M_k, x_k, z_k) \geq 0.$$

Взаимодействие структурных элементов определяется выражением

$$x_k = \sum_{j=1}^K C_{kj} z_j,$$

где C_{kj} – матрица соответствующего размера.

При последовательном соединении

$$x_k = C_{kk1} z_{k1}.$$

Пусть целевая функция

$$F = \sum_{k=1}^K f_k(M_k, x_k) \rightarrow \max.$$

Цель: определить векторы $M = \{M_k\}$, $X = \{x_k\}$, $k = 1, K$, доставляющие максимум целевой функции.

Решение удобно выполнить, используя лагранжиан

$$\begin{aligned} L = & \sum_{k=1}^K f_k(M_k, x_k) + \sum_{k=1}^K \mu_k^T (T_k(M_k, x_k) z_k) + \\ & + \sum_{k=1}^K p_k^T (x_k - \sum_{j=1}^K C_{kj} z_j) + \sum_{k=1}^K \gamma_k^T (h_k(M_k, x_k, z_k)), \end{aligned}$$

где μ_k, p_k – векторы множителей Лагранжа; γ_k – множители Куна–Таккера.

Пусть функции T_k, S_k, F непрерывны и имеют первые производные. Тогда максимум определяется с использованием лагранжианов.

Фактически процедуру решения одноуровневой задачи обращают в двухуровневую процедуру.

Нетрудно видеть, что методы связаны с частным случаем двухуровневых структур систем, при этом интервалы времени на разных уровнях одинаковы. Интегральное описание планирования и управления весьма затруднительно. Целевые функции уровней согласованы по самой постановке задачи, тогда как в адаптивной системе необходимо уметь согласовывать эти функции.

Более интересно применение статического линейного программирования (СЛП) при необходимости согласования целевых функций [10]. Общая постановка этой задачи имеет веерный вид. Имеется один элемент (Центр) на верхнем уровне

и K ($k = 1, K$) элементов (автономных производств, не имеющих горизонтальных связей) на нижнем уровне. Центр располагает ресурсом в количестве X_0 , который необходимо распределить между производствами в количестве x_k в соответствии с их запросами s_k .

Элементы используют ресурсы с эффективностью $r_k f(x_k)$, где r_k – коэффициент эффективности; $f(x_k)$ – функция использования ресурсов.

Работа системы идет в условиях неопределенности. С одной стороны, Центр не знает точ-

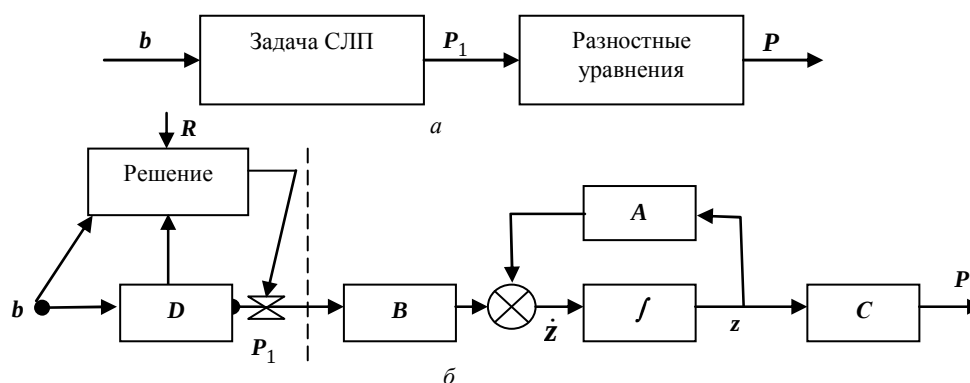
Более удобна другая форма задачи СЛП, решаемой при планировании производства:

$$DP[\tau] \leq b(\tau), \quad (3)$$

$$R^+[\tau] \leq P[\tau] \leq R^-[\tau], \quad (4)$$

$$G(P[\tau]) = FP[\tau] \rightarrow \max, \quad (5)$$

где D – матрица норм расхода ресурсов; P , b , R – вектор-столбцы искомого плана, наличного количества ресурсов, спроса; F – вектор-строка прибыли за единицу готовой продукции; G – целевая функция; τ – интервал времени. Информационная



ного значения r_k и судит о нем по диапазону изменения r_k и сообщениям s_k элементов. В общем случае может быть $r_k \neq s_k$.

С другой стороны, элементы не знают точного значения X_0 (дефицит или избыток).

Необходимо выработать закон взаимодействия Центра и элементов, чтобы соблюдалось условие $r_k = s_k$.

Центр руководствуется целевой функцией

$$\Phi = \sum_{k=1}^K f(x_k) / s_k \rightarrow \min$$

при ограничении

$$\sum_{k=1}^K x_k \leq X_0;$$

k -й элемент использует целевую функцию

$$\phi_k = f(x_k) / r_k \lambda x_k \rightarrow \max,$$

где λ – цена единицы ресурса.

Возможны различные разновидности принципов работы системы, подробно описанные в [10].

В более поздних работах В. Н. Буркова рассматриваются специфические так называемые веерные трехуровневые структуры.

Заметим, что здесь речь идет о согласовании задач уровней, однако рассматриваются только вертикальные связи.

схема задачи динамического линейного программирования представлена на рисунке: a – укрупненная, b – детальная).

Выражения (3)–(5) учитывают нелинейности и характерны для фиксированного интервала времени τ , но не охватывают возможную динамику процесса планирования.

Чтобы учесть динамику, необходимо к выражениям (3)–(5) добавить разностные уравнения перехода к последующим интервалам времени. При этом получается задача динамического линейного программирования (ДЛП).

Задача ДЛП тоже может быть представлена графически (рисунок, a). С учетом схемы динамической системы в пространстве состояний рисунок, a преобразуется в рисунок, b , на котором приняты следующие обозначения: P_1 – вектор комплекта ресурсов; z и $\dot{z}$ – вектор и его производная незавершенного производства; A , B , C – матрицы, характеризующие динамику процесса.

Штриховая черта на рисунке, b является границей между задачами, решаемыми аппаратом СЛП и ДЛП.

Таким образом, для формирования методов описания процесса планирования наиболее перспективны задачи СЛП и ДЛП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Советов Б. Я., Цехановский В. В., Чертовской В. Д. Теория адаптивного автоматизированного управления. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009.
2. Советов Б. Я., Цехановский В. В., Чертовской В. Д. Проблемы адаптивного автоматизированного управления промышленным предприятием // Информационно-управляющие системы. 2009. № 6 (43). С. 18–24.
3. Месарович М., Мако Д., Такахара Я. Теория иерархических систем /Пер. с англ. М.: Мир, 1973.
4. Фаткин Ю. М. Оптимальное управление в иерархических структурах //ДАН АН СССР. 1972. Т. 202, № 1. С. 59–61.
5. Вавилов А. А., Чертовской В. Д. Система автоматического управления с самонастраивающимся по частотным характеристикам регулятором // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. 1968. № 6. С. 139–147.
6. Системы: декомпозиция, оптимизация и управление /Сост.: М. Сингх, А. Титли; Пер. с англ. М.: Машиностроение, 1986.
7. Цурков В. И. Динамические задачи большой размерности. М.: Наука, 1988.
8. Араки М., Икэда М., Иосикава Ц. Теория управления большими системами // J. Soc. Instrum. and Control Eng. 1983. № 10. С. 868–876.
9. Егоров А. И. Оптимальное управление линейными системами. Киев: Выща шк., 1988.
10. Бурков В. Н. Основы математической теории активных систем. М.: Наука, 1977.

B. Ya. Sovetov, V. V. Tsekhanovsky, V. D. Chertovsky, R. A. Nechitailenko

FORMING OF THE MATHEMATICAL DESCRIPTION OF MULTILEVEL ADAPTIVE AUTOMATED PRODUCTION CONTROL SYSTEM AT THE PLANNING STAGE

Requirements are considered methods of the description of three-level adaptive automated systems of management (AASM). Analysis of the local methods of description, proposed global mathematical methods of investigation of AASM.

Adaptive management, analysis methods, choice of methods, formation, global description, planning, requirements to methods



УДК 681.5

В. В. Путов, И. Г. Полушин, В. В. Лебедев, А. В. Путов

Обобщение метода мажорирующих функций в задачах адаптивного управления нелинейными динамическими объектами

Рассматриваются вопросы связи и обобщения методов скоростного градиента и мажорирующих функций в построении беспоисковых адаптивных систем управления нелинейными динамическими объектами с функционально-параметрической неопределенностью, базирующиеся на нелинейной параметризации неопределенных нелинейных правых частей, описывающих эти объекты дифференциальных уравнений.

Нелинейные динамические объекты с функционально-параметрической неопределенностью, беспоисковые адаптивные системы с мажорирующими функциями, метод скоростного градиента, расширенное условие достижимости, обобщение метода мажорирующих функций

Большинство подходов в построении беспоисковых алгоритмов адаптивного управления нелинейными нестационарными динамическими объектами, описываемыми обыкновенными дифференциальными уравнениями, основано на предположении, что неизвестны только параметры уравнений при условии ограниченности областей и скоростей их изменения, а вид самих правых частей дифференциальных уравнений объектов точно известен и используется в построении законов управления алгоритмов адаптации [1], [2]. Пожалуй, наиболее обобщающим методом построения адаптивных алгоритмов этого класса является метод скоростного градиента [3], [4], обобщающий многие известные беспоисковые алгоритмы адаптивного управления, в том числе нелинейными механическими объектами.

В [5], [6] предложен метод построения беспоисковых адаптивных алгоритмов с так называемыми мажорирующими функциями для управления нелинейными динамическими объектами с функционально-параметрической неопределенностью, когда не только считаются неизвестными параметры, но и игнорируется точный вид функций, описывающих правые части нелинейных дифференциальных уравнений объектов. Построение таких алгоритмов предполагает приближенную нелинейную параметризацию (замену) неизвестных или слишком сложных либо не поддающихся аналити-

ческому описанию нелинейных функций объектов специально вводимыми более простыми в реализации оценочными функциями переменных состояний объектов. Эти функции «мажорируют» правые части дифференциальных уравнений объектов в том смысле, что их скорости роста при бесконечном возрастании аргументов сравнимы или превышают скорости роста последних.

Платой за переход от точных алгоритмов скоростного градиента к приближенным алгоритмам с мажорирующими функциями служит отказ от требования асимптотической устойчивости и переход к более слабым требованиям диссипативности адаптивных систем (свойстве всех ее бесконечно продолжаемых вправо решений погружаться со временем в фиксированную сферу конечного радиуса).

Алгоритмы с мажорирующими функциями. Пусть нелинейный нестационарный объект управления описывается системой дифференциальных уравнений вида

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \Phi(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t),$$

где $\mathbf{x}$ – n -мерный вектор состояния объекта, $\mathbf{x} \in R^n$; $\mathbf{u}$ – m -мерный вектор управления, $\mathbf{u} \in R^m$, $m < n$; $t \in I_t = [t_0; +\infty)$; R – множество вещественных чисел; $\Phi(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)$ – n -мерная вектор-функция,

непрерывная по всем аргументам в области $\Gamma_t \subset I_t \times R^n \times R^m$, причем в ней обеспечено свойство единственности решений $\mathbf{x}(t, t_0, \mathbf{x}_0, \mathbf{u}(\mathbf{x}, t))$ для всех $t \in I_t$, допустимых управлений $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$ $\mathbf{x}_0 = \mathbf{x}(t_0) \in R^n$.

Будем полагать, что исходный объект может быть представлен в виде

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}, t)\mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}, t)\mathbf{u}(t), \quad (1)$$

где $\mathbf{A}(\mathbf{x}, t)$, $\mathbf{B}(\mathbf{x}, t)$ – функциональные матрицы соответствующих размерностей, матрица $\mathbf{B}(\mathbf{x}, t)$ ограничена в целом равномерно по t , а матрица $\mathbf{A}(\mathbf{x}, t)$ может быть представлена в виде двойной суммы

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}, t) = \left[\sum_{r=1}^n \left(\sum_{q=0}^{p_r} \mathbf{A}_{qr}(\mathbf{x}, t) f_{qr}^\theta(x_r) \right) \right], \quad (2)$$

$$r = \overline{1, n}; q = \overline{0, p_r},$$

где $\mathbf{A}_{qr}(\mathbf{x}, t)$ – глобально ограниченные равномерно по t матричные функции, а $f_{qr}^\theta(x_r)$ – скалярные функции, возможно неограниченные и зависящие только от r -й компоненты вектора состояния. При $\|\mathbf{x}\| \rightarrow +\infty$ индекс q в разложении вводится для различения функций $f_{qr}^\theta(x_r)$ с разными скоростями роста при стремлении аргумента к бесконечности. Именно функции с большим индексом q растут быстрее, т. е. справедливо соотношение

$$\lim_{|x_r| \rightarrow +\infty} \frac{|f_{q+1,r}^\theta(x_r)|}{|f_{qr}^\theta(x_r)|} = +\infty.$$

Нулевой индекс $q = 0$ в разложении (2) присваивается глобально ограниченным слагаемым, причем функции $\mathbf{A}_{0r}(\mathbf{x}, t)$ выбираются таким образом, что $f_{0r}^\theta(x_r) \equiv 1$. Число p_r равно количеству различных функций роста по компоненте x_r ; $\|\cdot\|$ – евклидова норма вектора или матрицы. Для оценки скорости роста функций роста объекта будем использовать сравнение их со степенными функциями x_r^h от компонент вектора $\mathbf{x}$. Будем называть степенью роста скалярной функции $f_{qr}^\theta(x_r)$ по x_r точную нижнюю грань вещественных чисел h , таких, что $\overline{\lim}_{|x_r| \rightarrow \infty} |f_{qr}^\theta(x_r) / x_r^h| < \infty$.

Ставится задача построения адаптивного управляющего закона $u(x, t)$, обеспечивающего слежение за задающей траекторией, формируемой с помощью явной эталонной модели вида

$$\dot{\mathbf{x}}_M(t) = \mathbf{A}_M \mathbf{x}_M + \mathbf{B}_M \mathbf{u}^0(t), \quad (3)$$

где $(\mathbf{A}_M, \mathbf{B}_M)$ – управляемая пара; $\mathbf{A}_M$ – гурвицева матрица; $\mathbf{u}^0(t)$ – программное управление, $\|\mathbf{u}^0(t)\| \leq \text{const}$ для всех t .

Цель управления задается неравенством верхнего предела вида

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{x}(t; t_0, \mathbf{x}_0, \mathbf{u}) - \mathbf{x}_M(t; t_0, \mathbf{u}^0)\| \leq D, \quad (4)$$

$$D > 0 (\text{const}),$$

где число $D > 0$ характеризует размер сферы $\|e\| < D$ предельной ограниченности (диссипативности) ошибки $\mathbf{e}(t) = \mathbf{x}(t) - \mathbf{x}_M(t)$.

Следуя [6], построим адаптивный закон (закон основного контура) и алгоритмы его настройки с огрублением таким образом:

$$\mathbf{u}_a(t) = \left[\sum_{q=0}^{p_r} \left(\sum_{r=1}^n \mathbf{A}_{qr}^A(t) f_{qr}(x_r) \right) \right] \mathbf{x} + \mathbf{K}_B(t) \mathbf{u}^0(t), \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{K}}_{qr}^A(t) = & -f_{qr}(x_r) \Gamma_{qr}^A \mathbf{B}_M^T \mathbf{P} \mathbf{e} \mathbf{x}^T - \\ & - \Lambda_{qr}^A \mathbf{K}_{qr}^A(t), \\ \dot{\mathbf{K}}_B(t) = & -\Gamma_B \mathbf{B}_M^T \mathbf{P} \mathbf{e} \mathbf{u}^{0T}(t) - \Lambda_B \mathbf{K}_B(t), \\ & r = \overline{1, n}, q = \overline{0, p_r}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\mathbf{K}_{qr}^A(t)$ – $(m \times n)$ -мерные, а $\mathbf{K}_B(t)$ – $(m \times m)$ -мерная матрицы настраиваемых параметров; $\Gamma_{qr}^A, \Lambda_{qr}^A, \Gamma_B, \Lambda_B \in R^{m \times m}$ – симметричные положительно определенные (в частности, диагональные) $(m \times m)$ -мерные матрицы коэффициентов усиления алгоритмов; $\mathbf{P} = \mathbf{P}^T > 0$ – матрица, являющаяся единственным решением уравнения Ляпунова

$$\mathbf{A}_M^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}_M = -\mathbf{G}$$

для любой $\mathbf{G} = \mathbf{G}^T > 0$. Функции $f_{qr}(x_r)$ в законе (5) и алгоритмах (6) выберем так, чтобы они для функций роста объекта $f_{qr}^\theta(x_r)$ удовлетворяли соотношениям вида

$$\left| f_{qr}^\theta(x_r) / f_{qr}(x_r) \right| \leq a_{qr}, \quad r = \overline{1, n}, \quad q = \overline{1, p_r} \quad (7)$$

при $|x_r| \leq b_{qr}$ для некоторых чисел $a_{qr}, b_{qr} > 0$.

Функции $f_{qr}(x_r)$ будем называть мажорирующими функциями для функций роста $f_{qr}^\theta(x_r)$, а закон управления (5) и алгоритмы настройки (6) – адаптивным законом и алгоритмами его настройки с мажорирующими функциями, или, кратко, алгоритмами адаптации с мажорирующими функциями.

Вопросы аналитического обоснования диссипативности в целом (в области Γ_t) адаптивных систем с мажорирующими функциями, подобных рассмотренной прямой адаптивной системе с эталонной моделью вида (1), (3), (5), (6), подробно рассмотрены и исследованы в работах [5], [6] и в важных для приложений случаях в условиях тех или иных упрощающих предположений решены положительно.

Связь метода мажорирующих функций с методом скоростного градиента. Обобщение метода мажорирующих функций. Покажем, что закон (5) и алгоритмы (6) с мажорирующими функциями при надлежащем выборе целевого функционала могут быть получены прямым применением процедуры метода скоростного градиента [3], [4] при условии ослабления одного из условий его применимости, а именно так называемого условия *достижимости* [7]. Зададим целевой функционал квадратичной формой вида

$$Q(t) = 1/2 \mathbf{e}(t)^T \mathbf{P} \mathbf{e}(t). \quad (8)$$

Следуя процедуре скоростного градиента [3], вычислим полную производную функции (8) по времени в силу системы (1), (3), (5), (6), которая определяется выражением

$$\begin{aligned} \frac{dQ}{dt} = \boldsymbol{\omega}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}, t) = \mathbf{e}(t)^T \mathbf{P} \{ & \mathbf{A}_M \mathbf{e} + \mathbf{B}(\mathbf{x}, t) \times \\ & \times \left[\mathbf{B}^+(\mathbf{x}, t) \left(\sum_{q=0}^{p_r} \sum_{r=1}^n \tilde{\mathbf{A}}_{qr}(\mathbf{x}, t) f_{qr}(x_r) \right) \mathbf{x} + \right. \\ & \left. + \mathbf{B}^+(\mathbf{x}, t) (\mathbf{B}(\mathbf{x}, t) - \mathbf{B}_M) \mathbf{u}^0 + \right. \\ & \left. + \left(\sum_{q=0}^{p_r} \sum_{r=1}^n \mathbf{K}_{qr}^A(t) f_{qr}(x_r) \right) \mathbf{x} + \mathbf{K}_B(t) \mathbf{u}^0(t) \right] \}, \end{aligned}$$

где для краткости записи введен $\boldsymbol{\theta}$ – вектор, составленный из $n \times m + m^3$ настраиваемых параметров – элементов матриц настраиваемых параметров; матрицы $\mathbf{A}_{qr}(\mathbf{x}, t)$ получим далее; «+» – знак псевдообращения прямоугольной матрицы.

Выражения для скоростного градиента целевого функционала (8) по матрицам настраиваемых параметров (6) будут равны

$$\text{grad}_{\mathbf{K}_{qr}^A} \boldsymbol{\omega}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}, t) = f_{qr}(x_r) \mathbf{B}^T(\mathbf{x}, t) \mathbf{P} \mathbf{e}^T,$$

$$\text{grad}_{\mathbf{K}_B} \boldsymbol{\omega}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}, t) = \mathbf{B}^T(\mathbf{x}, t) \mathbf{P} \mathbf{e} \mathbf{u}^{0T}.$$

Отсюда, согласно [3], получаем алгоритмы настройки матриц параметров (6) с огрублением в виде

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_{qr}^A(t) = & -f_{qr}(x_r) \Gamma_{qr}^A \mathbf{B}^T(\mathbf{x}, t) \mathbf{P} \mathbf{e}^T - \Lambda_{qr}^A \mathbf{K}_{qr}^A(t), \\ \mathbf{K}_B(t) = & -\Gamma_B \mathbf{B}^T(\mathbf{x}, t) \mathbf{P} \mathbf{e} \mathbf{u}^{0T}(t) - \Lambda_B \mathbf{K}_B(t), \quad (9) \\ & q = \overline{0, p_r}, r = \overline{1, n}. \end{aligned}$$

Отметим, что алгоритмы (9) нереализуемы, поскольку входящая в них матрица $\mathbf{B}(\mathbf{x}, t)$ неизвестна. Однако показано, что при некоторых дополнительных условиях, рассмотренных в [5], [6], алгоритмы (9) не теряют работоспособности при замене матрицы $\mathbf{B}(\mathbf{x}, t)$ на матрицу эталонной модели $\mathbf{B}_M$. Если в алгоритмах (6) произвести обратную замену $\mathbf{B}_M$ на $\mathbf{B}(\mathbf{x}, t)$, то это приведет к полной идентичности алгоритмов (6) и (9), что и требовалось показать.

Непосредственной проверкой легко установить, что в проведенной процедуре соблюдены все условия применения метода скоростного градиента, за исключением так называемого условия *достижимости*, сформулированного в работе [3]. Сформулируем новое условие типа *условия достижимости*, которому алгоритмы (6) будут удовлетворять. С этой целью рассмотрим уравнение (1) в отклонениях траекторий объекта относительно эталонной модели (3):

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{A}_M \mathbf{e} + \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}, t, \mathbf{u}^0) + \mathbf{B}(\mathbf{x}, t) \mathbf{u}_a(t), \quad (10)$$

где

$$\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}, t) = [\mathbf{A}(\mathbf{x}, t) - \mathbf{A}_M] \mathbf{x} + [\mathbf{B}(\mathbf{x}, t) - \mathbf{B}_M] \mathbf{u}^0(t). \quad (11)$$

Правая часть выражения (10) может быть преобразована с помощью псевдообратной матричной функции $\mathbf{B}^+(\mathbf{x}, t)$ к виду

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{A}_M \mathbf{e} + \mathbf{B}(\mathbf{x}, t) \left[\mathbf{B}^+(\mathbf{x}, t) \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}, t, \mathbf{u}) + \mathbf{u}_a(t) \right].$$

Последнее преобразование возможно, если и только если при любых значениях аргументов справедливо выражение

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}, t)\mathbf{B}^+(\mathbf{x}, t)\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}, t, \mathbf{u}^0) = \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}, t, \mathbf{u}^0),$$

которое с учетом структуры $\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}, t, \mathbf{u}^0)$, определяемой выражением (11), эквивалентно условиям согласованности [5], [6] вида

$$(\mathbf{B}(\mathbf{x}, t)\mathbf{B}^+(\mathbf{x}, t) - \mathbf{I}_n)(\mathbf{A}(\mathbf{x}, t) - \mathbf{A}_M) = 0,$$

$$(\mathbf{B}(\mathbf{x}, t)\mathbf{B}^+(\mathbf{x}, t) - \mathbf{I}_n)\mathbf{B}_M = 0.$$

Задаваясь целью обобщения изложенного метода мажорирующих функций, отметим следующие обстоятельства [7]. Прежде всего, очевидно, что если в разложении (2) матрицы $\mathbf{A}(\mathbf{x}, t)$ имеются функции положительной степени роста, то постоянная матрица $\mathbf{A}_M$ может быть разложена (возможно, не единственным образом) по тем же функциям роста $f_{qr}^\theta(x_r)$, что и матрица $\mathbf{A}(\mathbf{x}, t)$, а именно

$$\mathbf{A}_M = \sum_{q=0}^p \left[\sum_{r=1}^n \mathbf{A}_{qr}^M(\mathbf{x}, t) f_{qr}^\theta(x_r) \right],$$

где матрицы $\mathbf{A}_{qr}^M(\mathbf{x}, t)$ ограничены по норме, по крайней мере вне некоторой области, содержащей начало координат. Отсюда ясно, что

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}, t) - \mathbf{A}_M = \sum_{q=0}^{p_r} \left[\sum_{r=1}^n (\mathbf{A}_{qr}(\mathbf{x}, t) - \mathbf{A}_{qr}^M(\mathbf{x}, t)) f_{qr}^\theta(x_r) \right]. \quad (12)$$

Далее из условий мажорирования (7) вытекает существование скалярных функций $\alpha_{qr}(x_r)$, таких, что

$$f_{qr}^\theta(x_r) = f_{qr}(x_r) \alpha_{qr}(x_r), \quad (13)$$

где $f_{qr}(x_r)$ – мажорирующие функции, используемые в алгоритмах (5), (6), причем

$$|\alpha_{qr}(x_r)| \leq \alpha_{qr}, \quad |x_r| \geq \eta_0,$$

где α_{qr} , η_0 – некоторые положительные константы. Подставляя (13) в (12), мы можем записать разложение матричной функции $\tilde{\mathbf{A}}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{A}(\mathbf{x}, t) - \mathbf{A}_M$ по мажорирующим функциям $f_{qr}(x_r)$ следующим образом:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{A}}(\mathbf{x}, t) &= \sum_{q=0}^{p_r} \left[\sum_{r=1}^n (\mathbf{A}_{qr}(\mathbf{x}, t) - \right. \\ &\quad \left. - \mathbf{A}_{qr}^M(\mathbf{x}, t)) \alpha_{qr}(x_r) f_{qr}(x_r) \right] = \\ &= \sum_{q=0}^{p_r} \left[\sum_{r=1}^n \tilde{\mathbf{A}}_{qr}(\mathbf{x}, t) f_{qr}(x_r) \right], \end{aligned} \quad (14)$$

$$\tilde{\mathbf{A}}_{qr}(\mathbf{x}, t) = (\mathbf{A}_{qr}(\mathbf{x}, t) - \mathbf{A}_{qr}^M(\mathbf{x}, t)) \alpha_{qr}(x_r).$$

Все функциональные матрицы $\tilde{\mathbf{A}}_{qr}(\mathbf{x}, t)$ ($q = \overline{0, p_r}, r = \overline{1, n}$) ограничены по норме, по крайней мере вне некоторой области в пространстве R^n координат вектора состояния $\mathbf{x}$. Это следует из соответствующей ограниченности всех составляющих, входящих в выражение (14).

Подставляя выражение для закона основного контура (5) в уравнение в отклонениях (10) и используя последнее разложение матрицы $\tilde{\mathbf{A}}(\mathbf{x}, t)$, после группировки соответствующих членов, получаем:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{e}} &= \mathbf{A}_M \mathbf{e} + \mathbf{B}(\mathbf{x}, t) \left(\sum_{q=0}^{p_r} \sum_{r=1}^n [\mathbf{B}^+(\mathbf{x}, t) \tilde{\mathbf{A}}_{qr}(\mathbf{x}, t) + \right. \\ &\quad \left. + \mathbf{K}_{qr}^A(t) f_{qr}(x_r)] \mathbf{x} + \right. \\ &\quad \left. + [\mathbf{B}^+(\mathbf{x}, t)(\mathbf{B}(\mathbf{x}, t) - \mathbf{B}_M) + \mathbf{K}_B(t)] \mathbf{u}^0 \right). \end{aligned} \quad (15)$$

Из полученного выражения следует, что существуют «идеальные» значения матриц настраиваемых параметров, правда, не постоянные, а являющиеся функциями переменных состояния и времени:

$$\mathbf{K}_{qr}^{A*}(\mathbf{x}, t) = -\mathbf{B}^+(\mathbf{x}, t) \tilde{\mathbf{A}}_{qr}(\mathbf{x}, t), \quad (16)$$

$$\mathbf{K}_B^*(\mathbf{x}, t) = -\mathbf{B}^+(\mathbf{x}, t)(\mathbf{B}(\mathbf{x}, t) - \mathbf{B}_M). \quad (17)$$

При достижении равенства матриц настраиваемых параметров $\mathbf{K}_{qr}^A(t)$, $\mathbf{K}_B(t)$ соответствующим «идеальным» значениям (16), (17), все члены в правой части уравнения (15), за исключением первого, взаимно компенсируются, и уравнение ошибки (15) адаптивной системы (1), (3), (5), (6) примет вид

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{A}_M \mathbf{e},$$

а его тривиальное (нулевое) решение в силу гурвицевости матрицы $\mathbf{A}_M$ является асимптотически устойчивым. Из ограниченности членов в правых частях (16), (17) следует, что для алго-

ритмов (5), (6) выполняется условие, которое назовем *расширенным условием достижимости*.

Расширенное условие достижимости. Существует вектор-функция $\theta^*: R^n \times R^+ \rightarrow r^k$, $k = m \times n + m^2$, принимающая ограниченные по норме значения, по крайней мере вне некоторой области, и такая, что для некоторой непрерывной скалярной функции $\rho: R \rightarrow R$, такой, что $\rho(0) = 0$ и $\lim_{Q \rightarrow \infty} \rho(Q) = \infty$, и некоторой константы β выполняется неравенство

$$\omega(x, \theta^*(x, t), t) \leq -\rho(Q) + \beta, \quad \beta > 0 (\text{const}). \quad (18)$$

Таким образом, установлено, что алгоритмы адаптивного управления (5), (6), построенные с помощью метода мажорирующих функций, могут быть получены с помощью процедуры, характеризующей метод скоростного градиента. Действительно, известные достаточные условия достижения алгоритмами скоростного градиента цели управления (4) с заменой в нем неравенства с числом $D > 0$ для верхнего предела на равенство нулю, а именно: *условие гладкости* адаптивной системы (1), (3), (5), (6), *условие бесконечного роста* для целевого функционала (8) и *условие выпуклости* функции $\omega(x, \theta, t)$ выполняются.

Остается рассмотреть *условие достижимости* цели адаптивного управления, заключающееся в существовании такого постоянного вектора θ^* , чтобы выполнялось неравенство (18) при условии $\beta = 0$, т. е. имела бы место асимптотическая устойчивость тривиального решения дифференциальной системы (15).

Однако установленный факт наличия «идеальных» значений настраиваемых параметров, не постоянных, а являющихся функциями переменных состояния и времени, существующих и ограниченных, по крайней мере вне некоторой окрестности, содержащей начало координат, позволило сформулировать *расширенное условие до-*

стижимости, допускающее неравенство (18) при $\beta = \text{const} (>0)$, т. е. перейти от требования асимптотической устойчивости тривиального решения $e = 0$ дифференциальной системы (15) к диссипативности адаптивной системы (1), (3), (5), (6).

Подытоживая, сформулируем основной результат в виде следующего доказанного утверждения:

Утверждение: для обобщенного настраиваемого объекта (1), (3), (5) с мажорирующими функциями, удовлетворяющими условию (7), алгоритмы настройки вида (6) при условии выбора целевого функционала в виде (8) могут быть получены путем применения процедуры метода скоростного градиента с огрублением в виде отрицательной обратной связи по настраиваемым параметрам. При этом целевой функционал (8) удовлетворяет *условию бесконечного роста*, а уравнения (1), (3), (5), (6) удовлетворяют *условиям гладкости, выпуклости и расширенному условию достижимости*.

Замечание. Доказанное утверждение дает основание обобщить метод мажорирующих функций, позволяя адаптивные системы с алгоритмами настройки параметров, полученными с помощью процедуры метода скоростного градиента и удовлетворяющими *расширенному условию достижимости*, называть адаптивными системами с мажорирующими функциями, и поскольку из *условия достижимости* (при $\theta^* = \text{const}$) метода скоростного градиента следует выполнение *расширенного условия достижимости*, то определенный выше класс адаптивных систем с мажорирующими функциями включает в себя класс систем, полученных методом скоростного градиента.

Результаты работы получены в рамках выполнения проекта по Федеральной целевой программе «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Khosla P., Kanade N. Parameter identification of robot dynamics // IEEE conf. Decision and Control. 1985. № 1.
2. Slotine J. J. E., Li W. On the adaptive control of robot manipulations // Int. J. Of Robotics Rresearch. 1987. № 3.
3. Фрадков А. Л. Адаптивное управление в сложных системах: беспоисковые методы. М.: Наука, 1990. 296 с.
4. Fradkov A. L., Andrievsky B. R., Boykov K. B. Non-linear excitability analysis with application to two-pendulum system // Proc. 21st IASTED Conf. "Modeling, Identification sand Control" (MIC 2002). Innsbruck, 18–21 Feb. 2002. IASTED, ACTA Press. P. 374–379.
5. Путов В. В. Методы построения адаптивных систем управления нелинейными нестационарными

динамическими объектами с функционально-параметрической неопределенностью: Дис. ... д-ра техн. наук / СПбГЭТУ «ЛЭТИ». СПб., 1993. 590 с.

6. Путов В. В., Шелудько В. Н. Адаптивные и модальные системы управления многомассовыми не-

линейными упругими механическими объектами. СПб.: Элмор, 2007. 244 с.

7. Полушин И. Г. Построение алгоритмов адаптивного управления нелинейным многостепенным механическим объектом: Дис. ... канд. техн. наук / СПбГЭТУ «ЛЭТИ». СПб., 1995. 230 с.

V. V. Putov, I. G. Polushin, V. V. Lebedev, A. V. Putov

A GENERALIZATION OF THE MAJORIZE FUNCTIONS IN ADAPTIVE CONTROL OF NONLINEAR DYNAMIC OBJECTS

The problems of communication and synthesis of speed-gradient method and the method of majorizing functions in building adaptive control of nonlinear dynamic objects with functional and parametric uncertainty based on non-linear parameterization of uncertain nonlinear right-hand sides describing the objects of differential equations.

Nonlinear dynamic objects with functional and parametric uncertainty, adaptive systems with majorizing functions, speed-gradient method, advanced condition reachability, the extended generalization of the reachability condition majorize functions



УДК 621.3.01

Е. Б. Соловьева

Нейронные предкомпенсаторы для борьбы с нелинейными искажениями в высокочастотном усилителе мощности

Предложена каскадная структура нелинейного предкомпенсатора, синтезируемого прямым алгоритмом обучения. Рассмотрены функционально связанная и полиномиальная перцептронная нейронные сети. Показано, что для усилителя мощности с моделью Винера–Гаммерштейна наибольшую точность подавления нелинейных искажений сигналов обеспечивает каскадный предкомпенсатор, включающий полиномиальную перцептронную сеть и радиально ограниченную модель Вольтерры.

Нелинейная компенсация, нелинейная модель, усилитель мощности, нелинейное искажение

С развитием интегральной технологии для усилителей мощности (УМ), применяемых в разнообразных отраслях науки и техники, характерно снижение массы и размеров, а также повышение надежности их работы. УМ обеспечивает заданную мощность в нагрузке, сопротивление которой, как правило, мало. Обычно в УМ амплитуды выходного тока и напряжения близки к предельно допустимым значениям, а выходная мощность соизмерима с предельно допустимой мощностью, рассеиваемой прибором, и сравнима с мощностью, потребляемой от источника питания. Важными показателями, характеризующими УМ, являются: КПД, мощность, отдаваемая в нагрузку, коэффициент нелинейных искажений выходного сигнала. Поскольку транзисторы в УМ работают при значительных амплитудах сигнала, усилителям мощности присущи значительные нелинейные искажения [1].

Одним из способов борьбы с нелинейными искажениями в УМ является синтез предкомпенсатора (предыскажителя, digital predistorter, DPD). Задача DPD – внести нелинейные предыскажения, которые позволят компенсировать нелинейные искажения усилителя (линеаризовать УМ). Совершенствование методов синтеза адаптивных предкомпенсаторов для линеаризации УМ является актуальной задачей. Наряду с модификацией полиномиальных моделей DPD развиваются ме-

тоды синтеза DPD в виде нейронных сетей [2]. Нейронные модели DPD могут быть существенно проще полиномиальных, что важно при аппаратной реализации DPD.

В работе предлагается использовать функционально связанную искусственную нейронную сеть (functional link artificial neural network, FLANN) [2]–[4] и полиномиальную перцептронную сеть (polynomial perceptron network, PPN) [4] для синтеза каскадного DPD с целью повышения уровня подавления нелинейных искажений сигналов в УМ; выполняется сравнительный анализ указанных моделей на примере синтеза DPD, компенсирующего нелинейные искажения в модели Винера–Гаммерштейна УМ на классе GSM-сигнала с четырьмя несущими.

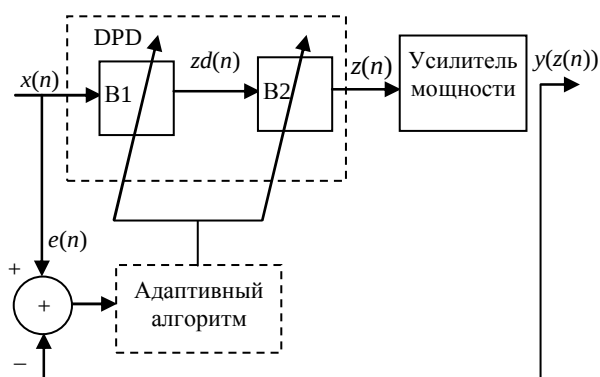


Рис. 1

Адаптивный DPD с каскадной структурой. Синтез DPD выполним на основе операторного подхода с применением входных и выходных сигналов УМ.

Блок-схема включения адаптивного DPD с применением прямого алгоритма его обучения [1] изображена на рис. 1. Здесь DPD содержит два каскадно соединенных блока В1 и В2.

Блоки В1 и В2 описываются соответствующими операторными уравнениями:

$$z(n) = S_1[x(n)], \quad z(n) = S_2[z(n)],$$

где n – нормированное дискретное время; $x(n)$, $z(n)$ – входной и выходной сигналы DPD; $z(n)$ – выходной сигнал блока В1 предкомпенсатора, $S_1[\cdot]$ и $S_2[\cdot]$ – нелинейные операторы.

Параметры моделей $S_1[\cdot]$ и $S_2[\cdot]$ находим в метрике L_2 последовательно (вначале – параметры модели $S_1[x(n)]$, затем – модели $S_2[z(n)]$) с помощью итерационного метода (метода простых итераций [5]) при решении задачи аппроксимации

$$\|y(z(n)) - x(n)\| \Rightarrow \min_{n \in [0, N_x]},$$

где $y(z(n))$ – выходной сигнал усилителя мощности; N_x – длительность сигнала $x(n)$.

Согласно принципу сжатых отображений [5] последовательные итерации опишем выражениями

$$z_{k+1}(n) = z_k(n) + (x(n) - y(z_k(n))) = z_k(n) + e_k(n),$$

$$k \geq 1,$$

$$z_{k+1}(n) = z_k(n) + e_k(n),$$

где k – номер итерации; $e_k(n)$ – ошибка приближения на k -й итерации расчета; $e_k(n) = x(n) - y(z_k(n))$. При $k = 1$ полагаем $z_1(n) = z_1(n) = x(n)$.

В рассмотренном подходе параметры моделей блоков В1 и В2 DPD находятся в два этапа. В результате

– точность синтеза DPD повышается, так как решение, полученное на первом этапе аппроксимации (блок В1), уточняется на втором этапе (блок В2);

– частично снимается проблема плохой обусловленности, поскольку размерность задач, решаемых на каждом этапе аппроксимации, может быть меньше размерности задачи аппроксимации, решаемой при типовой (одноблочной) структуре DPD.

В качестве моделей операторов $S_1[\cdot]$ и $S_2[\cdot]$ каскадно-соединенных блоков DPD используем FLANN [2]–[4] и PPN [4].

Функционально связанная искусственная нейронная сеть (FLANN). FLANN является одностойной сетью (в ней отсутствует внутренний слой) [2]–[4]. Алгоритм обучения такой сети включает меньшее число преобразований и обеспечивает более быструю сходимость к решению задачи аппроксимации по сравнению с традиционными нейронными сетями.

Модель FLANN имеет вид

$$y(n) = f\left(\sum_{i=1}^G w_i \phi_i(\vec{X}(n))\right) = f(\vec{W}^T \vec{\Phi}(\vec{X}(n))), \quad (1)$$

где f – нелинейная функция активации; $\vec{X}(n) = [x_1(n), x_2(n), \dots, x_Q(n)]^T$ – вектор воздействий, « T » – знак транспонирования; $\vec{W} = [w_1, w_2, \dots, w_G]^T$ – вектор весов сети; $\vec{\Phi}(\vec{X}(n)) = [\phi_1(\vec{X}(n)), \phi_2(\vec{X}(n)), \dots, \phi_G(\vec{X}(n))]^T$ – вектор функций ϕ_i , $i = 1, 2, \dots, G$; $y(n)$ – выходной сигнал модели.

Функции ϕ_i , $i = 1, 2, \dots, G$ преобразуют входные сигналы в базисные функции с помощью, например, тригонометрического полинома, полиномов Лежандра, Чебышева, а также выполняют многомерное преобразование базисных функций. Формирование базисных функций в модели (1) служит для понижения числа обусловленности при решении задачи аппроксимации с высокой степенью нелинейности.

Структурная схема FLANN показана на рис. 2.

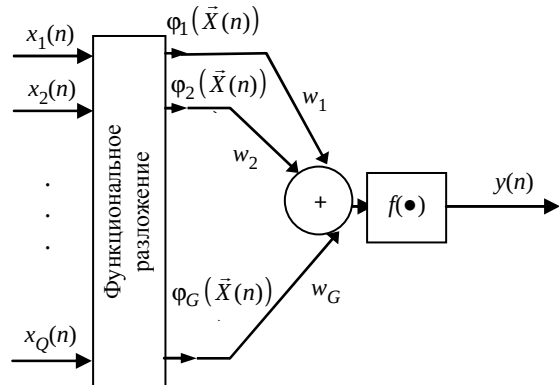


Рис. 2

Для синтеза DPD используем модель (1) с линейной функцией активации f и базисными функциями – полиномами Чебышева $T_i(\bar{X}(n))$ степени i ($i=1, 2, \dots, P$) [2]–[6]. В этом случае модель (1) преобразуется в выражение

$$y(n) = \bar{W}^T \bar{\Phi}(\bar{X}(n)), \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} \bar{\Phi}(\bar{X}(n)) = & \left[1, T_1(x_1(n)), \dots, T_Q(x_Q(n)), \dots, \right. \\ & T_2(x_1(n)), \dots, T_2(x_Q(n)), \dots, \\ & T_1(x_1(n))T_1(x_2(n)), \dots, T_1(x_{Q-1}(n))T_1(x_Q(n)), \dots, \\ & \left. T_P(x_1(n)), \dots, T_P(x_Q(n)) \right]^T. \end{aligned}$$

В блоке «Функциональное разложение» (рис. 2) формируются и подвергаются многомерному преобразованию полиномы Чебышева.

FLANN с чебышевскими базисными функциями будем называть чебышевской функционально связанной искусственной нейронной сетью (Chebyshev functional link artificial neural network, CFLANN). Отметим, что CFLANN соответствует двухслойной персептронной нейронной сети [6].

CFLANN в DPD формирует выходной сигнал со спектром, расположенным в полосе пропускания усилителя на частотах входного сигнала и комбинационных частотах интермодуляционных составляющих, порождаемых нелинейностью УМ [7].

Полиномиальная персептронная сеть (PPN).

PPN – однослойная сеть (без внутреннего слоя), что обеспечивает простоту алгоритма ее обучения и высокую скорость сходимости к решению задачи аппроксимации.

Модель PPN имеет вид [4]

$$y(n) = f(\bar{W}^T \bar{F}(\bar{X}(n))), \quad (3)$$

где f – нелинейная функция активации; $\bar{W} = [w_1, w_2, \dots, w_G]^T$ – вектор весов нейронной сети; $\bar{F}(\bar{X}(n))$ – вектор функций, содержащий элементы с многомерным преобразованием:

$$\begin{aligned} \bar{F}(\bar{X}(n)) = & \left[1, x_1(n), \dots, x_Q(n), \dots, x_1^2(n), \dots, x_Q^2(n), \dots, \right. \\ & x_1(n)x_2(n), \dots, x_{Q-1}(n)x_Q(n), \dots, x_1^P(n), \dots, x_Q^P(n) \left. \right]^T; \\ & P \text{ – степень элемента вектор-функции, } y(n) \text{ –} \end{aligned}$$

выходной сигнал модели; $\bar{X}(n) = [x_1(n), x_2(n), \dots, x_Q(n)]^T$ – вектор воздействий.

Анализ PPN и FLANN показывает, что PPN может быть преобразована во FLANN (рис. 2) путем перехода к базисным функциям, полученным из входных сигналов модели на основе полиномов Лежандра, Чебышева и т. д.

При синтезе DPD введем в модель (3) линейную функцию активации. В итоге запишем:

$$y(n) = \bar{W}^T \bar{F}(\bar{X}(n)). \quad (4)$$

Вектор воздействий $\bar{X}(n)$ сформируем с помощью линии задержки и выполним многомерное преобразование в $\bar{F}$ модели (4) с учетом правил конструирования интермодуляционных спектральных составляющих в выходном сигнале DPD [7]. В результате получим используемую для синтеза DPD модель PPN вида

$$y(n) = y_1(n) + y_2(n), \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} y_1(n) = & \sum_{i=0}^M x(n-i) \sum_{k=0}^{(P-1)/2} w_{2k+1}^{(1)} |x(n-i)|^{2k} + \\ & + \sum_{i=1}^M x(n-i) \sum_{k=1}^{(P-1)/2} w_{2k+1}^{(2)} |x(n)|^{2k} + \\ & + \sum_{i=0}^M x^*(n-i) x^2(n) \sum_{k=0}^{(P-3)/2} w_{2k+3}^{(3)} |x(n)|^{2k} + \\ & + \sum_{i=1}^M x^*(n) x^2(n-i) \sum_{k=0}^{(P-3)/2} w_{2k+3}^{(4)} |x(n-i)|^{2k} + \\ & + \sum_{i=1}^M x(n) \sum_{k=1}^{(P-1)/2} w_{2k+1}^{(5)} |x(n-i)|^{2k} + \\ & + x^2(n) \sum_{i=0}^M x^*(n-i) \sum_{k=0}^{(P-3)/2} w_{2k+3}^{(6)} |x(n-i)|^{2k} + \\ & + |x(n)|^2 \sum_{i=0}^M x(n-i) \sum_{k=0}^{(P-3)/2} w_{2k+3}^{(7)} |x(n-i)|^{2k} + \\ & + \sum_{i=0}^M (x^*(n))^2 x^3(n-i) \sum_{k=0}^{(P-5)/2} w_{2k+5}^{(8)} |x(n-i)|^{2k}; \quad (6) \end{aligned}$$

«*» – знак комплексного сопряжения; M , P – длина памяти и степень модели соответственно;

$$y_2(n) = \sum_{i=1}^M (x^*(n-i))^2 x^3(n) \sum_{k=0}^{(P-5)/2} w_{2k+5}^{(9)} |x(n)|^{2k} +$$

$$\begin{aligned}
 & + \sum_{i=1}^M x^*(n-i) x^2(n-i) \sum_{k=1}^{(P-3)/2} w_{2k+3}^{(10)} |x(n)|^{2k} + \\
 & + \sum_{i=1}^M \left(x^*(n-i) \right)^2 x^3(n) \sum_{k=1}^{(P-5)/2} w_{2k+5}^{(11)} |x(n-i)|^{2k} + \\
 & + \sum_{i=1}^M \left(x^*(n) \right)^2 x^3(n-i) \sum_{k=1}^{(P-5)/2} w_{2k+5}^{(12)} |x(n)|^{2k} + \\
 & + |x(n)|^2 \sum_{i=1}^M x(n) \sum_{k=1}^{(P-3)/2} w_{2k+3}^{(13)} |x(n-i)|^{2k} + \\
 & + \sum_{i=1}^M |x(n-i)|^2 x(n) \sum_{k=1}^{(P-3)/2} w_{2k+3}^{(14)} |x(n)|^{2k}.
 \end{aligned}$$

Отметим, что выражение (6) является радиально ограниченной моделью Вольтерры (radially pruned Volterra model, RPVM). Модель RPVM – регрессионная форма усеченного ряда Вольтерры. Ядра Вольтерры в RPVM строятся на сетке n -мерного куба (гиперкуба), радиальные направления выбираются на базе ядра 3-го порядка [8], [9].

Компенсация нелинейных искажений в модели Винера–Гаммерштейна УМ. Низкочастотная модель Винера–Гаммерштейна УМ класса АВ описывает каскадное соединение следующих блоков [9]:

– линейной динамической цепи с передаточной функцией

$$H_1(z) = \frac{1 + 0,5z^{-2}}{1 - 0,2z^{-1}};$$

NMSE, Q	Модель (2) 9-й степени CFLANN	RPVM (6) при $P = 7$	Модель (5) PPN при $P = 7$	Каскадное соединение		
				Модель (2) 9-й степени CFLANN и модель (2) 7-й степени CFLANN	RPVM (6) при $P = 7$ и RPVM (6) при $P = 7$	Модель (5) PPN при $P = 7$ и RPVM (6) при $P = 7$
NMSE	-65,04	-72,87	-75,50	-69,42	-78,14	-79,14
Q	226	145	221	375	290	366

– безынерционной нелинейности

$$w(n) = b_1 v(n) + b_3 v(n) |v(n)|^2 + b_5 v(n) |v(n)|^4,$$

где $b_1 = 1,0108 + 0,0858j$; $b_3 = 0,0879 - 0,1583j$; $b_5 = -1,0992 - 0,8891j$; $v(n)$ – выходной сигнал динамической цепи с $H_1(z)$;

– линейной динамической цепи с передаточной функцией

$$H_2(z) = \frac{1 - 0,1z^{-2}}{1 - 0,4z^{-1}}.$$

Воздействие низкочастотной модели УМ – комплексная огибающая GSM-сигнала с четырьмя несущими в частотной полосе 20 МГц, расположенной относительно центральной частоты 1,845 ГГц. Частота дискретизации огибающей GSM-сигнала $f_d = 184,32$ МГц.

Для линеаризации описанной модели УМ построены адаптивные DPD с применением модели 9-й степени CFLANN, RPVN (6) при $P = 7$, модели (5) PPN при $P = 7$, а также каскадных соединений указанных моделей. Отметим, что в выражениях (6), (7) верхние пределы операторов суммирования равнялись $(P-1)/2$. Длина памяти исследуемых моделей равнялась четырем ($M = 4$ в (6), (7)).

Точность линеаризации УМ оценивалась с помощью нормированной среднеквадратичной погрешности (normalized mean-square error, NMSE, дБ), рассчитываемой по формуле

$$NMSE = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{n=0}^{N_x-1} |y(z(n)) - x(n)|^2}{\sum_{n=0}^{N_x-1} |x(n)|^2} \right),$$

где $x(n)$ – входной сигнал длиной N_x отсчетов ($N_x = 106\,339$) каскадного соединения DPD и РА, изображенного на рис. 1; $y(z(n))$ – выходной сигнал УМ.

Значения NMSE, полученные на 45-й итерации адаптации DPD, а также число параметров Q в моделях DPD представлены в таблице.

Из анализа таблицы вытекает следующее:

– модель PPN обеспечивает более высокую точность линеаризации УМ, чем модели RPVM и CFLANN,

– применение каскадной структуры DPD повышает точность линеаризации УМ. Большая точность линеаризации достигается при каскадной структуре DPD с моделью PPN.

Научная новизна работы состоит в декомпозиции общей задачи аппроксимации нелинейного оператора DPD на подзадачи меньшей размерности, решаемые при синтезе DPD последователь-

но. Такой подход позволяет снять проблему плохой обусловленности, характерную для задач моделирования устройств с высокой степенью нелинейности по соотношению вход-выход, а также повысить точность линеаризации УМ за счет лучшего (поэтапного) приближения к оптимальным параметрам DPD.

Декомпозиция задачи аппроксимации оператора DPD реализована путем синтеза адаптивного DPD каскадной структуры на основе прямого алгоритма обучения. В качестве моделей блоков

DPD использованы: функционально связанная нейронная сеть, полиномиальный персептрон, радиально ограниченная модель Вольтерры.

Компенсация нелинейных искажений сигналов в УМ с моделью Винера–Гаммерштейна на классе GSM-сигнала с четырьмя несущими показала, что более точную линеаризацию характеристики УМ обеспечивает каскадный DPD, состоящий из PPN и RPVM, худший результат дает DPD на основе моделей CFLANN.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. RF power amplifier behavioral modeling / D. Schreurs, M. O'Droma, A. A. Goacher, M. Gadringer. N. Y.: Cambridge University Press, 2009.
2. Feng Complex-Chebyshev functional link neural network behavioral model for broadband wireless power amplifiers / M. Li, J. Liu, Y. Jiang, W. Feng // IEEE Trans. MTT. 2012. Vol. 60, № 6. Part 2. P. 1979–1989.
3. Identification of nonlinear dynamic systems using functional link artificial neural networks / J. C. Patra, R. N. Pal, B. N. Chatterji, G. Panda // IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics. Part B: Cybernetics. 1999. Vol. 29, № 2. P. 254–262.
4. Nonlinear channel equalization for QAM signal constellation using artificial neural networks / J. C. Patra, R. N. Pal, R. Baliarsingh, G. Panda // IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics. Part B: Cybernetics. 1999. Vol. 29, № 2. P. 262–271.
5. Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М. Численные методы. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003.
6. Lee T. T., Jeng J. T. The chebyshev polynomial based unified model neural networks for function approximations // IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics. Part B: Cybernetics. 1998. Vol. 28, № 6. P. 925–935.
7. On the baseband representation of a bandpass nonlinearity / G. T. Zhou, H. Qian, L. Ding, R. Raich // IEEE Trans. SP. 2005. Vol. 53, № 8. P. 2953–2957.
8. A new approach to pruning Volterra models for power amplifiers / C. Crespo-Cadenas, J. Reina-Tosina, M. J. Madero-Ayora, J. Munoz-Cruzado // IEEE Trans. SP. 2010. Vol. 58, № 4. P. 2113–2120.
9. Соловьева Е. Б. Предкомпенсатор Вольтерры с девиацией динамики для линеаризации усилителя мощности // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2011. Т. 54, № 10. С. 29–36.

E. B. Solovyeva

NEURAL PRECOMPENSATORS AGAINST NONLINEAR DISTORTIONS IN HIGHFREQUENCY POWER AMPLIFIER

The cascade structure of nonlinear digital precompensator synthesized by the direct learning algorithm is proposed. Functional link and polynomial perceptron neural networks are represented. It is shown that for the power amplifier described by Wiener-Hammerstein model the most accuracy of nonlinear distortion cancelling is provided with the cascade precompensator including the polynomial perceptron network and radially pruned Volterra model.

Nonlinear compensation, nonlinear model, power amplifier, nonlinear distortion

УДК 621.365.5:614.8.084

А. Н. Иванов

Методы расчета электродинамических усилий в устройствах индукционного нагрева

Рассмотрены различные методики расчета аксиальных и радиальных электродинамических усилий (ЭДУ) в устройствах индукционного нагрева цилиндрического типа. Приведено описание методики, позволяющей с приемлемой точностью оценить средние значения радиальных и аксиальных составляющих ЭДУ, действующих в индуктирующей системе. Приведена схема алгоритма и результаты расчета, полученные при использовании программы электротеплового анализа ELTA²⁰.

Индукционный нагрев, электродинамические усилия, моделирование индукционных установок

Решение задач, касающихся электромагнитно-механической совместимости¹ (ЭММС) индукционных нагревательных установок при их проектировании, которые приходится решать в первую очередь самим конструкторам или с привлечением известных ученых-исследователей, является непростым делом. Сложность задачи обусловлена тем, что возможных независимых параметров, от которых зависят электродинамические усилия (ЭДУ), являющиеся объектом внимания ЭММС, может быть достаточно много. К ним относятся характеристики источника питания (частота тока, мощность и др.), конфигурация индуктирующей системы, которая создает осевые усилия, взаимное расположение заготовок и индукторов и многое другое.

Чаще всего приходится полагаться на накопленный годами опыт и интуитивно определять требуемые параметры индуктирующих катушек, магнитопроводов, приводных механизмов загрузки и выгрузки заготовок. Детальный анализ возможных проблем технологической надежности и безопасности индукционного нагревательного процесса чаще всего не проводится даже при разработке нового оборудования с неизвестным его поведением в предсказуемых или заранее предвидимых нештатных или аварийных режимах. Тем

не менее, вопросы о том, как оценить электродинамические усилия, действующие на индуктирующую катушку или заготовку, возникают у разработчиков даже в настоящее время. И это несмотря на то, что теория определения ЭДУ известна и разработана достаточно хорошо. Кроме того, существуют различные программы расчета электромагнитных и тепловых параметров индукционных нагревателей, которые при некоторых модификациях могли бы быть адаптированы для расчета ЭДУ.

Для исключения этого пробела предложен алгоритм и реализуемая в программе ELTA²⁰ отдельная часть программного обеспечения, позволяющая разработчикам цилиндрических индукционных нагревателей достаточно просто решить некоторые проблемные задачи, которые могут встретиться в процессе эксплуатации, на этапе проектирования или испытаний. Исследуя шаг за шагом поведение индукционной системы при известных условиях, можно выбрать рациональный вариант конструкции отдельных элементов и предложить необходимые решения, тем самым устранить или сократить риск, сделав изначально безопасной конструкцию и собранные части установки, и принять все необходимые меры защиты от негативных воздействий, которые не могут быть устранены.

С точки зрения ЭММС наибольший интерес представляет задача нахождения сил, действующих либо на отдельные слитки, либо на весь столб заготовок, а также на индуктирующую катушку и магнитопровод при его наличии.

¹ Электромагнитно-механическая совместимость – это способность индукционных установок удовлетворительно функционировать, не создавая недопустимых электродинамических воздействий на конструктивные элементы самой установки и нагреваемые изделия, а также недопустимых проблем для обслуживающего персонала и других систем, находящихся в непосредственном их окружении [1].

Подробный анализ расчетных формул для нахождения электродинамических усилий и их применения для индукционных нагревательных установок в известных литературных источниках [1]–[5] показал, что для решения данных задач может быть с успехом использована одна из трех возможных моделей, приведенных в [2, с. 32–34]. Для этого достаточно взять производную от электромагнитной энергии по координате при изменении геометрического параметра исследуемой системы.

Для нахождения средней во времени силы F_Z , действующей в направлении оси Z , использовалась формула [2]

$$F_Z = \left| \frac{\partial W}{\partial Z} \right| = \frac{\partial(LI^2)}{2\partial Z} = \frac{\partial(\omega LI^2)}{2\omega\partial Z} = \frac{\partial Q}{2\omega\partial Z},$$

где W – электромагнитная энергия системы; L – индуктивность системы; I – ток индуктора, ω – круговая частота; Q – реактивная мощность системы «индуктор–заготовка».

Таким образом, зная зависимость реактивной мощности от координаты, можно определить и соответствующие ЭДУ.

Такой достаточно простой подход к решению задач показал свои преимущества и был успешно

Средняя во времени сила F_R , действующая на всю индуктирующую катушку или магнитопровод в направлении оси R , имеет вид

$$F_R = \frac{\partial Q}{2\omega\partial R}.$$

Особенностью индукционного технологического процесса является то, что заготовки нагреваются, а их электротепловые параметры изменяются, причем достаточно сильно. Двумерная электротепловая модель и программа ELTA²⁰ позволяет учитывать изменение температуры загрузки и определять реактивную мощность достаточно точно, чтобы исключить погрешности, связанные с недостаточно корректными заданиями электрических параметров отдельных частей загрузки в процессе расчета.

Для пояснения разработанного алгоритма рассмотрим расчетную схему определения ЭДУ, действующих на загрузку, в процессе выгрузки цилиндрических заготовок из проходного нагревателя полунепрерывного типа в рис. 1.

Технологический процесс реализуется следующим образом. Заготовки поступают в индуктор и с заданным темпом перемещаются слева направо по направляющим, на которых они нахо-

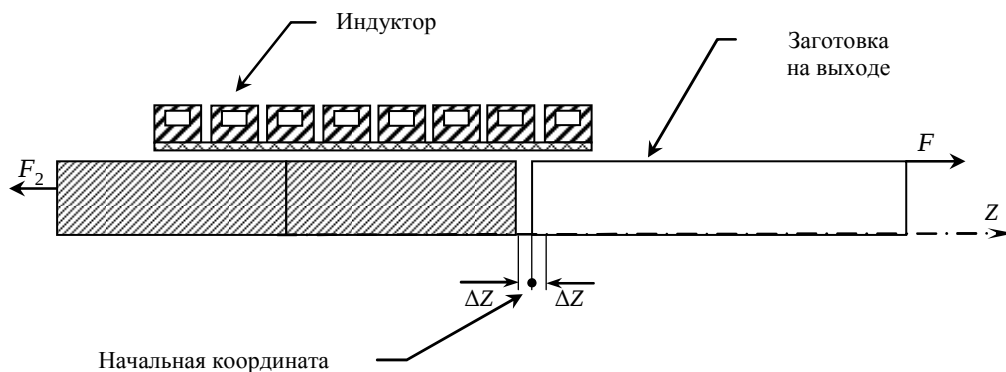


Рис. 1

применен для нахождения усилий, действующих на отдельные заготовки, в ряде работ [2]–[4], [6]. Сравнение с экспериментальными данными выявило хорошую точность расчета осевых усилий, что позволяет считать предложенную методику достоверной и проводить дальнейшие исследования. Однако, в связи с тем что в общем случае ставилась только научная задача изучения характера электродинамических усилий и в основном только постановочная, расчеты проводились вручную, со многими допущениями, чаще всего не соответствующими реальным условиям.

дятся. От момента входа до момента выхода из индуктора они нагреваются. При перемещении последняя заготовка, нагретая до требуемой температуры, должна покинуть индуктор. Вариантов выгрузки и, следовательно, отрыва ее от всего столба заготовок может быть достаточно много. Нас интересует только то, что в определенный момент (во времени и в пространстве) зазор между этой заготовкой и остальными заготовками начнет увеличиваться.

Момент начала перемещения может быть известен или определен. К примеру, при устано-

вившемся процессе нагрева в полунепрерывном нагревателе это – наступление момента выгрузки. Тогда температура заготовок достигнет заданного значения и при расчете усилий можно считать, что она не будет существенно изменяться в дальнейшем.

Первоначальное пространственное расположение загрузки в момент отрыва может быть задано любым в зависимости от того, что должно быть исследовано. Обычно определяется значение оптимального заглубления последней заготовки внутрь индуктора, при котором достигается заданный перепад температуры. Это служит отправной пространственной точкой для расчета ЭДУ при выгрузке нагретой заготовки из индуктора. Последующая заготовка после перемещения должна занять позицию, на которой находилась ранее нагретая заготовка. Это означает, что после перемещения всего столба загрузки левый торец выгружаемой заготовки находится в индукторе на расстоянии, равном величине заглубления в индуктор, а правый торец находится за пределами индуктора на расстоянии, зависящем от длины заготовки. Именно эта начальная координата отрыва заготовки, к примеру с помощью механизма выгрузки, определяет пространственную координату начала расчета.

В ряде случаев, что представляет интерес с точки зрения проверки индукционного нагревателя на соответствие заданной степени жесткости испытаний на ЭММС, пространственное расположение может быть другим. Нагретая заготовка может начать перемещаться гораздо раньше, чем последующая заготовка достигнет своего исходного положения перед выгрузкой. Это определяет разработчик, если варианты возможны. В первую очередь они должны быть рассмотрены с позиций надежности технологического процесса и его безопасности, поскольку усилие в данном случае будет значительно большее, чем обычно.

Таким образом время и пространственное расположение исследуемого варианта определены. Будем считать, что температура заготовок не изменится, поэтому можно провести только расчет внешней электромагнитной задачи и последовательно определить изменение реактивной мощности при изменении координаты. Для того чтобы определить усилие, действующее на заготовку в точке i , достаточно реализовать смещение загрузки на малое перемещение ΔZ в направлении оси Z и такое же перемещение в противоположном

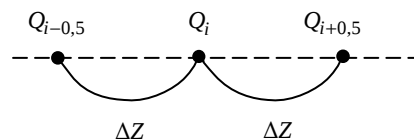


Рис. 2

направлении. Фрагмент расчетной одномерной сетки представлен на рис. 2.

Приращение реактивной мощности ΔQ_i в соответствующем узле пространственной сетки можно определить по формуле

$$\Delta Q_i = \frac{Q_{i-0,5} - Q_{i+0,5}}{2}.$$

Тогда аксиальная составляющая ЭДУ, действующей на одиночный слиток, будет равна

$$F_Z = \frac{Q_{i-0,5} - Q_{i+0,5}}{4\omega\Delta Z}.$$

При нахождении усилий таким методом имеются некоторые расчетные проблемы. Так, основным режимом при расчете интегральных электрических параметров индуктора в программе ELTA²⁰ является задание постоянного напряжения на индукторе, которое может меняться от стадии к стадии в условиях задачи. Обычно в устройствах индукционного нагрева напряжение на индукторе остается постоянным или мало изменяется при перемещении заготовки. Однако если в расчете ЭДУ брать реактивные мощности при постоянном напряжении на индукторе, то результат может оказаться неверным, вплоть до того, что направление силы будет другим, не говоря о модуле. В связи с этим при расчете параметров индуктора при смещении заготовки приходится подбирать ток, который должен быть равен току индуктора при исходном расположении заготовки в индукторе, то есть в точке i .

В случае немагнитной загрузки эта проблема устраняется достаточно просто, надо только пересчитать реактивную мощность индуктора, приведя его к исходному току, взяв отношение квадратов тока при смещении и без него.

При расчете индуктора с ферромагнитной загрузкой ситуация несколько сложнее. Если требуется рассчитать аксиальную составляющую силы, действующей на загрузку в заданной точке i , необходимо рассчитать усилия слева и справа от заданной точки на расстоянии ΔZ . При этом расчеты должны быть проведены при одном и том

же токе индуктора, то есть в точке i . В связи с этим для режима напряжения приходится реализовать несколько итераций расчета внешней и внутренней электротепловых задач в каждой точке посредством изменения величины питающего напряжения.

Следует напомнить, что расчет необходимо проводить при одних и тех же условиях, полученных на данный момент времени (тепловое поле не должно меняться).

Далее приведены стадии расчета аксиальной составляющей силы, действующей на одиночную заготовку в нагревателе полунепрерывного действия, реализованные в модуле EDF среды ELTA2D:

- Создание исходной задачи для расчета параметров нагревателя: задание необходимого числа индукторов и их геометрических характеристик, определение взаимного расположения с учетом используемых направляющих и механизмов перемещения, задание параметров режима нагрева.

- Предварительный расчет параметров выбранной системы и корректировка исходных данных для получения заданных технологических параметров.

- Выбор рациональной компоновки и параметров индукционной установки.

- Анализ компоновки модели индукционного нагревателя и выявление потенциально критических режимов. Формирование пространственной сетки, в узлах которой должен быть осуществлен расчет аксиальной составляющей ЭДУ.

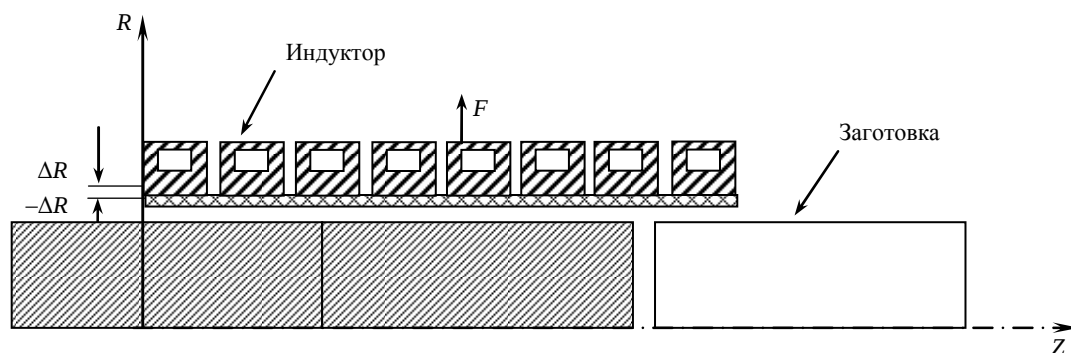


Рис. 3

- Моделирование электротеплового процесса в соответствии с заданным режимом работы.

- Определение значений реактивной мощности в точках $i \pm 0,5$ при заданном состоянии электротеплового поля решением внутренней электротепловой задачи при сохранении температурного поля неизменным по объему загрузки и соответственно внешней электрической задачи.

- Вычисление распределения аксиальной силы F_{Z_i} вдоль оси Z до момента полной выгрузки заготовки из индуктора по заданному значению величины максимального смещения последней заготовки относительно начальной координаты отрыва или относительно другой заданной координаты, к примеру торца индуктора.

- Вычисление разности аксиальной силы и силы трения при заданном значении коэффициента трения заготовки о направляющую.

Результатом расчета является зависимость аксиальной силы F_{Z_i} и разности аксиальной силы и силы трения ΔF_{Z_i} от смещения загрузки ΔZ относительно начальной координаты отрыва или торца индуктора в момент выгрузки последней заготовки.

На основе анализа данного графика разработчику легко оценить степень риска разрабатываемого технологического процесса по критериям надежности и безопасности и сделать заключение о необходимости изменения параметров и конструкции индукционного нагревателя.

Аналогично аксиальной силе F_{Z_i} , среднее значение радиальной составляющей силы F_{R_i} , действующей на всю обмотку индуктора (рис. 3), может быть определено, исходя из соотношения

$$F_{R_i} = \frac{Q_{i-0,5} - Q_{i+0,5}}{4\omega\Delta R}.$$

В большинстве случаев достаточно оценить усилие в виде числового значения при заданном времени расчета. Так же как и в ранее рассмотренном случае, при заданном температурном поле делается расчет внутренней и внешней электромагнитных задач с изменением радиуса индуктора (эквивалентного радиуса при расчете) в большую и меньшую сторону и определяются реактивные мощности.

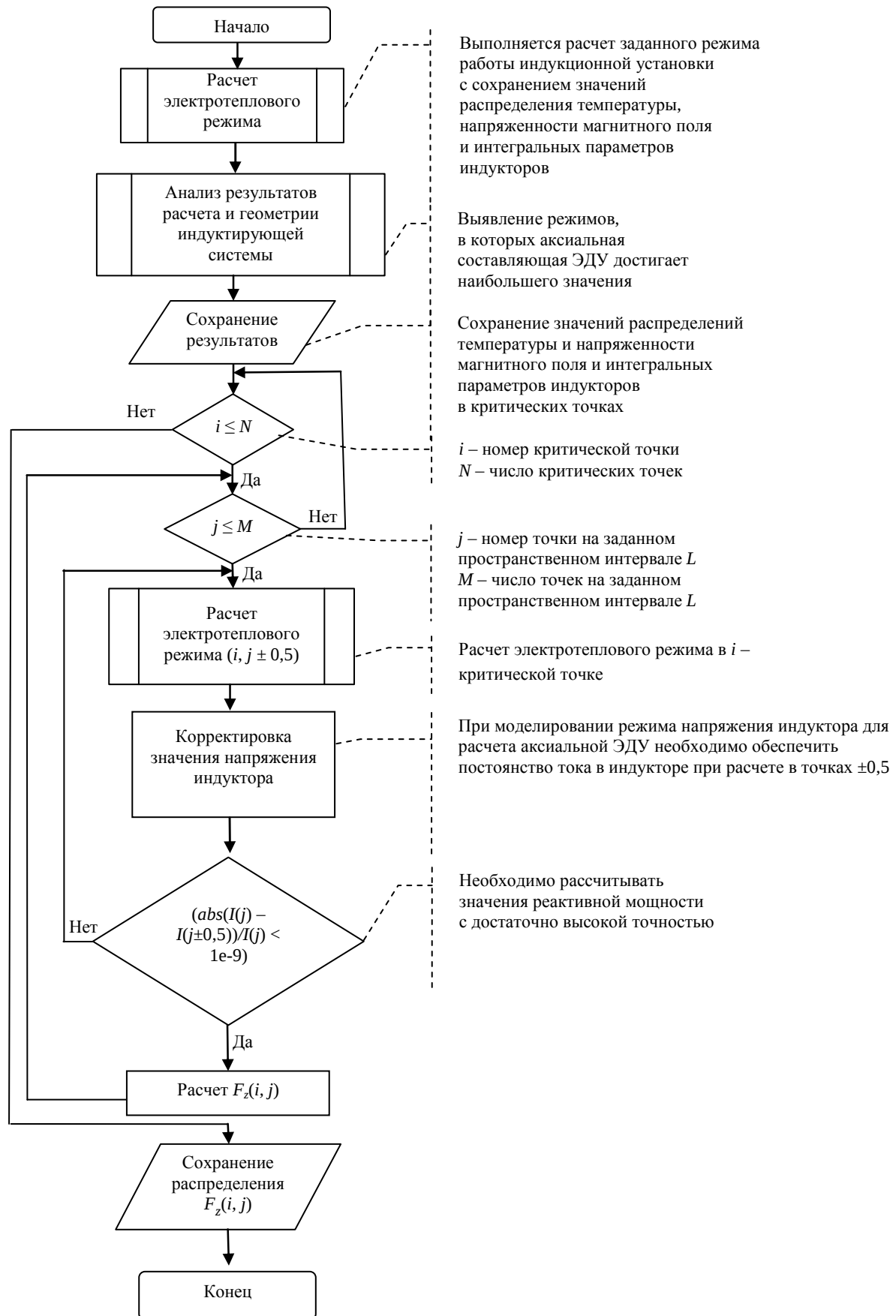


Рис. 4

Далее приведены стадии расчета радиальной составляющей силы, реализованные в модуле EDF среды ELTA²⁰:

- Создание исходной задачи для расчета параметров нагревателя, предварительный расчет параметров выбранной системы и корректировка исходных данных для получения заданных технологических параметров, выбор рациональной компоновки и параметров индукционной установки.
- Анализ компоновки модели индукционных нагревателей и задание условий для расчета радиальных усилий. Формирование пространственной сетки, в узлах которой должен быть осуществлен расчет радиальной составляющей ЭДУ.
- Определение значений реактивной мощности в точках $i \pm 0,5$ при заданном состоянии электроплавильного поля.
- Вычисление суммарного значения радиальной силы F_{R_i} , действующей на витки рассматриваемого индуктора.

Расчеты реактивной мощности проводятся при одном и том же токе индуктора, соответствующем току в точке i , с помощью введения корректировки величины питающего напряжения в точках $i \pm 0,5$ и использования дополнительных итераций при расчете электромагнитных задач до получения требуемой точности расчета.

На рис. 4 приведена структурная схема алгоритма расчета аксиальной и радиальной составляющих ЭДУ.

На основе анализа значения суммарного усилия, действующего на индуктор, разработчик может оценить прочность выбранного токопровода, статические и динамические напряжения на элементы катушки и сделать заключение о необходимости изменения параметров и конструкции индукционного нагревателя. Если индуктор состоит из одного витка, то рассчитанное усилие полностью приложено к нему. Если же индуктирующая катушка имеет много витков, суммарное усилие распределяется между этими витками: в центральной части оно максимальное, а к торцевым частям уменьшается за счет снижения аксиальной составляющей индукции магнитного поля. Расчет и анализ распределения аксиальной и радиальной составляющих ЭДУ, действующих на отдельные витки индуктора, должен проводиться отдельно.

Аналогично составлен алгоритм и программа расчета для магнитопровода. При использовании двумерного расчета магнитопровод представляется цилиндрическим. Если магнитопровод имеет другую форму, требуются трехмерные программы расчета.

Для одновременного режима работы алгоритм остается почти таким же. Изменения касаются только параметров смещения, которое может быть принято относительно центра индуктора или одного из его торцов. Программа сама определяет, по какому алгоритму пойдет расчет, в зависимости от типа нагревателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буканин В. А., Иванов А. Н. Электромагнитно-механическая совместимость индукционных нагревателей // Индукционный нагрев. 2012. № 19. С. 43–47.
2. Немков В. С., Демидович В. Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. 280 с.
3. Буканин В. А., Клещев В. В., Немков В. С. Электродинамические усилия при индукционном нагреве цилиндрических немагнитных слитков // Электротермия. 1978. Вып. 10. С. 9–10.
4. Буканин В. А. Обеспечение безопасности при проектировании и эксплуатации индукционных электротермических установок. СПб.: ОАО «Искусство России», 2011. 176 с.
5. Буканин В. А., Иванов А. Н. Некоторые вопросы безопасности индукционных электротермических установок // Безопасность труда в промышленности. 2012. № 8. С. 28–32.
6. Буканин В. А., Иванов А. Н. Электродинамические усилия в индукционных системах // Индукционный нагрев. 2012. № 20. С. 9–13.

A. N. Ivanov

CALCULATION OF ELECTRODYNAMIC FORCES IN INDUCTION HEATING DEVICES

This article focuses on the problems of calculation axial and radial electrodynamic forces (EDF) in induction heating systems. The described method allows to calculate with reasonable accuracy the average values of the radial and axial components of the EDF. A scheme of the algorithm and the results of calculations obtained using electrothermal analysis software ELTA²⁰.

Induction heating, electrodynamic forces, technological reliability, safety

УДК 621.313.

М. А. Ваганов, И. А. Пименова

Особенности синхронного неявнополюсного генератора при учете активного сопротивления обмотки статора

Анализируется математическая модель синхронного неявнополюсного генератора, составленная при учете активного сопротивления обмотки статора и позволяющая выявить ряд особенностей этих машин в общем случае, без относительно к их мощности и скорости вращения. Такая модель дает также возможность получить количественную оценку значений угла нагрузки, перегрузочной способности и коэффициента мощности генератора.

Относительный параметр; коэффициент возбуждения; функции тока, угла нагрузки, активной и электромагнитной мощностей; угловая характеристика; КПД статора; оптимальное значение коэффициента мощности генератора

При исследовании установившихся режимов работы синхронных машин в большинстве случаев активное сопротивление обмотки статора r_1 не учитывается, так как это сопротивление, как правило, на порядок меньше синхронного индуктивного сопротивления обмотки статора по продольной оси x_d и падение напряжения на этом сопротивлении пренебрежимо мало по сравнению с падениями напряжения на синхронных индуктивных сопротивлениях обмотки статора по продольной x_d и поперечной x_q осям.

Синхронные генераторы работают, как правило, параллельно с сетью, и уравнение напряжения по второму закону Кирхгофа для одной из фаз обмотки статора может быть записано в следующем виде;

$$\dot{U}_c + \dot{E}_1 = \dot{I}_1 r_1 + jx_d \dot{I}_1, \quad (1)$$

где $\dot{U}_c$ – вектор фазного напряжения сети; $\dot{E}_1$ – вектор ЭДС возбуждения, индуцированной в обмотке статора потоком возбуждения Φ_2 ; $\dot{I}_1$ – вектор фазного тока обмотки статора.

Вводя обозначение $(-\dot{U}_c) = \dot{U}_1$, выражение (1) перепишем в форме

$$\dot{E}_1 = \dot{U}_1 + \dot{I}_1 r_1 + jx_d \dot{I}_1, \quad (2)$$

На основании выражения (2) построена векторная диаграмма синхронного неявно-полюсного генератора (СНГ) при перевозбуждении и представленная на рис. 1. На векторной диаграмме

ме приняты следующие обозначения: d_3 – продольная ось эквивалентного генератора сети; d , q – продольная и поперечная оси рассматриваемого синхронного генератора; ϕ_1 – фаза вектора тока $\dot{I}_1$ относительно вектора напряжения $\dot{U}_1$; θ – угол нагрузки; ψ_1 – фаза вектора тока $\dot{I}_1$ обмотки статора относительно ЭДС возбуждения $\dot{E}_1$.

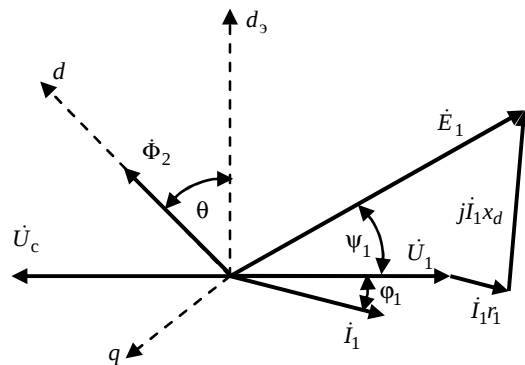


Рис. 1

Используя данную векторную диаграмму, составим систему алгебраических уравнений в проекциях на линию вектора напряжения $\dot{U}_1$ и на направление, ему перпендикулярное:

$$E_1 \cos \theta - I_1 x_d \sin \phi_1 - \dot{I}_1 r_1 \cos \phi_1 = U_1, \quad (3)$$

$$E_1 \sin \theta - I_1 x_d \cos \phi_1 + \dot{I}_1 r_1 \sin \phi_1 = 0. \quad (4)$$

Решение этих уравнений относительно тока обмотки статора I_1 и угла нагрузки θ имеет вид

$$I_1 = \frac{U_1}{r_1} F_I, \quad (5)$$

$$\theta = \arccos F_\theta, \quad (6)$$

$$F_I = \frac{-(x_{d*} \sin \varphi_1 + \cos \varphi_1) + \sqrt{k_B^2 (1 + x_{d*}^2) - (x_{d*} \cos \varphi_1 - \sin \varphi_1)^2}}{1 + x_{d*}^2}, \quad (7)$$

$$F_\theta = \frac{1}{k_B} [1 + F_I (\cos \varphi_1 + x_{d*} \sin \varphi_1)], \quad (8)$$

$$x_{d*} = x_d / r_1, \quad (9)$$

$$x_{d*} = E_1 / U_1, \quad (10)$$

где F_I – функция тока обмотки статора; F_θ – функция угла нагрузки; x_{d*} – относительный параметр; k_B – коэффициент возбуждения.

При параллельной работе синхронного генератора с сетью напряжение U_1 фиксировано и коэффициент возбуждения характеризует уровень ЭДС возбуждения относительно этого напряжения. Активное сопротивление r_1 обмотки статора быстро уменьшается с повышением мощности синхронного генератора.

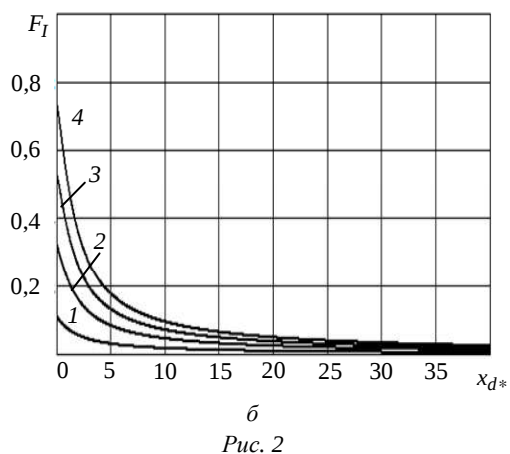
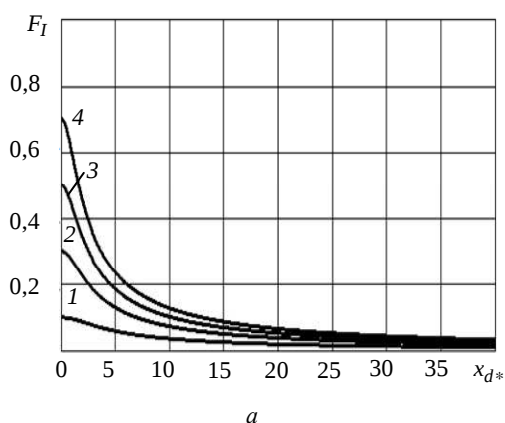


Рис. 2

Сопротивления r_1 и x_d уменьшаются при возрастании мощности синхронной машины, но сопротивление r_1 уменьшается быстрее, что со-

провождается увеличением x_{d*} с возрастанием мощности генератора, и малым значениям x_{d*} соответствуют синхронные генераторы небольшой мощности. В силу этого анализ каких-либо показателей качества синхронного генератора в плоскости параметра x_{d*} эквивалентен оценке влияния мощности генератора на эти показатели. И такая оценка оказывается справедливой во всем диапазоне мощностей синхронных машин. Прежде всего это утверждение относится к функциям тока и угла нагрузки.

На рис. 2 графически представлена зависимость $F_I = f(x_{d*})$, определяемая выражением (7), для четырех значений коэффициента возбуждения $k_B = 1,1; 1,3; 1,5; 1,7$ (кривые 1, 2, 3 и 4 соответственно) и двух значений коэффициента мощности: $a - \cos \varphi_1 = 1$ (что соответствует нормальному возбуждению) и $б - \cos \varphi_1 = 0,9$ при перевозбуждении.

Все кривые с увеличением параметра x_{d*} монотонно затухают. Повышение коэффициента возбуждения k_B сопровождается возрастанием значений функции F_I (соответствующие кривые смещаются вверх), т. е. ток I_1 увеличивается. Снижение коэффициента мощности $\cos \varphi_1$ вызывает также некоторое увеличение тока I_1 за счет появления реактивной составляющей этого тока.

Графики функции угла нагрузки синхронного неявнополюсного генератора $\theta = f(x_{d*})$, определяемой выражениями (6) и (8), представлены на рис. 3 для четырех значений коэффициента возбуждения $k_B = 1,1; 1,3; 1,5; 1,7$ (с кривые 1, 2, 3 и 4 соответственно) и трех значений коэффициента мощности: $a - \cos \varphi_1 = 1$ (соответствует нормальному возбуждению синхронного генератора); $б - \cos \varphi_1 = 0,9$; $в - \cos \varphi_1 = 0,8$ при перевозбуждении.

С увеличением мощности синхронного генератора (параметр k_B растет) угол нагрузки возрастает при фиксированном значении коэффици-

ента возбуждения k_B независимо от коэффициента мощности генератора $\cos \varphi_1$. Повышение коэффициента мощности генератора $\cos \varphi_1$ сопровождается снижением угла нагрузки, так как при этом уменьшается активная мощность генератора. При коэффициентах мощности $\cos \varphi_1 = 0,9$ и $0,8$ и при коэффициентах возбуждения $k_B = 1,5 \dots 1,7$ (рис. 3, б и в) угол нагрузки θ составляет $25 \dots 32^\circ$, что согласуется с номинальными значениями углов нагрузки синхронных неявнополюсных генераторов мощностью от нескольких киловатт и выше. Следует также отметить, что при $x_{d*} > 20$ угол нагрузки практически остается постоянным при фиксированном значении коэффициента возбуждения k_B . Повышение коэффициента возбуждения k_B приводит к увеличению угла нагрузки. Но при этом перегрузочная способность генератора снижается.

В синхронных неявнополюсных генераторах малой мощности (мощностью в пределах одного киловатта), для которых значение параметра $x_{d*} < 3$, числовое значение этого параметра оказывает существенное влияние на угол нагрузки синхронного неявнополюсного генератора. В частности, уменьшение x_{d*} сопровождается быстрым снижением угла нагрузки (начала графиков на всех трех частях рис. 3).

Решение системы уравнений (3) и (4) относительно активной $I_1 \cos \varphi_1$ и реактивной $I_1 \sin \varphi_1$ составляющих тока обмотки статора имеет вид

$$I_1 \cos \varphi_1 = \frac{U_1}{r_1} \frac{(k_B \cos \theta - 1) + k_B x_{d*} \sin \theta}{1 + x_{d*}^2}, \quad (11)$$

$$I_1 \sin \varphi_1 = \frac{U_1}{r_1} \frac{(k_B \cos \theta - 1)x_{d*} - k_B \sin \theta}{1 + x_{d*}^2}, \quad (12)$$

и отсюда – действующее значение тока обмотки статора синхронного неявнополюсного генератора $I_1 = \sqrt{(I_1 \sin \varphi_1)^2 + (I_1 \cos \varphi_1)^2}$. При учете (11) и (12), а также активного сопротивления обмотки статора получим следующее окончательное выражение для тока обмотки статора:

$$I_1 = \frac{U_1}{r_1} \sqrt{\frac{k_B^2 - 2k_B \cos \theta + 1}{1 + x_{d*}^2}}. \quad (13)$$

Выражения (11)–(13) определяют соответствующие токи обмотки статора синхронного неявнополюсного генератора в функции угла нагрузки θ .

Из сравнения выражений (5) и (13) получим еще одно выражение для функции тока синхронного неявнополюсного генератора

$$F_{I\theta} = \sqrt{\frac{k_B^2 - 2k_B \cos \theta + 1}{1 + x_{d*}^2}}, \quad (14)$$

но в зависимости от угла нагрузки синхронного генератора θ с учетом возможных изменений коэффициента возбуждения k_B и относительного параметра x_{d*} .

Активная мощность на зажимах m_1 -фазной обмотки статора синхронного генератора $P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1$ может быть представлена как разность электромагнитной мощности $P_{эм}$, передаваемой вращающимся магнитным полем через воздушный зазор от ротора к статору, и электри-

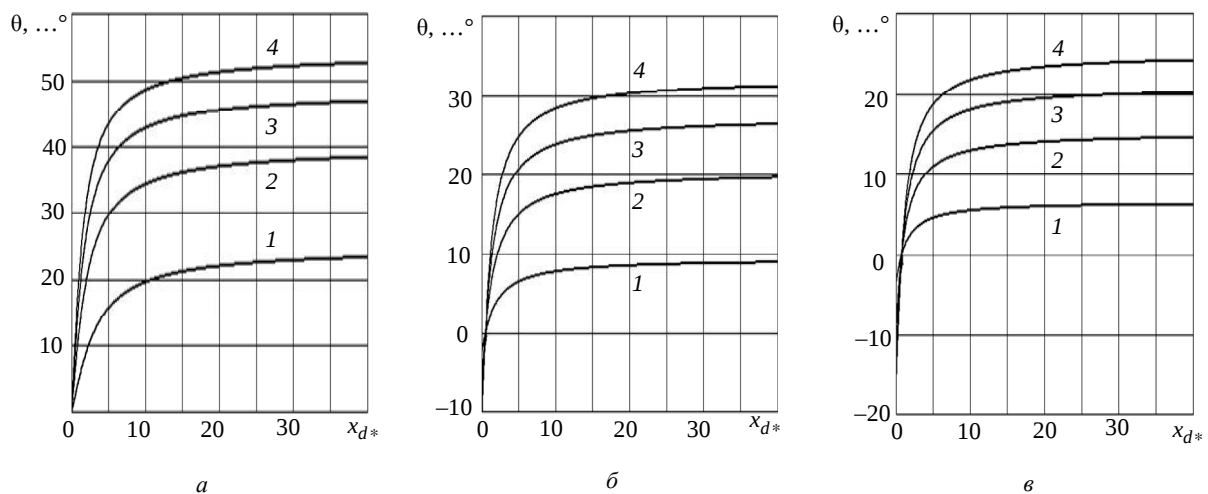


Рис. 3

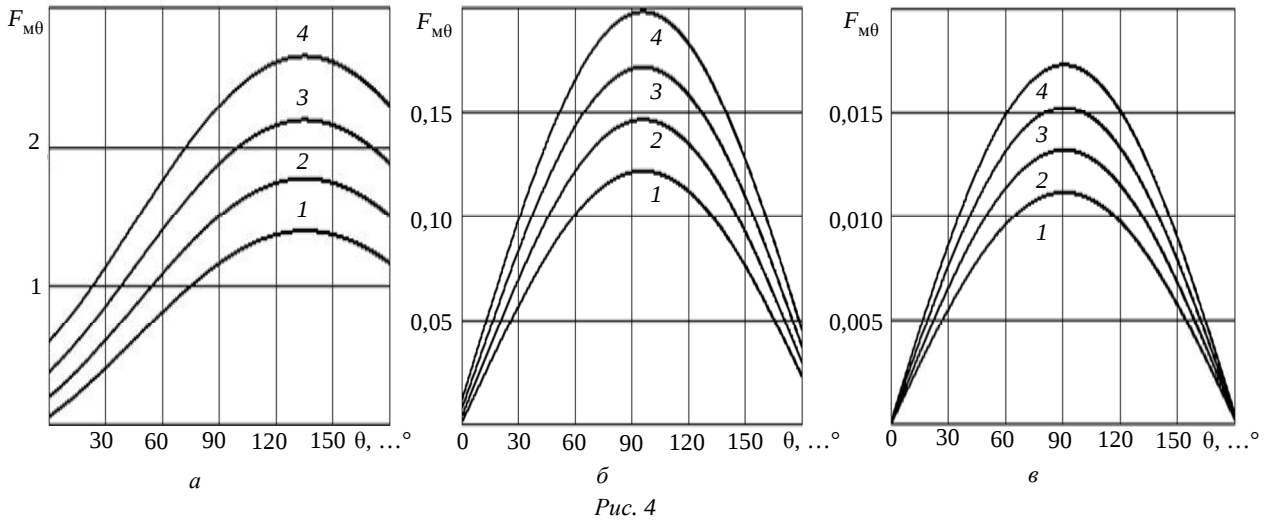


Рис. 4

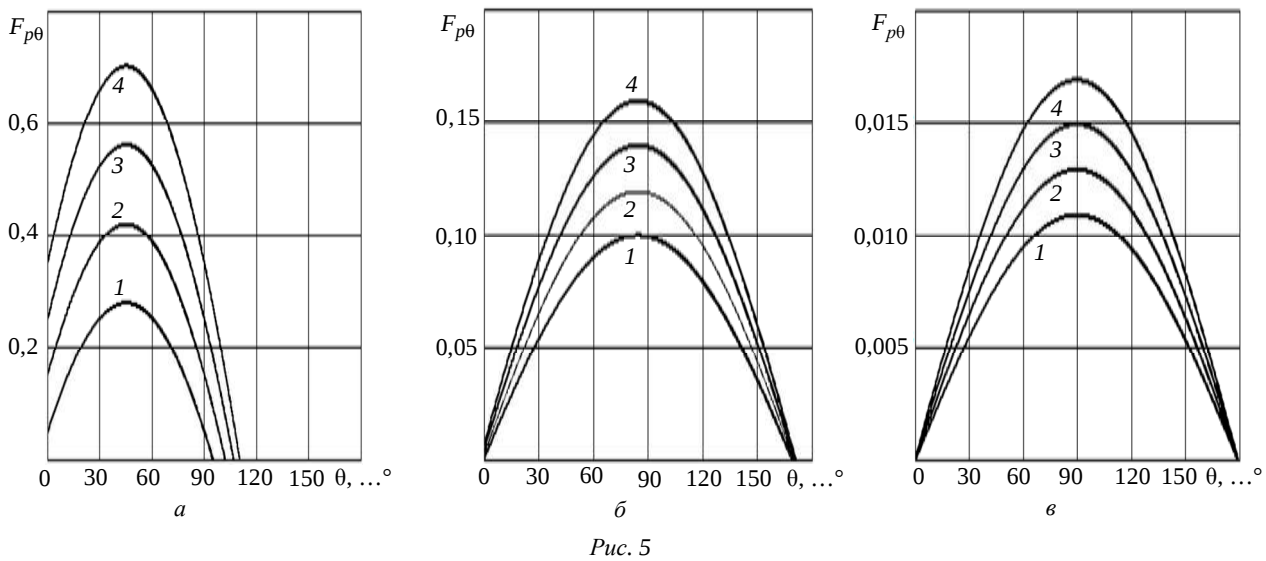


Рис. 5

ческих потерь в обмотке статора $P_{M1} = m_1 I_1^2 r_1$. И тогда $P_{эм} = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1 + m_1 I_1^2 r_1$. Учитывая (5) и (7), получим

$$P_1 = m_1 \frac{U_1^2}{r_1} F_p, \quad P_{эм} = m_1 \frac{U_1^2}{r_1} F_M, \quad (15)$$

$$F_p = F_I \cos \varphi_1, \quad F_M = F_I (\cos \varphi_1 + F_I), \quad (16)$$

а при учете (11) и (13) –

$$P_1 = m_1 \frac{U_1^2}{r_1} F_{p\theta}, \quad P_{эм} = m_1 \frac{U_1^2}{r_1} F_{M\theta}, \quad (17)$$

$$F_{M\theta} = \frac{k_B^2}{1 + x_{d*}^2} - \frac{k_B}{1 + x_{d*}^2} \cos \theta + \frac{k_B x_{d*}}{1 + x_{d*}^2} \sin \theta, \quad (18)$$

$$F_{p\theta} = -\frac{1}{1 + x_{d*}^2} + \frac{k_B}{1 + x_{d*}^2} \cos \theta + \frac{k_B x_{d*}}{1 + x_{d*}^2} \sin \theta. \quad (19)$$

Выражения (18) и (19) определяют функции электромагнитной $F_{M\theta}$ и активной $F_{p\theta}$ мощностей синхронного неявнополюсного генератора в зависимости от угла нагрузки θ . Соответствующие графические зависимости представлены на рис. 4 и 5 и построены при четырех значениях коэффициента возбуждения $k_B = 1,1; 1,3; 1,5; 1,7$ (кривые 1, 2, 3 и 4 соответственно) и при следующих значениях параметра $x_{d*} = 1, 10$ и 100 (рис. 4, а, б, в и 5 а, б, в соответственно).

Зависимости $F_{M\theta} = f(\theta)$ и $F_{p\theta} = f(\theta)$, определяемые выражениями (18) и (19), представляют собой хорошо известные угловые характеристики синхронных машин [1]. Угловая характеристика без учета активного сопротивления обмотки статора определяется выражением [1]

$$P_{эм} = \frac{m_1 U_1 E_1}{x_d} \sin \theta. \quad (20)$$

Из выражений (18) и (19) видно, что каждая из функций имеет три слагаемых. Третьи слагаемые пропорциональны синусу угла нагрузки θ , как и $P_{эм}$ в выражении (20). Вторые слагаемые зависят от косинуса угла нагрузки θ , но различаются знаком. В функции электромагнитной мощности это слагаемое отрицательно и вызывает снижение $F_{m\theta}$ и увеличение $F_{p\theta}$. Первые слагаемые различаются знаком и от угла нагрузки вообще не зависят, определяя постоянную составляющую электромагнитной и полезной активной мощностей, которая существует при любом угловом положении ротора и обусловлена только активным сопротивлением обмотки статора. При учете первого слагаемого электромагнитная мощность возрастает, а активная – снижается. Числовые значения всех трех слагаемых соизмеримы при значениях x_{d*} , близких к 1. С возрастанием x_{d*} значимость первых двух слагаемых быстро снижается и определяющим становится третье слагаемое, которое, в конечном итоге, определяет вид угловой характеристики синхронной неявнополюсной синхронной машины и используется на практике независимо от мощности машины.

Несинусоидальность угловых характеристик синхронных машин при учете активного сопротивления обмотки статора отмечена в [2].

Рассмотрим электрический КПД статора без учета магнитных потерь в стали статора η_3 как отношение полезной активной мощности на зажимах обмотки статора P_1 к электромагнитной мощности генератора $P_{эм}$, т. е. $\eta_3 = P_1 / P_{эм}$, и при учете (15) и (16) окончательно получим

$$\eta_3 = \frac{\cos \phi_1}{\cos \phi_1 + F_I}. \quad (21)$$

Из выражения (21) следует, что электрический КПД η_3 статора существенно зависит от коэффициента мощности генератора $\cos \phi_1$. На рис. 6 представлены графики $\eta_3 = f(\phi_1)$ для четырех значений коэффициента возбуждения $k_B = 1,1; 1,3; 1,5; 1,7$ (кривые 1, 2, 3 и 4 соответственно) и при значениях параметра $x_{d*} = 1, 10$ и 100 (рис. 6, а, б, в соответственно).

Анализ выражения (21) и графики на рис. 6 показывают, что данное выражение действительно имеет максимум по коэффициенту мощности $\cos \phi_1$. Оптимальные значения $\sin \phi_{1m}$ и $\cos \phi_{1m}$, соответствующие максимуму электрического КПД статора η_3 , определяются выражениями

$$\sin^2 \phi_{1m} = \frac{x_{d*}^2}{\sqrt{1+x_{d*}^2}} \frac{(k_B^2 + 1) \sqrt{1+x_{d*}^2} - 2k_B}{(k_B^2 - 1)^2 + x_{d*}^2 (k_B^2 + 1)^2}, \quad (22)$$

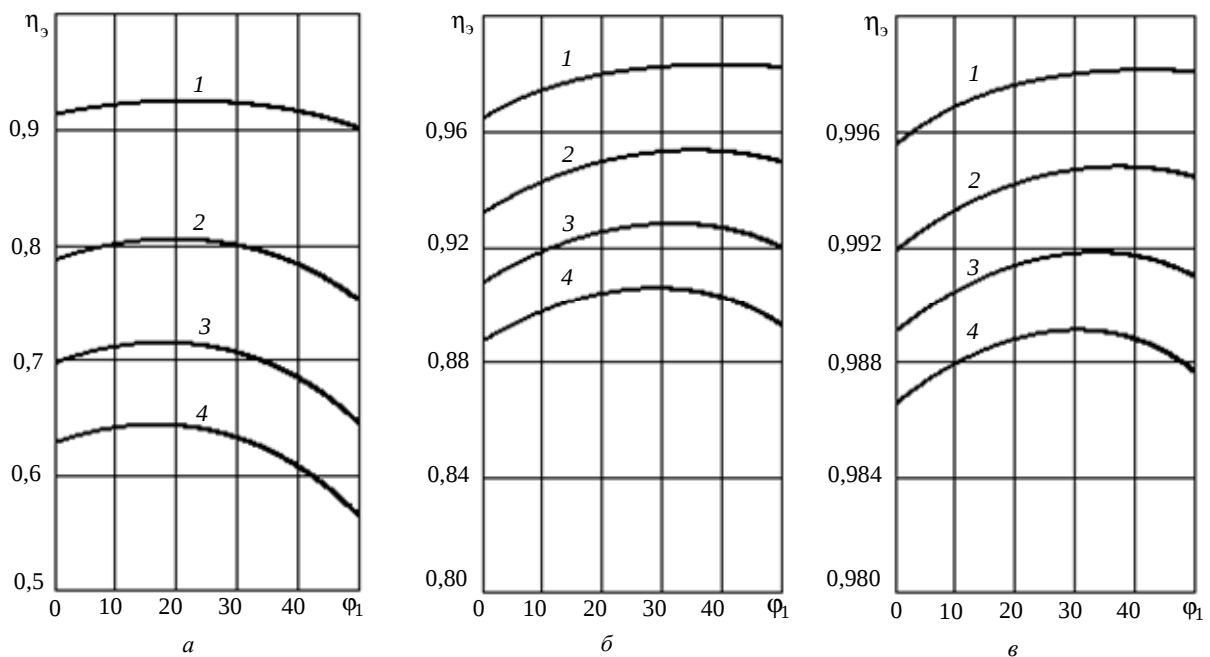


Рис. 6

$$\cos^2 \varphi_{1m} = 1 - \sin^2 \varphi_{1m}$$

и тогда максимум электрического КПД статора

$$\eta_3 = \frac{\cos \varphi_{1m}}{\cos \varphi_{1m} + F_I} \quad (23)$$

На рис. 7 представлены зависимости $\eta_3 = f(x_{d*})$ и $\eta_{3m} = f(x_{d*})$ для четырех значений коэффициента возбуждения $k_B = 1,1; 1,3; 1,5; 1,7$ при коэффициенте мощности $\cos \varphi_{1m} = 1$. На рис. 7 сплошным линиям соответствует зависимость $\eta_3 = f(x_{d*})$, а пунктирные линии, определяющие η_{3m} , располагаются выше. С увеличением параметра x_{d*} кривые сближаются, но всегда $\eta_{3m} > \eta_3$. Из этого следует, что работа синхронного генератора с «опережающим» коэффициентом мощности сопровождается повышением его КПД, т. е. экономически оправданна, так как не только возрастает пропускная способность линии электропередачи, но и улучшаются показатели работы самого синхронного генератора.

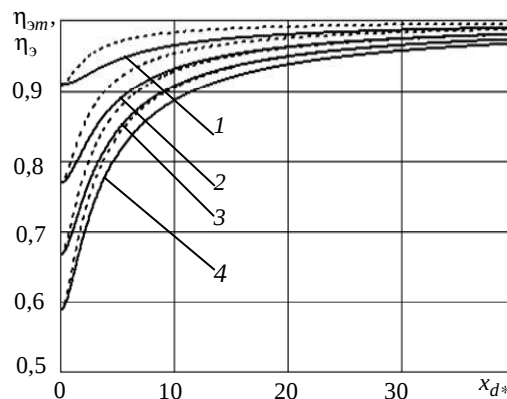


Рис. 7

Таким образом, учет активного сопротивления обмотки статора позволяет внести ряд принципиальных уточнений в математическую модель синхронного неявнополюсного генератора применительно к установившемуся режиму работы. В частности, получено точное выражение для угловых характеристик синхронного генератора, а также теоретически доказана целесообразность работы синхронного неявнополюсного генератора в режиме перевозбуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов В. В., Вольдек А. И. Электрические машины. СПб.: Питер, 2007.

2. Осин И. Л., Юферов Ф. М. Электрические машины. М.: Изд-во МЭИ, 2003.

M. A. Vaganov, I. A. Pimenova

FEATURES OF SYNCHRONOUS IMPLIED POLE GENERATOR WITH REGARD TO ACTIVE RESISTANCE OF STATOR WINDING

We will analyse a math model of synchronous implied pole generator, which is made with regard to active resistance of stator winding and which allows to reveal a number of features of these machines in general, regardless of their capacity. Also, this model provides an opportunity to get a quantitative estimate of the angle load, overload capacity and power factor of the generator.

Relative parameter; the coefficient of excitation; the stream function of the load angle, active and electromagnetic power; angle characteristics; stator efficiency; the optimal value of the power factor of the generator

УДК 621-075.8

М. П. Белов

Применение генетических алгоритмов для параметрической оптимизации электромеханических систем дробильных агрегатов

Рассматривается применение генетических алгоритмов для параметрической оптимизации электромеханических систем дробильных агрегатов. Выводятся основные математические зависимости энергий, затрачиваемых на дробление, разработан алгоритм оптимизации и получены результаты оптимизации.

Электромеханическая система, генетический алгоритм, электропотребление, функционал качества

Дробильное оборудование работает, как правило, длительно в непрерывном режиме. Энергия, потребляемая из сети, распределяется на составляющие, расходуемые на технологическую переработку вещества; изменение кинетической энергии движущихся элементов; деформацию податливых элементов механической части электроприводов; трение в опорах; индуктивных и емкостных элементах электрической части электроприводов; активные потери в обмотках силовых элементов электрической части и электродвигателя. Энергия, расходуемая на технологическую переработку вещества, зависит от физических свойств и размеров исходного материала, скоростей движения исполнительных органов и может существенно меняться при варьировании режимов работы оборудования и видов обрабатываемых веществ.

Процесс дробления является энергозатратным, поэтому в настоящее время для снижения энергопотребления производители дробильного оборудования идут по двум путям: 1) применяют современные средства автоматизации с высоким КПД; 2) разрабатывают алгоритмы управления режимами дробления, позволяющие сократить энергопотребление. В связи с этим в статье рассматривается применение генетических алгоритмов для параметрической оптимизации электромеханических систем дробильных агрегатов

На рис. 1 приведена функциональная схема одного из вариантов дробильного комплекса, где на первой стадии дробления используется конусная дробилка (мощность ее электропривода со-

ставляет 107.5 кВт); на второй стадии – роторная дробилка (мощностью 132 кВт). К вспомогательному оборудованию относятся: семь питателей (конвейеров) мощностью 5.5 кВт; грохот мощностью 15 кВт; четыре бункера; склад готового продукта после первого этапа дробления. Общая мощность электроприводов дробильного комплекса составляет 293 кВт, все электроприводы выполнены на базе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. В систему управления входят датчики, которые контролируют массу на входе конусной дробилки; наличие металлических предметов в общей массе вещества; скорости конвейеров; массу дробимого материала на выходе комплексов. Кроме этого применяются датчики уровня; вибраций корпуса установки; температуры опор; переполнения входного бункера. Общее управление камнедробильным комплексом осуществляется программируемым контроллером (КТ) фирмы «Omron».

В состав контроллера входят: NT-терминал; ручной пульт управления; четыре аналоговых модуля ввода/вывода на восемь входов и восемь выходов; два температурных модуля (для контроля температуры подшипников). Количество модулей обусловлено количеством датчиков, контролирующих различные технологические и технические параметры. В контроллер также входит флэш-память, на которой записаны основные предустановочные параметры для процесса дробления. Вся информация о процессе дробления отображается на NT-терминале.

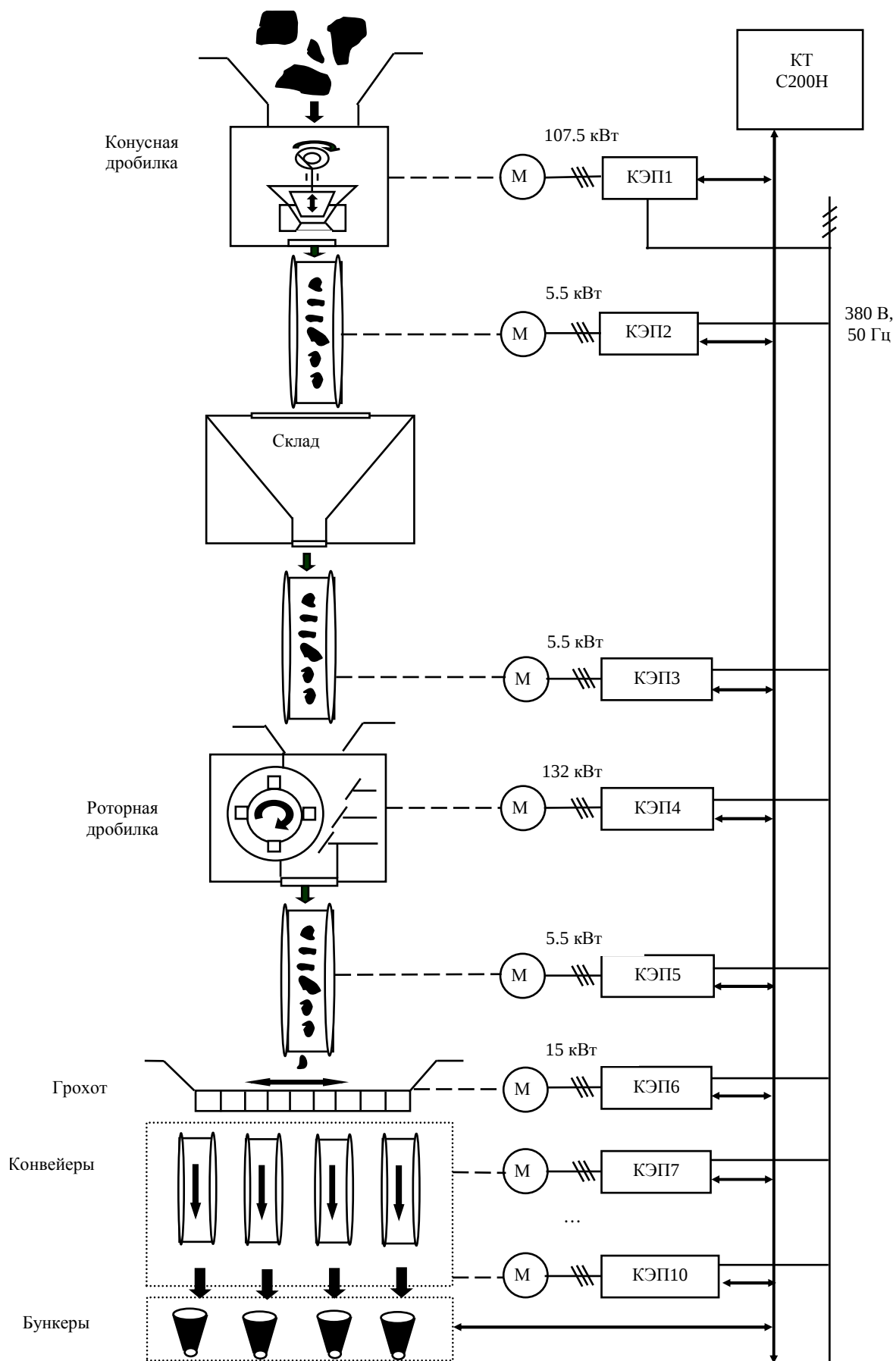


Рис. 1

Дробление заключается в следующем. Камни размером 60...90 см поступают на вход конусной дробилки и дробятся. Далее они по конвейеру поступают на склад. Со склада по конвейерам (питателям) камни следуют на второй этап переработки в роторную дробилку (дробятся до размера 0...200 мм). Раздробленный материал по конвейеру направляется в грохот, где сортируется на четыре группы (по размерам), затем распределяется по бункерам, содержащим в продукте окончательного дробления материал с размером частиц 0...3, 3...8, 8...15, 15...25 мм.

Центральное место в дробильных комплексах занимают дробильные агрегаты, различающиеся между собой способом разрушения исходного вещества. Им в соответствии с технологией режимно подчинены питатели (транспортеры) и грохоты. В связи с этим основное внимание в разработке алгоритмов оптимизации уделяется именно дробильным агрегатам.

Оптимизация объединяет две задачи:

1) для заданной производительности дробильного агрегата обеспечить минимальное электропотребление при произвольном временном варьировании массы, размера и физических свойств вещества;

2) обеспечить максимальную производительность дробильного агрегата с ограничением мощности электропотребления в системах автономного питания при произвольном временном варьировании массы, размеров и физических свойств вещества.

При дроблении в настоящее время реализуются алгоритмы оптимизации, осуществляющие две задачи:

1) для заданной производительности дробильного агрегата обеспечить минимальное электропотребление при произвольном временном варьировании массы, размера и физических свойств вещества;

2) обеспечить максимальную производительность дробильного агрегата с ограничением мощности электропотребления в системах автономного питания при произвольном временном варьировании массы, размеров и физических свойств вещества.

Для решения сформулированных задач оптимизации необходимо иметь математические модели дробильных агрегатов, отражающие физику и энергетику процесса дробления вещества.

Независимо от типов дробильных агрегатов их математическое описание имеет общую осно-

ву, которая в наибольшей степени выражена для роторных дробилок [1].

Для оптимизации процесса дробления необходимо иметь информацию о следующих переменных: $m_1(t)$, $m_2(t)$ – текущие значения масс вещества на входе и на выходе дробилки; $\omega_p(t)$, $M_p(t)$, $i_p(t)$ – частота вращения, момент и ток ротора; $P_c(t)$, $i_c(t)$ – мощность и ток электросети. Размеры и физические свойства вещества непосредственно измерены быть не могут и оцениваются косвенно в процессе управления. К ним относятся переменные $d_1(t)$, $\sigma_p(t)$, δ – условный диаметр вещества на входе дробилки (при его представлении в шарообразном виде), предел прочности материала при растяжении, плотность дробимого вещества соответственно.

Основные зависимости, определяющие затраты электроэнергии при изменении свойств вещества и производительности, определяются из уравнения баланса мощностей

$$P_c = P_{уд} + P_{т. в} + P_k + P_{д. п} + P_{и} + P_e + (1) \Delta P_{\Sigma},$$

где P_c – мощность, потребляемая из сети; $P_{уд}$ – мощность удара; $P_{т. в}$ – мощность, затрачиваемая на трение вещества о ротор и на циркуляцию воздушных потоков; $P_k = \sum J_i \omega_i d\omega_i / dt$ – мощность, затрачиваемая на изменение кинетической энергии движущихся элементов механической части электропривода; $P_{д. п} = \sum J_i \phi_i d\phi_i / dt$ – мощность, затрачиваемая на деформацию элементов механической части электропривода; $P_{и} = \sum L_i i_i di_i / dt$, $P_e = \sum C_i U_i dU_i / dt$ – доли мощности, затрачиваемые в индуктивных и емкостных элементах электрической части электропривода; ΔP_{Σ} – мощность активных потерь в обмотках элементов электрической части и потерь из-за наличия трения в механической части привода.

Мощность удара может быть раскрыта в следующем виде:

$$P_{уд} = P_{д. к} + P_{д. в} + P_{р. в} + \Delta P_{\Sigma 2}, \quad (2)$$

где $P_{д. к}$ – мощность, затрачиваемая на деформацию элементов конструкций дробилки (отражательных плит, корпуса); $P_{д. в}$ – мощность, затрачиваемая на деформацию вещества; $P_{р. в}$ – мощность, затрачиваемая на разрушение вещества до размера щели; $\Delta P_{\Sigma 2}$ – суммарные потери мощности, образовавшиеся от трения в опорах отражательных плит.

Составляющие $P_{д. в}$ и $P_{р. в}$ совместно образуют мощность, затрачиваемую на дробление: $P_{др} = P_{д. в} + P_{р. в}$. Составляющие мощности удара $P_{уд}$ количественно зависят от параметров дробилки, свойств и размеров вещества, режима дробления и определяются в виде производных соответствующих составляющих энергий (их описание приведено в [1]): $E_{д. к}$, $E_{т. в}$, $E_{д. в}$, $E_{др}$, $\Delta E_{\Sigma 2}$.

Экономичность работы электропривода оценивается на заданном временном интервале T_0 в виде отношения затраченной энергии дробления $E_{др} = \int P_{др}(t) dt$ и потребляемой за это время электроэнергии $E_э = \int P_э(t) dt$, т. е. $\eta = E_{др} / E_э$. Производительность дробилки может быть оценена на том же интервале T_0 в виде $\Pi = \int m_2(t) d(t) / T_0$. Функционалом качества системы может быть принята оценка на интервале T_0 в виде

$$Q = \left(\int P_{др}(t, d_1, \sigma_p, \delta, \omega_p) dt / \left(\int m_2(t) dt \right) \right). \quad (3)$$

При проведении оптимизации с помощью ГА в качестве хромосом были выбраны: $m_1(t)$, $m_2(t)$, $\omega_p(t)$, $M_p(t)$, $i_p(t)$, $P_c(t)$, $i_c(t)$, $d_1(t)$, $\sigma_p(t)$, δ , а также все вышеперечисленные энергии. В качестве критерия останова работы программы, реализующей ГА, были выбраны значения заданной производительности и показатель минимума электропотребления.

% Программа реализации ГА, написанная в Matlab

% число битов в хромосоме

Nb = 20;

% число хромосом

Mx = 18;

% число поколений

Last = 75;

% уровень отбора

sel = 0.25;

Mx2 = 2*ceil(sel*Mx/2); % число хромосом

kept mutr = 0.01; % частота появления мутаций

nmut = mutr*Nb*(Mx - 1); % число мутаций

% создает Mx случайные хромосомы с Nb битами

pop = round(rand(Mx, Nb)); % исходная популяция

for ib = 1:last

% функция стоимости

cost = costfunction(pop);

% результаты рангов (весов) и хромосомы

[cost, ind] = sort(cost); pop = pop(ind(1:Mx2), 1); [ib cost(1)]

Cross = ceil((Nb-1) * rand(Mx2, 1));

% операция кроссинга

for ic = 1:2:Mx2

pop(ceil(Mx2*rand), 1:cross) = pop(ic, 1:cross);

pop(ceil(Mx2*rand), cross + 1:N) = pop(ic + 1, cross + 1:Nb); pop(ceil(Mx2*rand), 1:cross) = pop(ic + 1, 1:cross);

pop(ceil(Mx2*rand), cross + 1:Nb) = pop(ic, cross + 1:Nb); end

% операция мутации (видоизменение)

for ic = 1:nmut

ix = ceil(Mx*rand);

iy = ceil(Nb*rand);

pop(ix, iy) = 1 - pop(ix, iy); end %ic

end %ib

Далее приводится программа оптимизации функционала качества (3), написанная на основе теории, изложенной в [2, гл. 3, 4].

% Непрерывный генетический алгоритм

% минимизирует целевую функцию

npar = 10; % число переменных оптимизации

varhi = 10; varlo = 0; % переменные пределы

maxit = 500; % максимальное количество итераций

mincost = -0.0001; % минимальный вес

popsiz = 12; % значение набора популяции

mutrate = 0.1; % частота появления мутаций набора

selection = 0.5; % часть совокупности сохраняется

Nt = npar; % непрерывный параметр GA Nt = #variables

keep = floor(selection*popsiz); % #популяции

% элементы, которые остаются в живых

nmut = ceil((popsiz - 1)*Nt*mutrate);

% общее количество мутаций

Mx = ceil((popsiz - keep)/2); % число спариваний

% Создаем исходную популяцию

iga = 0; % инициализируется счетчик генерации

par = (varhi - varlo)*rand(popsiz, npar) + varlo;

cost = feval(ff, par); % вычисляет вес совокупности

[cost, ind] = sort(cost);

par = par(ind, 1);

minc(1) = min(cost);

meanc(1) = mean(cost);

% Повторение поколений

while iga < maxit

iga = iga + 1; % изменение поколения за счет приращений

M = ceil((popsiz - keep)/2);

prob = flipud([1:keep]/sum([1:keep])); % хромосомы весов

odds = [0 cumsum(prob(1:keep))]; % функция

% распределения вероятности

pick1 = rand(1, Mx); % mate #1

pick2 = rand(1, Mx);

ic = 1;

while ic <= Mx for id = 2:keep + 1

if pick1(ic) <= odds(id) & pick1(ic) > odds(id - 1)

ma(ic) = id - 1; end

if pick2(ic) <= odds(id) & pick2(ic) > odds(id - 1)

pa(ic) = id - 1; end end

ic = ic + 1; end

% Выполняет спаривание, используя единственный переход

ix = 1:2:keep; % index of mate #1

xp = ceil(rand(1, Mx)*Nt); % точка перехода

r = rand(1, Mx);

% смешивание параметра

for ic = 1: Mx

xy = par(ma(ic), xp(ic)) - par(pa(ic), xp(ic));

par(keep + ix(ic), 1) = par(ma(ic), 1);

par(keep + ix(ic) + 1, 1) = par(pa(ic), 1);

par(keep + ix(ic), xp(ic)) = par(ma(ic), xp(ic)) - r(ic).*xy;

```

par(keep + ix(ic) + 1, xp(ic)) = par(pa(ic), xp(ic)) + r(ic).*xy;
if xp(ic) < npar % crossover when last variable not selected
par(keep + ix(ic), 1) = [par(keep + ix(ic), 1: xp(ic)) par(keep +
ix(ic) + 1, xp(ic) + 1: npar)];
par(keep + ix(ic) + 1, :) = [par(keep + ix(ic) + 1, 1: xp(ic))
par(keep + ix(ic), xp(ic) + 1: npar)];
end % if
end
% Видоизменение популяции
mrow = sort(ceil(rand(1, nmut)*(popsize - 1)) + 1);
mcol = ceil(rand(1, nmut)*Nt);
for ii = 1:nmut
par(mrow(ii), mcol(ii)) = (varhi - varlo)*rand + varlo;
% Новое потомство и видоизмененные хромосомы оценены
cost = feval(ff, par);
% Сортировка затрат и связанных параметров
[ cost, ind] = sort(cost);
par = par(ind, :);
minc(iga + 1) = min(cost); meanc(iga + 1) = mean(cost);
% Проверка критерия останова работы ГА
if iga > maxit | cost(1) < mincost
break end
[iga cost(1)] end %iga
% Вывод результата оптимизации на экран
day = clock;
disp(datestr(datumnum(day(1), 0)))
disp(['optimized function is ' ff]) format short g
disp(['popsize = ' num2str(popsize) ' mutrate = '
num2str(mutrate) ' # par = ' num2str(npar)])
disp(['#generations = ' num2str(iga) ' best cost = ' num2str(cost(1))])
disp(['best solution'])
disp([num2str(par(1,:))])
disp('continuous genetic algorithm')
figure(2)
iters = 0; length(minc) - 1;
plot(iters, minc, iters, meanc, '-');
xlabel('generation'); ylabel('cost');

```

В результате работы программы был получен результат оптимизации (рис. 2), близкий к результату, полученному традиционными методами [2].

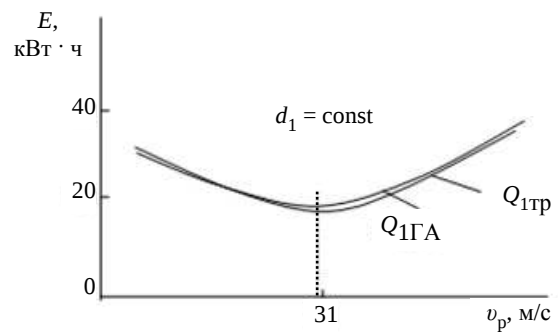


Рис. 2

На рис. 2 (зависимость $E = f(v_p)$ ($Q = \text{var}$, $d_1 = \text{const}$)) обозначены: $Q_{1ГА}$ – зависимость получена с использованием ГА; $Q_{1тр}$ – зависимость получена с использованием метода прямого спуска (Хука–Дживса) [3], имеющего по отношению к другим алгоритмам (деформируемого симплекса, радиентного спуска, наискорейшего спуска) преимущества в виде скорости и точности оптимизации.

Унимодальность полученных зависимостей обеспечивает возможность минимизации затрат электроэнергии. Выполняется это двумя способами: 1) заложив в программу управления скоростью ротора матрицу соотношений параметров дробилки и вещества с выбором оптимальной скорости; 2) автоматической оптимизацией с выявлением отмеченных ранее оценок экономичности работы дробилки и скоростей, обеспечивающих поиск экстремальных значений оценок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов М. П., Новиков В. А., Рассудов Л. Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. М.: Академия, 2007.
2. Гладков Л. А., Курейчик В. В., Курейчик В. М. Генетические алгоритмы / под ред. В. М. Курейчика. 2-е изд., испр. и доп. М.: Физматлит, 2010. 386 с.
3. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975.

М. П. Белов

APPLICATION OF GENETIC ALGORITHMS FOR PARAMETRIC OPTIMIZATION OF ELECTROMECHANICAL SYSTEMS CRUSHING UNITS

The article considers the application of genetic algorithms for parametric optimization of Electromechanical systems crushing units. The article received basic mathematical dependences of the energies spent on crushing, developed optimization algorithm and the results of optimization.

Electromechanical system, genetic algorithm, power consumption, the functionality of the quality



УДК 681.883.062, 621.396.96.001(07)

Е. Л. Шейнман, О. Н. Шувалова

Анализ эффективности алгоритмов идентификации сигналов и оценки дистанции объектов, обнаруженных в разнесенных системах наблюдения

Рассмотрены алгоритмы идентификации сигналов объектов, обнаруженных в разнесенных системах наблюдения, и оценки дистанции до объекта методом триангуляции. Определены границы применимости алгоритмов.

Интеграция, идентификация, триангуляция, эффективность, пассивный режим

При создании интегрированных систем подводного наблюдения (ИСПН) возникают задачи идентификации (отождествления) сигналов, обнаруженных системами наблюдения, находящимися на значительных расстояниях друг от друга, и оценки их координат. В общем случае системы наблюдения независимы друг от друга и могут иметь различные собственные скорости и курсы.

Одним из основных методов оценки координат объекта при разнесенных системах наблюдения является оценка дистанции до объекта методом триангуляции. Одним из основных методов идентификации является параметрическая идентификация сигналов объектов, основными параметрами которых являются пеленг объекта и его производные.

При отождествлении векторов параметров, поступающих из систем «а» (X_j^a) и «b» (X_i^b), для каждого вектора параметров определяются взаимные расстояния измерений dZ_{ij}^{ab} между оценками параметров [1], [2]:

$$dZ_{ij}^{ab} = (X_i^b - X_j^a)^T \left[K(X_i)^b + K(X_j)^a \right]^{-1} (X_i^b - X_j^a),$$

где i, j – номера значений объектов в системах «а» и «b» соответственно; $K(X_j)^a$, $K(X_i)^b$ – соответствующие ковариационные матрицы векторов параметров. Объекты считаются проидентифицированными, если $\min dZ_{ij}^{ab} < \varepsilon$, где ε – заданное пороговое значение.

Для случая однопараметрической идентификации при совпадении фазовых центров антенн и при идентификации только по пеленгу объекты i и j считаются отождествленными, если

$$dZ_{i,j} = \frac{(\Pi_{j/a} - \Pi_{i/b})^2}{(\sigma\Pi_{j/a})^2 + (\sigma\Pi_{i/b})^2} \leq \varepsilon,$$

где ε – порог, выбираемый по заданной вероятности правильной идентификации объекта; $\Pi_{j/a}$, $\Pi_{i/b}$ – пеленги на j -й и i -й объекты, обнаруженные в системах «а» и «b» соответственно; $\sigma\Pi_{j/a}$ – погрешность определения пеленга на j -й объект, обнаруженный в системе «а»; $\sigma\Pi_{i/b}$ – погрешность определения пеленга на i -й объект, обнаруженный в системе «b»; $(\Pi_{j/a} - \Pi_{i/b}) = d\Pi$ – истинное расстояние между пеленгами в разнесенных системах «а» и «b».

Оценка дистанции для отождествленных сигналов вырабатывается как решение треугольника по пеленгам объектов, измеренным в разнесенных системах, и расстоянию между ними по формуле

$$D_a = \frac{L_{ab} \sin(\Pi_{b/a} - \Pi_{i/b})}{\sin(\Pi_{j/a} - \Pi_{i/b})},$$

где L_{ab} – расстояние между фазовыми центрами разнесенных систем (база); $\Pi_{b/a}$ – пеленг на систему «b» из системы «а»; $\Pi_{j/a}$, $\Pi_{i/b}$ – пеленги на j -й и i -й объекты, обнаруженные в системах «а» и «b» соответственно.

Такие алгоритмы идентификации можно использовать в следующих случаях:

- если имеется оценка дистанции хотя бы в одной из систем, что позволяет пересчитать координаты объекта к центру второй разнесенной системы,
- объект находится на большом расстоянии от обеих рассматриваемых систем, что приводит к близким значениям пеленга объекта, обнаруженного в двух системах, и позволяет проводить идентификацию по совпадениям пеленгов.

Однако в ряде случаев эти требования не выполняются, а при отсутствии достаточно точной оценки дистанции в обеих системах возникает противоречие в условиях, для которых эффективны параметрическая идентификация и триангуляционная оценка дистанции.

С учетом этого была поставлена задача оценки эффективности и определения области применимости приведенных ранее алгоритмов оценки дистанции и идентификации сигналов объектов, обнаруженных в разнесенных пассивных системах наблюдения.

В работе [3] рассматривалась аналогичная задача, для которой производился расчет погрешностей оценок информационных параметров методом линеаризации, учитывающим члены первого порядка ряда Тейлора. Для ряда функций возникает сомнение в применимости метода линеаризации в связи с тем, что диапазон изменений случайных аргументов не настолько мал, чтобы в его пределах функция могла быть с достаточной точностью линеаризована. В связи с этим для оценки погрешностей определения параметров представляет интерес уточненный метод линеаризации, учитывающий члены разложения ряда более высокого порядка [4].

Дисперсия оценки функции нескольких слу-

чайных аргументов $Y = \Phi(x_1, x_2, \dots, x_n)$ методом линеаризации в первом приближении определяется по формуле

$$D_{Y1} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \right)_m^2 D_{xi}.$$

Здесь $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – система n случайных величин, для которой заданы числовые характеристики: математические ожидания $(m_{x1}, m_{x2}, \dots, m_{xn})$ и дисперсии $D_{xi}, i = 1, \dots, n$.

Уточненная формула дисперсии оценки функции имеет вид

$$D_{Y2} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \right)_m^2 D_{xi} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_i^2} \right)_m^2 D_{xi}^2 + \sum_{i \leq j} \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_i \partial x_j} \right)_m D_{xi} D_{xj}.$$

Последние 2 члена представляют собой «поправку на нелинейность функции» и могут служить для оценки точности метода линеаризации при вычислении дисперсии.

Отсюда СКО оценки дистанции в первом приближении имеет вид

$$\sigma D_1 = \sqrt{(L_{ab}A)^2 \sigma \Pi_{b/a}^2 + (-L_{ab}BC)^2 \sigma \Pi_{j/a}^2 + (-L_{ab}A + L_{ab}BC)^2 \sigma \Pi_{i/b}^2 + (B)^2 \sigma L_{ab}^2},$$

$$\text{где } A = \frac{\cos(\Pi_{b/a} - \Pi_{i/b})}{\sin(\Pi_{j/a} - \Pi_{i/b})}; \quad B = \frac{\sin(\Pi_{b/a} - \Pi_{i/b})}{\sin(\Pi_{j/a} - \Pi_{i/b})},$$

$$C = \cos(\Pi_{j/a} - \Pi_{i/b}).$$

СКО оценки дистанции по уточненной формуле имеет вид

$$\sigma D_2 = \sqrt{\begin{aligned} & (L_{ab}A)^2 \sigma \Pi_{b/a}^2 + (-L_{ab}BC)^2 \sigma \Pi_{j/a}^2 + (-L_{ab}A + L_{ab}BC)^2 \sigma \Pi_{i/b}^2 + (B)^2 \sigma L_{ab}^2 + \\ & \left[\begin{aligned} & (-L_{ab}B)^2 \sigma \Pi_{b/a}^4 + \left(L_{ab}B + \frac{2L_{ab}BC}{F^2} \right)^2 \sigma \Pi_{j/a}^4 + \\ & + \left(\frac{-2L_{ab}AC}{F} + \frac{2L_{ab}BC}{F^2} \right)^2 \sigma \Pi_{i/b}^4 + 0 \cdot \sigma L_{ab}^4 \end{aligned} \right] + \\ & + \left(-\frac{L_{ab}AC}{F} \right)^2 \sigma \Pi_{b/a}^2 \sigma \Pi_{j/a}^2 + \left(L_{ab}B + \frac{L_{ab}AC}{F} \right)^2 \sigma \Pi_{b/a}^2 \sigma \Pi_{i/b}^2 + (A)^2 \sigma \Pi_{b/a}^2 \sigma L_{ab}^2 + \\ & + \left(-L_{ab}B - \frac{L_{ab}BC}{F^2} + \frac{L_{ab}AC}{F} \right)^2 \sigma \Pi_{j/a}^2 \sigma \Pi_{i/b}^2 + \left(-\frac{AC}{F} \right)^2 \sigma \Pi_{j/a}^2 \sigma L_{ab}^2 + \left(\frac{AC}{F} - A \right)^2 \sigma \Pi_{i/b}^2 \sigma L_{ab}^2, \end{aligned}}$$

где $F = \sin(\Pi_{j/a} - \Pi_{i/b})$.

Относительная погрешность оценки дистанции (в процентах) вычисляется по формуле

$$\sigma D_{\text{отн}} = \frac{\sigma D}{D}.$$

Оценка эффективности алгоритмов идентификации объектов и оценки дистанции методом триангуляции производилась для следующих входных данных: приемные системы разнесены друг относительно друга на некоторое расстояние (база) и находятся в неподвижном состоянии. Расчеты производились при двух вариантах размера базы – 1 и 3 км. Цель движется равномерно и прямолинейно. Скорость и курс цели во всех вариантах ее начального положения будут равны 6 м/с и 90° соответственно.

На рис. 1 представлено начальное положение приемных систем и цели, где v, K – скорость и курс цели соответственно; A, B – приемные системы «а» и «б» соответственно; D_a – расстояние от цели до системы «а»; D_b – расстояние от цели до системы «б»; Π_a – пеленг системы «а» относительно цели; Π_b – пеленг системы «б» относительно цели; L – расстояние между приемными системами «а» и «б».

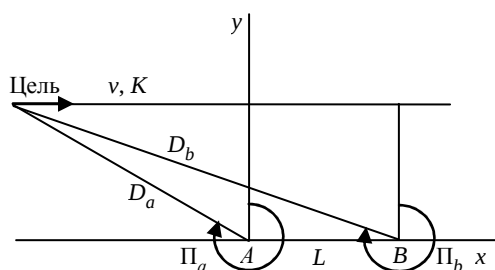


Рис. 1

В начальном положении приемные системы «а» и «б» и цель имели следующие координаты:

- при размере базы 1 км система «а» имеет координаты (0;0), система «б» – (1000; 0);
- при размере базы 3 км система «а» имеет координаты (0;0), система «б» – (3000; 0);
- цель при размере базы 1 км на дистанциях от разнесенной системы наблюдения 3, 5, 10, 30, 50, 100 км в начальном положении удалена на 10.3 км от начала координат по оси X влево;
- цель при размере базы 3 км на дистанциях от разнесенной системы наблюдения 3, 5, 10, 30, 50, 100 км в начальном положении удалена на 9.3 км от начала координат по оси X влево.

Будем рассматривать первые 60 мин движения цели относительно приемных систем в двух случаях: первая и вторая системы имели постоянные и равные между собой погрешности определения пеленга, равные 1° ($\sigma \Pi_a = \sigma \Pi_b = 1^\circ$) и 3° ($\sigma \Pi_a = \sigma \Pi_b = 3^\circ$) во всем диапазоне углов прихода сигнала.

Дистанция от разнесенной системы наблюдения, включающей в себя две приемные системы «а» и «б», представляет собой кратчайшее расстояние между целью и линией базы.

Погрешности триангуляционных оценок дистанции определялись с помощью метода линеаризации (первое приближение) и уточненного метода линеаризации (второе приближение) [4]. Для анализа эффективности алгоритма идентификации оценивались зависимости взаимного расстояния dZ между пеленгами систем наблюдения.

На рисунках приведены:

– зависимости истинного расстояния между пеленгами ($d\Pi$) в разнесенных системах от времени на дистанциях от разнесенной системы наблюдения: 1 – 3 км, 2 – 5 км, 3 – 10 км, 4 – 30 км, 5 – 50 км, 6 – 100 км при размерах базы: a – 1 км; b – 3 км (рис. 2, а, б);

– зависимости расстояния между пеленгами (dZ) в разнесенных системах «а» и «б» от времени на дистанциях от разнесенной системы наблюдения: 1 – 3 км, 2 – 5 км, 3 – 10 км, 4 – 30 км, 5 – 50 км, 6 – 100 км с учетом погрешности измерений и при пороге алгоритма идентификации $\varepsilon = 3$, для размеров базы: a – 1 км; b – 3 км при $\sigma \Pi_a = \sigma \Pi_b = 1^\circ$ (рис. 3 а, б); $\sigma \Pi_a = \sigma \Pi_b = 3^\circ$ (рис. 4, а, б);

– зависимости среднеквадратических погрешностей (σD_1 – в первом приближении на дистанциях от разнесенной системы наблюдения: 1 – 3 км, 3 – 5 км, 5 – 10 км; σD_2 – во втором приближении на дистанциях от разнесенной системы наблюдения: 2 – 3 км, 4 – 5 км, 6 – 10 км) оценки дистанции методом триангуляции от времени при размерах базы: a – 1 км; b – 3 км при: $\sigma \Pi_a = \sigma \Pi_b = 1^\circ$ (рис. 5, а, б); $\sigma \Pi_a = \sigma \Pi_b = 3^\circ$ (рис. 6, а, б);

– зависимости относительных погрешностей ($\sigma D_{\text{отн}1}$ – в первом приближении на дистанциях от разнесенной системы наблюдения: 1 – 3 км, 3 – 5 км, 5 – 10 км; $\sigma D_{\text{отн}2}$ – во втором приближении на дистанциях от разнесенной системы наблюдения: 2 – 3 км, 4 – 5 км, 6 – 10 км) оценки дистанции методом триангуляции от времени при размерах базы: a – 1 км; b – 3 км при: $\sigma \Pi_a = \sigma \Pi_b = 1^\circ$ (рис. 7, а, б); $\sigma \Pi_a = \sigma \Pi_b = 3^\circ$ (рис. 8, а, б).

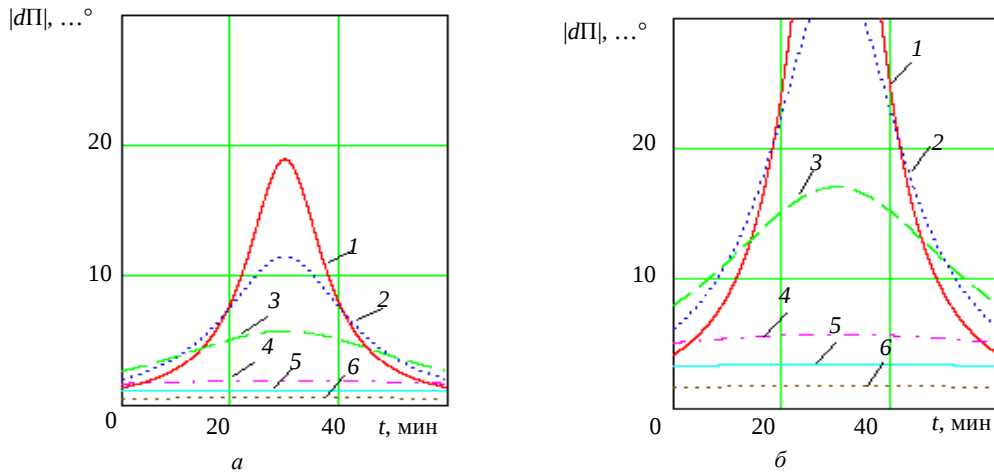


Рис. 2

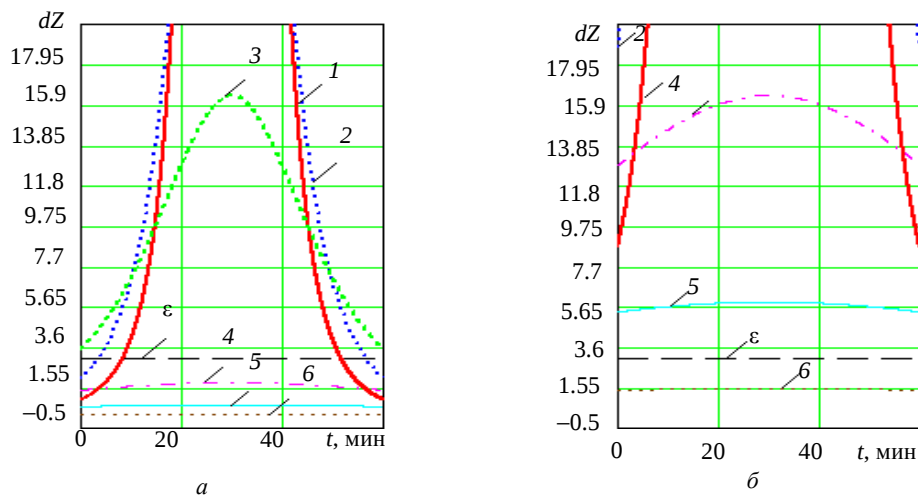


Рис. 3

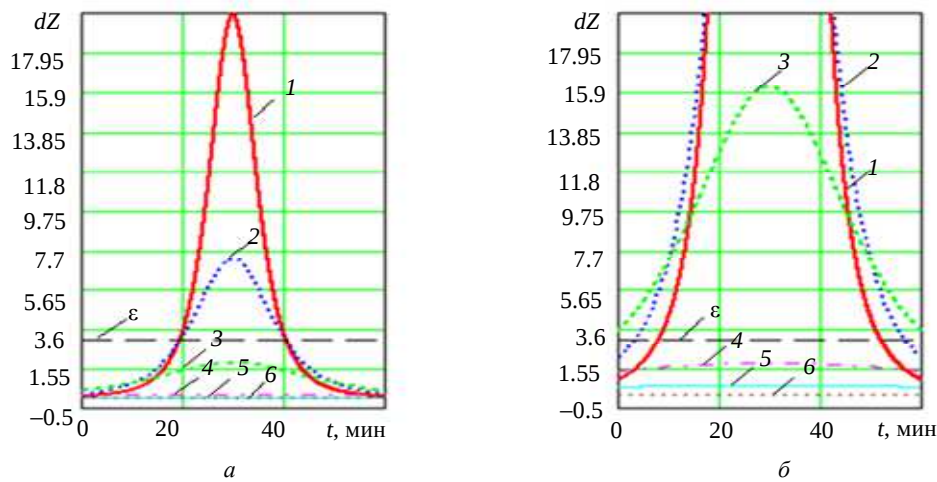


Рис. 4

Для анализа зависимости погрешности оценки дистанции от отношения дистанции от разнесенной системы наблюдения к расстоянию между антеннами постановка задачи будет несколько изменена.

Задаются следующие начальные координаты:

- при размере базы 1 км система «a» находится в начале координат, система «b» удалена на 1 км по оси X вправо, цель удалена на 0.5 км по оси X вправо;

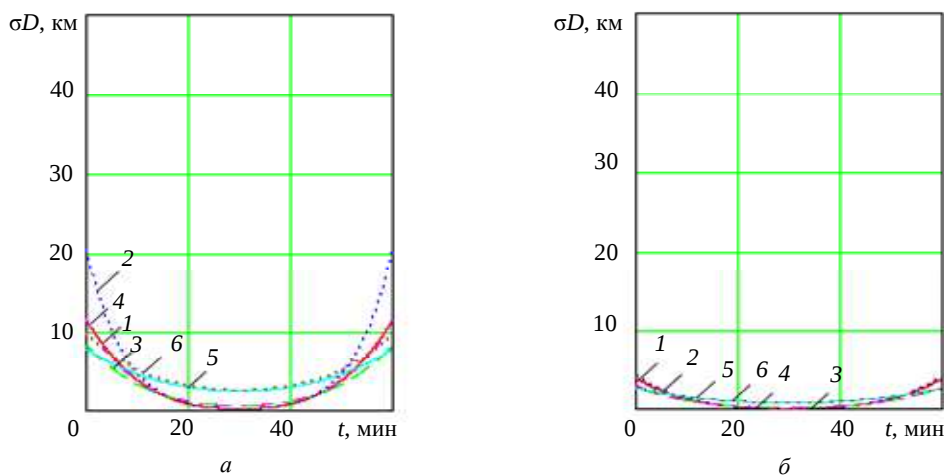


Рис. 5

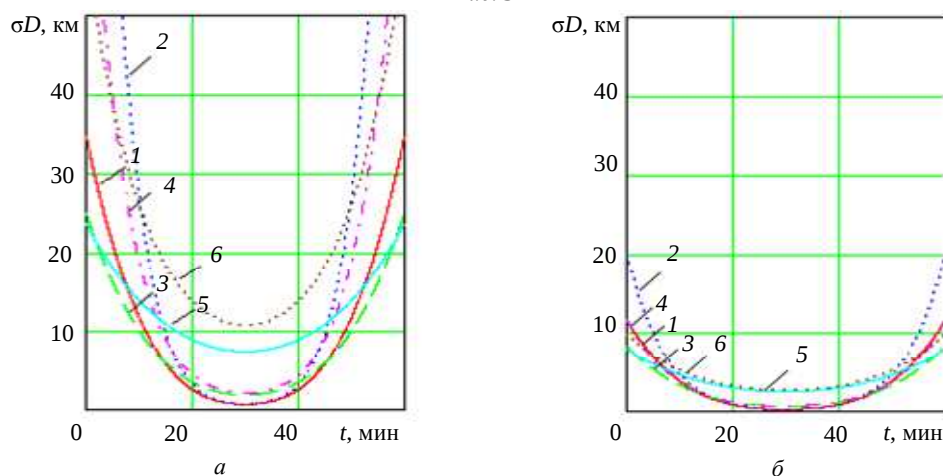


Рис. 6

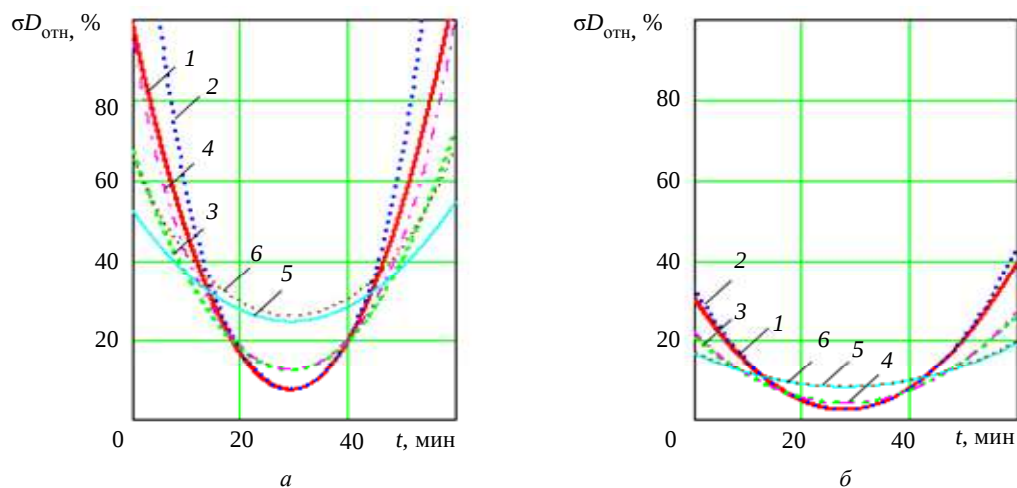


Рис. 7

• при размере базы 3 км система «а» находится в начале координат, система «b» удалена на 3 км по оси X вправо, цель удалена на 1.5 км по оси X вправо.

При этом цель будет двигаться со скоростью 1 м/с и курс ее движения будет 0° .

Приведены зависимости относительных СКО ($\sigma D_{отн1}$ – в первом приближении – кривая 1, $\sigma D_{отн2}$ – во втором приближении – кривая 2)

оценки дистанции до цели от отношения дистанции от разнесенной системы наблюдения к расстоянию между антеннами для размеров базы 1 и 3 км соответственно при: $\sigma P_a = \sigma P_b = 1^\circ$ (рис. 9, а, б); $\sigma P_a = \sigma P_b = 3^\circ$ (рис. 10, а, б).

На основании приведенных расчетов (рис. 3, 4) можно сделать вывод, что объект может быть идентифицирован при рассмотренной траектории

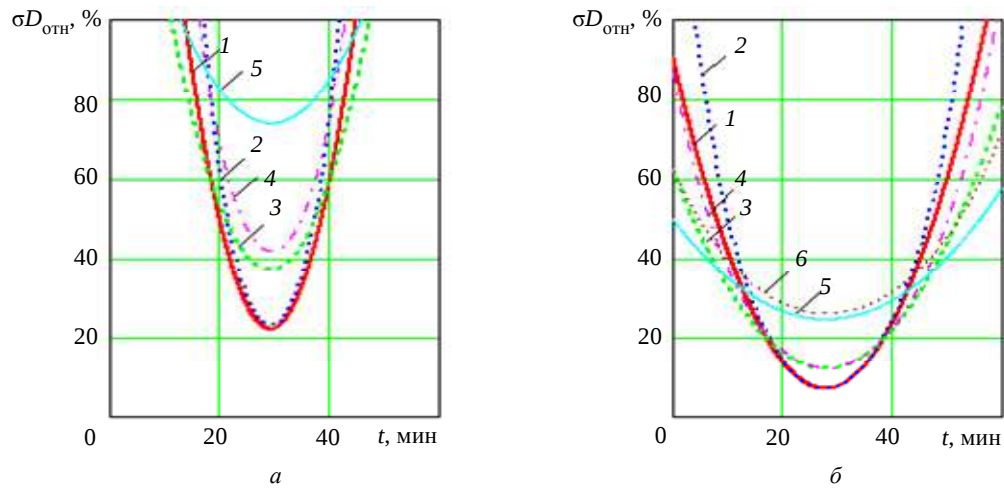


Рис. 8

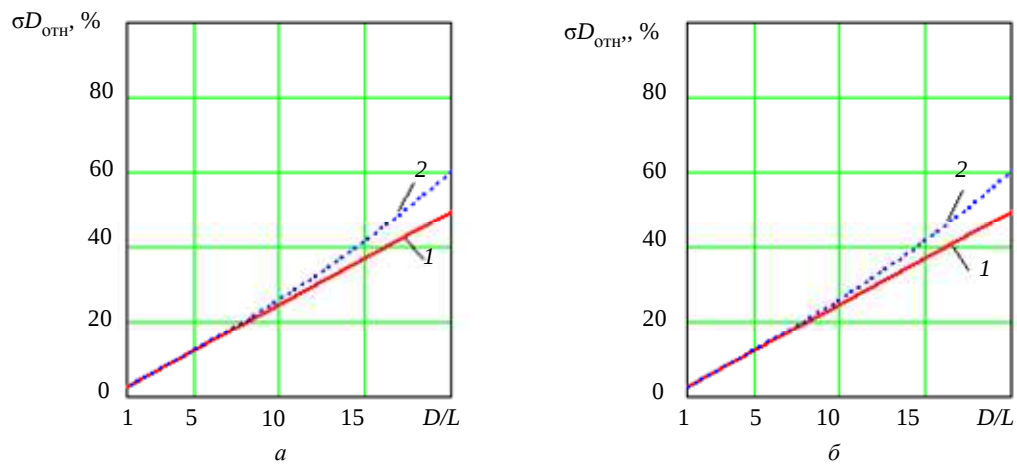


Рис. 9

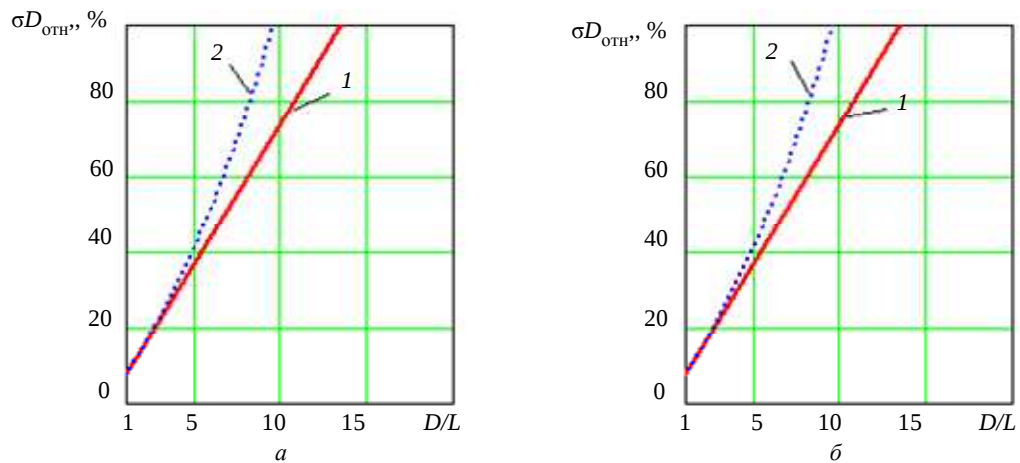


Рис. 10

движения в любой момент времени, если расстояние до объекта превышает размер базы примерно в 8 раз при погрешности пеленга 3° , а при погрешности пеленга 1° – если расстояние до объекта превышает размер базы примерно в 24 раза.

С уменьшением дистанции от цели до разнесенной системы уменьшается участок движения цели, на котором она может быть идентифицирована. Например, при погрешности пеленга 1° и

размере базы 1 км (рис. 3 а) цель может быть идентифицирована на дистанции от разнесенной системы наблюдения 5 км на углах $62...65^\circ$ относительно перпендикуляра от центра базы и дистанциях 10.6...11.9 км от цели до центра базы (что соответствует участкам движения цели от 0 до 4 мин и от 56 до 60 мин). При дистанции от разнесенной системы наблюдения 3 км (рис. 3, б) объект может быть идентифицирован на углах

69...74° относительно перпендикуляра от центра базы и дистанциях 8.5...11.2 км от цели до центра базы (что соответствует участкам движения цели от 0 до 8 мин и от 52 до 60 мин). Другими словами, идентификация по рассматриваемому алгоритму более эффективна на боковых углах, отличных от перпендикуляра от центра базы (для мобильных носителей – углах, отличных от траверсного).

Объективное расстояние между пеленгами при заданном пороге идентификации, равном 3, при погрешностях оценки пеленга систем «а» и «b», равных 1°, должно быть меньше 2...3°, а при погрешностях оценки пеленга систем «а» и «b», равных 3°, – меньше 7...8°. Однако на близких расстояниях разница пеленгов от разнесенных систем наблюдения значительна, особенно на направлениях, близких к траверсным, а измеренные расстояния между пеленгами могут быть при этом значительно больше, в том числе за счет погрешности измерения. Такой разброс пеленгов не позволяет эффективно проводить идентификацию объектов, обнаруженных различными системами наблюдения.

Сравнение двух способов оценки погрешности дистанции методом триангуляции показало, что во втором приближении и среднеквадратическая (рис. 5, 6), и относительная (рис. 7, 8) погрешности выше, чем в первом. Различие между ними увеличивается на боковых углах, отличных от перпендикуляра от центра базы (для мобильных носителей – углах, отличных от траверсного). Другими словами, на траверсных углах определять погрешность оценки дистанции методом триангуляции можно используя первое приближение, а на боковых углах необходимо использовать уточненный метод линеаризации.

Например, относительные СКО оценки дистанции при погрешностях оценки пеленга систем «а» и «b», равных 1°, и размере базы 1 км (рис. 7, а) при дистанции от разнесенных систем, равной 3 км, очень близки на углах 0...61° относительно перпендикуляра от центра базы и дистанциях 3...6.2 км от цели до центра базы (что

соответствует участкам движения цели от 15 до 45 мин) и различаются на углах 61...74° относительно перпендикуляра от центра базы и дистанциях 6.2...11.2 км от цели до центра базы (что соответствует участкам движения цели от 0 до 15 мин и от 45 до 60 мин). Относительные СКО оценки дистанции методом триангуляции во втором приближении значительно превышают относительные СКО в первом приближении.

Видно, что с увеличением дистанции от цели до разнесенной системы наблюдения увеличивается различие между относительными СКО оценки дистанции методом триангуляции в первом и во втором приближениях (рис. 9, 10). Например, при погрешностях оценки пеленга систем «а» и «b», равных 1°, и размере базы 1 км (и 3 км тоже) (рис. 9) относительные СКО оценки дистанции в первом и втором приближениях близки при отношении дистанции от разнесенной системы наблюдения к расстоянию между антеннами (базе), не превышающем 8. Здесь для оценки погрешностей достаточно первого приближения метода линеаризации. При отношении дистанции от разнесенной системы наблюдения к расстоянию между антеннами (базе), превышающем 8, появляется значительное различие между данными погрешностями. Другими словами, для более точной оценки дистанции следует пользоваться уточненным методом линеаризации.

Проведенный анализ показал, что оценка дистанции методом триангуляции эффективна только в тех случаях, когда пеленги объектов сильно различаются, однако в этом случае нельзя осуществлять идентификацию сигналов по близости пеленгов объектов, измеренных в разнесенных приемных системах.

В связи с этим следует совместно решать задачи идентификации и триангуляции, с расширением области применимости триангуляционного метода оценки дистанции для решения задачи идентификации объектов, обнаруженных в разнесенных системах наблюдения [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмин С. З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации. М.: Сов. радио, 1974.
2. Жандаров А. М. Идентификация и фильтрация измерений состояния стохастических систем. М.: Наука, 1979.

3. Шейнман Е. Л. Анализ алгоритмов идентификации сигналов и оценки дистанции объектов, обнаруженных в разнесенных системах наблюдения // VIII Междунар. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (ГА-2006). СПб., 2006. С. 475–478.

4. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969.

5. Шейнман Е. Л. Идентификация сигналов объектов в интегрированных системах подводного

наблюдения //Юбилейная науч.-техн. конф. «Проблемы прикладной гидроакустики», Таганрог, 2004. С. 27–32.

E. L. Sheinman, O. N. Shuvalova

A STUDY OF EFFECTIVENESS OF SIGNAL IDENTIFICATION ALGORITHMS AND DISTANCE ESTIMATIONS OF THE OBJECTS WHICH HAVE BEEN DETECTED IN SURVEILLANCE SYSTEMS, TAKING PLACE ON DISTANCE

Algorithms of signal identification of the objects, which have been detected in surveillance systems, taking place on distance from each other, and estimation of the object distance by a triangulation method, are considered. Conditions of algorithms applicability are determined.

Integration, identification, triangulation, efficiency, passive mode

УДК 620.179.161

К. Е. Аббакумов, Н. В. Степаненко

Моделирование электроакустического тракта теневого метода ультразвукового контроля при использовании бесконтактных датчиков

Проведено моделирование электроакустического тракта теневого метода ультразвукового контроля при использовании бесконтактных датчиков. Получены результаты, на основе которых можно оценить влияние пространственной ориентации катушки датчика на результат контроля.

Ультразвуковой контроль, листовой прокат, теневой метод, электромагнитный акустический преобразователь

При проектировании большинства видов аппаратуры для дефектоскопии и других видов неразрушающего контроля с использованием упругих волн наибольшее предпочтение отдается варианту, связанному с получением и анализом уравнений электроакустического или акустического тракта.

Ультразвуковая дефектоскопическая аппаратура основана на принципах действия, связанных с особенностями распространения упругих волн в веществе контролируемого изделия. К таким особенностям относятся: рассеяние на неоднородностях, изменения скоростей распространения и поглощения ультразвука, эффект Доплера, флуктуации направления распространения волн при рефракции и др. Часть общего функционального приборного тракта, в котором осуществляется из-

меряемое взаимодействие ультразвука с веществом или объектом, принято называть акустическим трактом прибора [1], [2]. Понятие акустического тракта и способы его аналитического описания введены в практику инженерного проектирования дефектоскопической аппаратуры И. Н. Ермоловым в ряде работ [3]. Если в рассмотрение включаются процессы преобразования электрических сигналов в акустические, то образуется модель, которую принято называть электроакустическим трактом прибора. Эта характеристика наиболее полно учитывает возможности аппаратных средств уже с учетом согласования работы преобразователей не только с исследуемой средой, но и с электронными устройствами. Для удобства анализа иногда электроакустический тракт условно разделяется на 3 части: часть, связанная с режимом возбужде-

ния; часть, связанная с распространением ультразвука в среде (собственно акустический тракт); часть, связанная с режимом приема.

При построении модели и анализе ее работы для первой части обычно интересуются соотношением преобразования электрического сигнала, подаваемого на электроакустический преобразователь, в компоненты упругого поля (смещения или напряжения), действующие в активной зоне и определяющие режим излучения.

При построении модели для третьей части интересуются решением обратной задачи: какой электрический сигнал образуется на выходных зажимах электроакустического преобразователя при заданном распределении акустического воздействия на активной зоне при регистрации входящих ультразвуковых сигналов.

Наибольший практический интерес при использовании отработанных конструкций электроакустических преобразователей и способов ввода упругих волн в изделие вызывают результаты анализа акустического тракта, особенно если в него помещена подходящая модель, замещающая оцениваемую неоднородность.

Закономерности, свойственные акустическим трактам устройств разного функционального назначения, могут сильно отличаться друг от друга. Но всегда они, в основном, определяются характером акустического поля, возбуждаемого и принимаемого в среде используемым электроакустическим преобразователем. Известно влияние на структуру акустического тракта способа осуществления акустического контакта: прямой контактный или «щелевой», иммерсионный, контактный с акустической задержкой, бесконтактный, а также способа «прозвучивания»: теневой, эхометод, эхосквозной и их модификации [1], [2].

Приборы, реализующие сквозное прозвучивание, основаны в большинстве случаев на измерении времени распространения ультразвука в среде и степени его ослабления. При использовании поперечных, упругих волн возникает принципиальная возможность оценки указанных характеристик в зависимости от направления вектора упругих смещений, т. е. поляризации волны.

Измерительный канал таких приборов содержит, как правило, излучающий и приемный преобразователи, расположенные напротив друг друга в жидкости или по разные стороны на гранях (или вблизи граней) исследуемого объекта. В этом случае вырабатываемый приемником электрический сигнал будет пропорционален усредненному по его рабочей поверхности значению создаваемого излучающим преобразователем звукового давления в

жидкости или компонента упругого напряжения (смещения) в твердой среде на поверхности со стороны приемника.

На рис. 1 представлена схема формирования измерительного тракта дефектоскопа при использовании электромагнитно-акустических преобразователей (ЭМАП) для теневого метода ультразвукового контроля металлической пластины (образца).

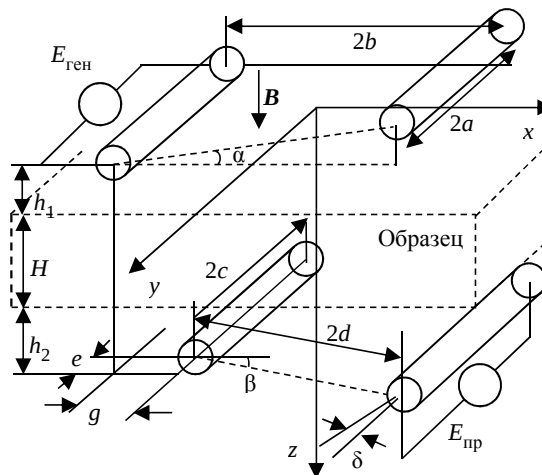


Рис. 1

Излучающая катушка преобразователя (ИК) ЭМАП расположена относительно декартовой системы координат (x, y, z) на расстоянии h_1 над поверхностью образца — металлической пластины толщиной H с плоскопараллельными гранями. Условно витки ИК изображены в виде набора «нитевидных» проводников. Они считаются замкнутыми за пределами рисунка и подключены к источнику возбуждающего электрического напряжения $E_{ген}$. Предполагается, что активная зона ИК имеет форму прямоугольника $2a \times 2b$. С противоположной ИК стороны пластины на расстоянии h_2 от ее поверхности располагается приемная катушка (ПК) ЭМАП, которая также имеет прямоугольную форму с размерами $2c \times 2d$. Витки ПК ориентированы в параллельной плоскости, согласно виткам ИК, но развернуты по отношению к ним на угол δ . Витки ПК предполагаются замкнутыми за пределами рисунка и образующими источник ЭДС $E_{пр}$. В рабочую зону ЭМАП для активизации поперечных волн подается «нормальное» (показано стрелкой) к поверхности магнитное поле с индукцией B . Кроме того, для имитации нарушенного расположения ИК и ПК в акустических системах реальных дефектоскопических устройств центр ПК предполагается смещенным относительно центра ИК на расстояния e и g по осям

«х» и «у» соответственно (для упрощения рисунка смещение показано по отношению к краю ИК) [4]. Для данной конструкции датчиков возможны отклонения плоскостей ИК и ПК от плоскости объекта контроля, для имитации этих отклонений введены углы α и β соответственно.

При указанных на схеме направлениях витков (ИК и ПК), а следовательно, и протекающих по виткам токов, и вектора магнитной индукции векторы возникающих в металле упругих смещений (компонент тензора упругих напряжений) будут преимущественно ориентированы в направлении оси «у» (на рис. 1 не показаны). Такие же составляющие упругих смещений (напряжений) будут преимущественно преобразовываться, и затем регистрироваться в виде сигналов электрического напряжения на приемной катушке ЭМАП.

В соответствии с определением под уравнением электроакустического тракта будем понимать отношение сигнала, принятого приемным ЭМАП – $E_{\text{пр}}(t)$, к излученному передающим ЭМАП – $E_{\text{ген}}(t)$ при реализации теневого метода ультразвукового контроля (см. рис. 1). Тогда, как показано в [4], интересующее уравнение можно записать в виде произведения трех сомножителей:

$$\frac{E_{\text{пр}}(t)}{E_{\text{ген}}(t)} = S(\{I\}, t) * R(\{P\}, t) * E(\{A\}, t), \quad (1)$$

где $S(\{I\}, t)$ – обобщенный коэффициент преобразования в режиме излучения; $\{I\}$ – подмножество параметров режима излучения; $R(\{P\}, t)$ – обобщенный коэффициент преобразования в поле упругих волн, взаимодействующих с неоднородностью; $\{P\}$ – подмножество параметров для по-

Для схемы на рис. 1 выражение для коэффициента $S(\{I\}, t)$, с учетом материалов, можно записать, опуская временной множитель, в следующем виде:

$$S(\{I\}, t) = \frac{iW_{\text{изл}}BF(h_{\text{изл}})}{2a\omega\rho c_t[R_{\text{изл}} - i\omega L_{\text{изл}}(1 - \exp(-\eta_{\text{изл}}h_{\text{изл}}))](1 - \frac{i\omega}{\sigma\mu_0 c^2})}, \quad (2)$$

где i – мнимая единица; $W_{\text{изл}}$ – число витков излучающей катушки; B – магнитная индукция; $2a$ – ширина рабочей зоны излучающей катушки; ω – частота ультразвука; ρ – плотность металла; c_t – скорость поперечных волн в металле; $R_{\text{изл}}$ – активное сопротивление излучающей катушки; $L_{\text{изл}}$ – индуктивность излучающей катушки; $\eta_{\text{изл}}$ – параметр ослабления при удалении излучающей катушки от поверхности металла; $h_{\text{изл}}$ – высота излучающей катушки над поверхностью металла; σ – электропроводность металла; μ – относительная магнитная проницаемость металла; μ_0 – абсолютная магнитная проницаемость; c – скорость электромагнитных волн в вакууме.

Функция $F(h_{\text{изл}})$ учитывает неравномерность распределения вихревого тока под витками излучающей катушки и его ослабление при удалении излучающей катушки от поверхности металла на высоту $h_{\text{изл}}$ [4]. При отклонении плоскости ИК на угол α относительно поверхности объекта контроля (ОК) функция распределения плотности токов будет иметь следующий вид:

$$F(x, y, \alpha, h_{\text{изл}}) = F_x(x, \alpha, h_{\text{изл}})F_y(y, \alpha, h_{\text{изл}}), \quad (3)$$

где

$$F_x(x, \alpha, h_{\text{изл}}) = \frac{1}{\pi} \left[\arctg\left(\frac{b-x}{h_{\text{изл}} + (b+x)\sin\alpha}\right) - \arctg\left(\frac{-b-x}{h_{\text{изл}} + (b+x)\sin\alpha}\right) \right],$$

$$F_y(y, \alpha, h_{\text{изл}}) = \frac{1}{\pi} \left[\arctg\left(\frac{a-y}{h_{\text{изл}} + (b+x)\sin\alpha}\right) - \arctg\left(\frac{-a-y}{h_{\text{изл}} + (b+x)\sin\alpha}\right) \right].$$

ля упругих волн; $E(\{A\}, t)$ – обобщенный коэффициент преобразования в режиме приема; $\{A\}$ – подмножество параметров режима приема; t – время.

На рис. 2 представлен вид функции распределения (в центральной плоскости) плотности вихревых токов в активной зоне ЭМАП прямоугольной формы 7,5×7,5 мм, частота ультразвука 1 МГц, материал – сталь (сплошная линия – воз-

душный зазор 0,1 мм, отклонение ИК на 10° относительно ОК, пунктир – воздушный зазор 0,1 мм, отклонение ИК отсутствует). На рис. 3 показана характеристическая поверхность распре-

Остальные обозначения в формуле (5) ясны из рис. 1. Для удобства вычислений по формулам (1)–(5) в них выделялся нормирующий безразмерный множитель, на который делилась левая

$$N(x_1, y_1, z) = \frac{\cos \varphi \cos \theta (1 - 2 \sin^2 \theta)}{(2 \sin^2 \theta - 1)^2 + 4 \sin^2 \theta \cos \theta \sqrt{\left(\frac{c_t}{c_l}\right)^2 - \sin^2 \theta}};$$

ления плотности вихревого тока при отклонении ИК на 10° относительно ОК.

Выражение для коэффициента $E(\{A\}, t)$ запишется в виде

$$E(\{A\}, t) = \frac{(1+i)\omega W_{\text{пр}}(2d) \exp(-\eta_{\text{пр}} h_{\text{пр}})}{(1 - \frac{i\omega}{\sigma \mu_0 c^2})}, \quad (4)$$

где $W_{\text{пр}}$ – число витков приемной катушки ЭМАП; $2d$ – ширина рабочей зоны приемной катушки ЭМАП; $\eta_{\text{пр}}$ – параметр ослабления при

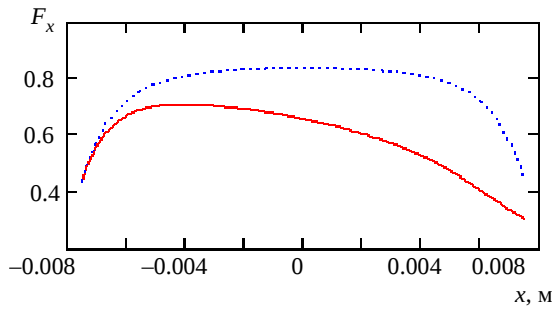


Рис. 2

удалении приемной катушки от поверхности металла; $h_{\text{пр}}$ – высота приемной катушки над поверхностью металла.

Выражение $R(\{P\}, t)$ представляет собой отношение тангенциальных компонент тензора упругих напряжений в рабочих областях приемной $\sigma_{xz \text{ пр}}(\{P\}, t)$ и излучающей $\sigma_{xz \text{ изл}}(\{P\}, t)$ катушек ЭМАП. Для схемы на рис. 1 это выражение может быть приведено к следующему виду:

$$\frac{\sigma_{xz \text{ пр}}}{\sigma_{xz \text{ изл}}} = \frac{if \cos \delta}{4cd c_t} \int_{-d}^d \int_{-c}^c \int_{-b}^b \int_{-a}^a \frac{\exp\left[i \frac{\omega}{c_t} R(x_1, x_2, y_1, y_2, z)\right] N(x_1, y_1, z)}{R(x_1, x_2, y_1, y_2, z)} dx_2 dy_2 dx_1 dy_1, \quad (5)$$

где

$$R(x_1, y_1, x_2, y_2, z) = \left[(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + z^2 \right]^{1/2};$$

$$\varphi = \arctg \frac{y_1}{x_1}; \quad \theta = \arctg \frac{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}}{z}.$$

часть выражения (1). Полученное безразмерное выражение $PN_{\text{тен}}\{\dots\}$ и использовалось далее для численных оценок. Выражение (5) в данном случае определяет относительный уровень прошедшего через металлический лист сигнала на бездефектном месте. Для учета наличия дефекта в измерительном тракте необходимо ввести соответствующую модель неоднородности, в качестве которой может служить, например, модель «расслоения» в виде «тонкого» слоя с плоскопараллельными границами инородного, по отношению к металлу, вещества.

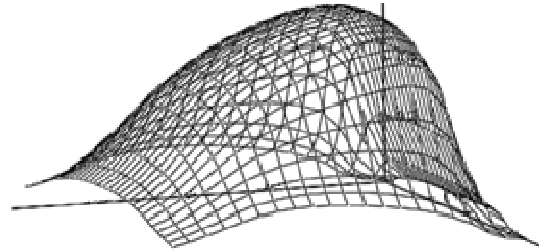


Рис. 3

На рис. 4 приведены результаты численных оценок выражения $PN_{\text{тен}}\{\dots\}$ в зависимости от расстояния z в измерительном тракте, а также от параметров смещения и поворота ИК и ПК друг относительно друга и соотношения размеров сторон ИК и ПК, с учетом реального распределения плотности вихревых токов в активной зоне ЭМАП при зазоре 1 мм. Размеры активных зон ИК и ПК ЭМАП одинаковы (15×15 мм); рабочая

частота $f = 1.0$ МГц [(—) – смещение и поворот отсутствуют; (····) – смещение равно 3.75 мм по обеим осям, поворот отсутствует; (---) – угол поворота равен $\pi/8$; (-·-) – смещение равно 3.75 мм, угол поворота равен $\pi/8$].

На рис. 5 приведены результаты численных оценок выражения $PN_{\text{тен}}\{\dots\}$ при вводе угла от-

клонения плоскости ИК от плоскости ОК с учетом реального распределения плотности вихревых токов в активной зоне ЭМАП при зазоре 1 мм; размеры активных зон ИК и ПК ЭМАП одинаковы (15×15 мм); частота $f = 1.0$ МГц [(—) — отклонение отсутствует; (····) — отклонение ИК на 5° относительно ОК].

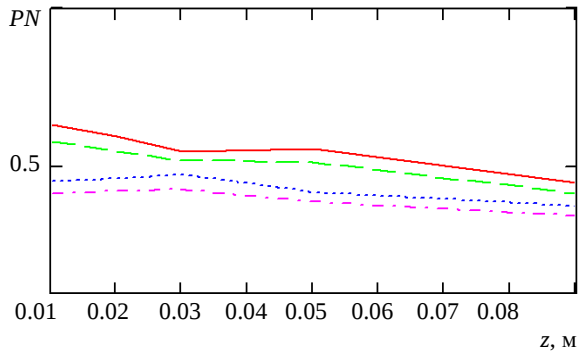


Рис. 4

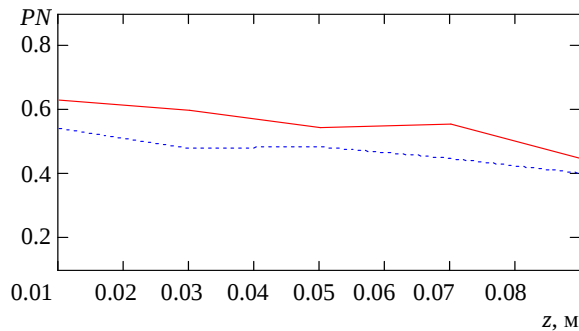


Рис. 5

Отметим, прежде всего, немонотонный спад полезного сигнала с расстоянием, что объясняется интерференционными явлениями. Несмотря на сложный характер возникающего акустического поля отклонение ИК относительно ОК заметно, но не слишком велико и вызывает вариации сигналов в пределах нескольких децибел. Вместе с тем, это позволяет существенно упростить требования к проектированию многоканальных акустических систем по сравнению с пьезоэлектрическими преобразователями, для которых существенной проблемой является соблюдение компланарности пьезоэлементов. Стоит отметить, что влияние отклонения ИК значительно возрастает при увеличении угла α .

На рис. 6 приведены результаты численных оценок выражения $PN_{\text{тен}}\{\dots\}$ в зависимости от угла отклонения ИК (α) и ПК (β) относительно плоскости ОК; рабочая частота $f = 1.0$ МГц.

Видно, что амплитуда теневого сигнала быстро убывает с увеличением угла α . При конструировании автоматизированных систем контроля стоит ограничить максимальное допустимое отклонение излучающего датчика относительно ОК значением 10° .

На рис. 7 приведены результаты численных оценок выражения $PN_{\text{тен}}\{\dots\}$ в зависимости от угла поворота (α) и значения смещения (δ) ПК относительно ИК.

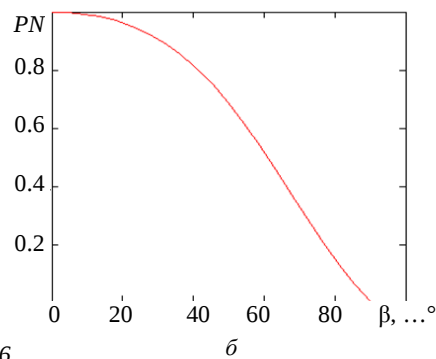
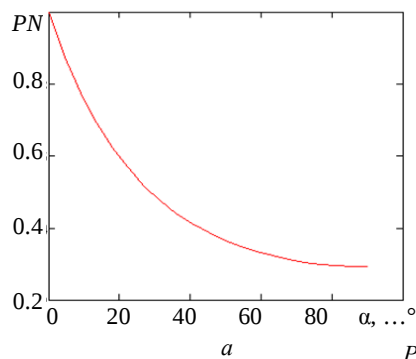


Рис. 6

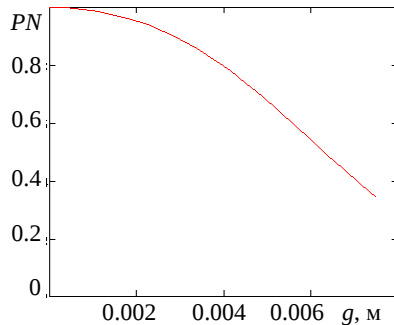
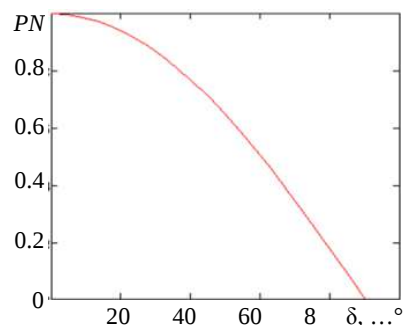


Рис. 7

При расчете уровня «теневого» сигнала в случае отклонения катушек от образца в постоянном магнитном поле опущена составляющая, появляющаяся за счет магнитострикционных механизмов преобразования при увеличении углов α и

β , поскольку она становится значимой при значениях углов больше 45° , что в свою очередь означало бы изменение в конструкции датчика. Данная же статья посвящена возможным отклонениям в рамках одной конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голубев А. С., Паврос С. К. Акустическое поле искателей ультразвуковых дефектоскопов: Конспект лекций / ЛЭТИ. Л., 1975.

2. Паврос С. К., Жарков К. В. Акустический тракт ультразвуковых контрольно-измерительных приборов: Учеб. пособие / ЛЭТИ. Л., 1980.

3. Ермолов И. Н. Методы расчета акустического тракта ультразвукового дефектоскопа. 1. Акустиче-

ское поле нормального контактного искателя // Дефектоскопия. 1967. № 3. С. 41–50.

4. Аббакумов К. Е., Кириков А. В. Моделирование электроакустического тракта с бесконтактными преобразователями для теневого метода контроля // Тез. докл. XVII Российской науч.-техн. конф. с международным участием «Неразрушающий контроль и диагностика», Екатеринбург, 5–11 сент. 2005 г. С. 131–132.

K. E. Abbakumov, N. V. Stepanenko

ELECTRO-ACOUSTIC PATH MODELING FOR SHADOW METHOD ULTRASONIC TESTING USING EMAT

The modeling of electro-acoustic path of the shadow method of ultrasonic testing using EMAT. Results have been obtained on the basis of which to assess the impact of the spatial orientation of the transducer coil on the testing result.

Ultrasonic testing, rolled sheet, shadow method, electromagnetic acoustic transducer



УДК 616-71

Л. А. Манило, А. П. Немирко, И. С. Саламонова

Автоматический анализ формы спирографических петель при искусственной вентиляции легких

Рассмотрены методы автоматического анализа спирографических петель в условиях искусственной вентиляции легких. Проведен анализ различных числовых характеристик петель «объем-давление», полученных по сигнатуре двумерных кривых. Показаны возможности применения динамического анализа спирограмм для оценки параметров вентиляции легких и ранней диагностики патологий.

Искусственная вентиляция легких, автоматический анализ спирограмм, сигнатура петель

Контроль состояния пациента в режиме искусственной вентиляции легких (ИВЛ) основан на динамической оценке ряда спирографических показателей, которые характеризуют эффективность газообмена. К ним в первую очередь относятся такие параметры вентиляции, как жизненная емкость легких, сопротивление дыхательных путей, растяжимость легких. В современных аппаратах ИВЛ, обеспечивающих функцию «протезирования дыхания», требуется также реализация диагностических функций, позволяющих на ранних стадиях обнаруживать развитие состояний, угрожающих жизни пациента. К таким опасным состояниям можно отнести, например, отек легких, обструктивные нарушения в бронхолегочной системе пациента.

Ранняя диагностика патологий органов дыхания возможна лишь в ходе непрерывного контроля состояния пациента. Она основана на автоматическом анализе основных параметров внешнего дыхания, а также на обнаружении существенных отклонений в заданных режимах ИВЛ. Такой анализ осуществляется по спирографическим кривым, включающим как скалярные (давление, поток и объем), так и двумерные функции, представленные в виде петель «объем-давление» (ОД) и «поток-объем» (ПО).

Данное исследование направлено на разработку новых методов и алгоритмов непрерывного контроля функций внешнего дыхания при ИВЛ по спирографическим петлям, в частности по петлям ОД. Установлено, что этот вид спирограмм представляет наибольший практический интерес для

задач мониторинга в процессе проведения респираторной поддержки [1]. Переход к динамическому анализу числовых характеристик петель, связанных с основными спирометрическими величинами (Compliance и Resistance – растяжимость и сопротивление) и обеспечивающих оценку изменений формы петли, позволит более точно регулировать параметры вентиляции и своевременно диагностировать развитие патологий.

Петля ОД является графической формой описания функциональной зависимости дыхательного объема V от давления p в контуре системы дыхания. В ходе регистрации кривых петля образуется на протяжении каждого дыхательного цикла. Она одновременно отражает влияние двух физиологических параметров: растяжимости легких C (Compliance) и сопротивления дыхательных путей R (Resistance). Типичная кривая ОД при ИВЛ с управляемым объемом для одного дыхательного цикла изображена на рис. 1. Точка А соответствует началу вдоха (концу выдоха), точка В – концу вдоха (началу выдоха), а величина V_T (Tidal Volume – дыхательный объем) показывает дыхательный объем легких. Ввиду того, что существует запаздывание изменения величины объема V относительно давления p , график имеет вид петли гистерезиса. Нижняя ветвь петли связана с работой дыхания по растяжению эластичных тканей легких во время вдоха, а верхняя – с работой дыхания по преодолению сопротивления дыхательных путей на выдохе. Поскольку давление в конце выдоха должно поддерживаться на заданном уровне, кривая дыхания смещена вдоль оси дав-

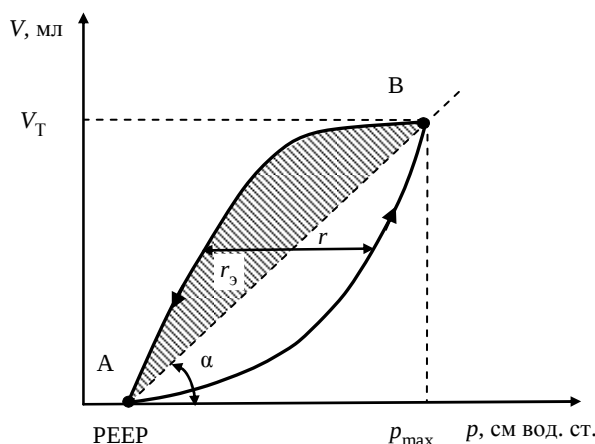


Рис. 1

ления p на положительную величину PEEP (Positive End-Expiratory Pressure).

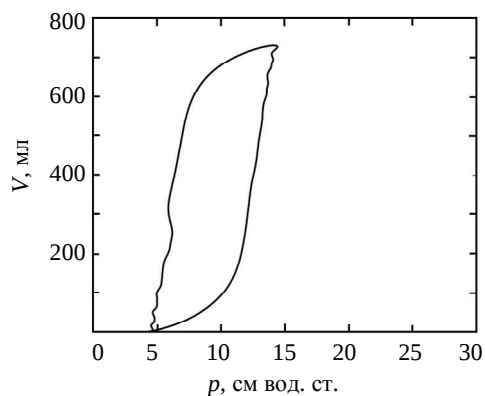
Линия, соединяющая две характерные точки кривой (A, B), задает направление основной оси петли. Наклон оси, равный углу α , характеризует динамическую растяжимость дыхательной системы $C = \tan \alpha$, а ширина петли r — сопротивление дыхательных путей R . При этом расстояния от оси петли до ее восходящей и нисходящей ветвей (на рис. 1 указаны стрелками) отражают инспираторное и экспираторное сопротивления соответственно. Кроме горизонтальной протяженности петли r с изменением величины сопротивления дыхательных путей связан другой интегральный параметр — площадь петли S_v в фазе выдоха (на рис. 1 отмечено штриховкой).

Наблюдение за динамикой формы петли, положением кривой на плоскости, углом наклона α и шириной петли r позволяет косвенно судить об изменениях основных спирометрических показателей C и R , описывающих работу дыхания пациента [1], [2]. На рис. 2 в качестве примера изображены две спирограммы пациентов, зарегистрированные в условиях клиники, для случаев нормы (рис. 2, а) и наличия острого респираторного дистресс-синдрома — ОРДС (рис. 2, б). Можно заметить, что при патологии изменяются форма, размеры петли, расположение ее на плоскости. На кривой ОД наблюдается отклонение петли к горизонтальной оси (снижается растяжимость легких C) и расширение ее вдоль оси давления (повышается сопротивление дыхательных путей R).

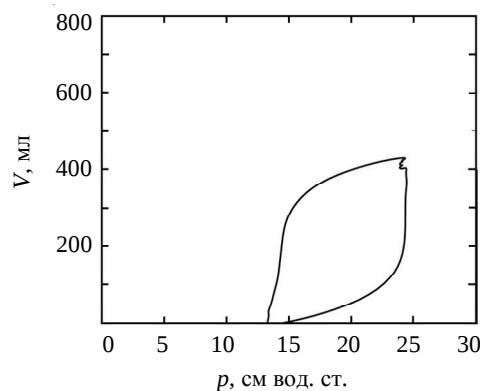
Существуют различные способы описания формы петель. Они основаны на использовании цепных кодов, аппроксимации фигур полиномами разных степеней, описании границ набором числовых признаков (площадь, длина, направление

главных осей замкнутой фигуры и т. д.), представлении двумерных кривых в виде сигнатур [3]. Преимуществом сигнатур является то, что описание двумерных петель сводится к более простым одномерным функциям. В данной работе использован последний подход.

Наиболее простой способ получения сигнатуры петли состоит в построении зависимости расстояния от центра тяжести петли до границ кривой в виде функции угла θ с применением равномерной дискретизации по углу (во всех экспериментах $\Delta\theta = 1^\circ$). Анализ изменений формы петель по сигнатуре предполагает независимость строящихся функций от поворота и размера петель. Первое условие достигается выбором фиксированной начальной точки отсчета сигнатуры. В качестве нее можно выбрать точку начала дыхательного цикла (точка A, рис. 1). Тогда можно проводить сравнение формы петель по скалярным кривым (сигнатуре), поскольку они будут синхронизированы с фазами дыхательного цикла. Инвариантность функции к размеру петли обеспечивается нормировкой отсчетов сигнатуры по максимальному значению или диапазону изменения ее ординат.



а



б

Рис. 2

Используя цифровое изображение петли, а также функцию сигнатуры, можно вычислить ряд параметров, характеризующих форму и расположение петли на плоскости, провести сравнительный анализ спирограммы, регистрируемой в ходе наблюдения, и опорной петли. В качестве опорных могут быть выбраны петли, которые отражают установленный врачом режим вентиляции легких. В процессе непрерывного контроля опорные кривые могут периодически обновляться, что связано с необходимостью корректировки задаваемых врачом параметров вентиляции.

Алгоритм динамического анализа петель ОД и распознавания патологических отклонений в режиме вентиляции легких можно представить следующим образом.

Вначале необходимо провести нормировку каждой из координатных осей (V и p) с тем, чтобы, во-первых, перейти к безразмерным величинам и, во-вторых, получить расположение петель на плоскости в соответствии с графическим отображением линии нормальной динамической растяжимости легких. Эта линия должна располагаться так, чтобы значению растяжимости 65 мл/см вод. ст. соответствовал угол наклона оси петли $\alpha = 45^\circ$. Поэтому при построении сигнатуры нами использована нормировка в виде $V_n = V/V^*$ и $p_n = p/p^*$, где нормирующие величины – $V^* = 1300$ мл, $p^* = 20$ см вод. ст.

Далее выполняются процедуры обработки нормированных петель и сигнатур, а также проводится сравнительный анализ параметров, характеризующих особенности спирографических кривых. В качестве этих параметров выбраны:

- направление основной оси анализируемой петли ОД ($\text{tg } \alpha$) или угловое отклонение от оси опорного дыхательного цикла ($\Delta\alpha$);
- среднеквадратическое отклонение σ_k спирограммы;
- ширина петли r (или оценка площади петли в фазе выдоха S_3);
- выраженность артефактов L_a .

Включение режима слежения за спирограммой позволяет фиксировать отклонения этих признаков на значение, превышающее некоторый заданный в процентном отношении порог. Как показали эксперименты, сравнение петель целесообразно проводить по усредненным кривым, полученным путем синхронного накопления двумерных функций. В этом случае значительно снижается влияние помех на качество анализа.

Наклон оси петли $\text{tg } \alpha$ может служить для оценки динамической растяжимости легких $C = \text{tg } \alpha$. Если измерять угловое отклонение $\Delta\alpha$, то можно оценивать степень изменения динамической растяжимости. Введение порога для $\Delta\alpha$ позволяет обнаруживать патологические изменения, связанные с резким увеличением или уменьшением растяжимости легких.

Среднеквадратическое отклонение сигнатуры используется в качестве оценки изменения формы петли относительно опорной кривой. Оно вычисляется следующим образом:

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{\theta} (r_{\theta}^* - r_{k\theta})^2},$$

где n – размер выборки ($n = 360$); r_{θ}^* – отсчеты сигнатуры опорной петли; $r_{k\theta}$ – отсчеты сигнатуры для k -го порядкового дыхательного цикла; $\theta = 1 \dots 360^\circ$.

Фактически данный параметр оценивает ошибку, связанную с отклонением в форме петель. Может быть использована и квадратичная форма данного критерия $(\sigma_k)^2$. Введение порога для σ_k позволяет выявить существенные отклонения в заданных режимах ИВЛ.

Сопротивление дыхательных путей в нашей работе предложено оценивать одним из двух способов. Первый основан на измерении ширины петли r на уровне середины осевой линии. Вторым способ предполагается вычисление площади фигуры S_3 , ограниченной осью петли и частью кривой в фазе выдоха. Учитывая трудности интерпретации измеренных отклонений в случае изменения размеров петли (что связано, например, с необходимостью увеличения V_T при ИВЛ), в работе предложено использовать дополнительную нормировку петель по максимальным значениям объема V_T и давления $p_{\max}$ опорной петли. В этом случае опорная петля, условно считающаяся «нормой», располагается по линии нормальной динамической растяжимости, а изменения параметров r и S_3 подлежат сравнению даже при изменении параметров управления вентиляцией легких.

В работе проведено моделирование алгоритма анализа петель ОД с применением специально разработанной программы, в основе которой лежит функция signature [4]. В качестве входных сигналов использовались:

– модельные кривые, полученные путем перевода спирографических изображений в цифровую форму (12 записей) [2];

– сигналы, полученные на аппарате ИВЛ путем механического моделирования изменений растяжимости S и сопротивления R дыхательных путей (23 записи);

– реальные записи спирограмм, зарегистрированные в условиях клиники в процессе респираторной поддержки пациентов (спирограммы 10 пациентов).

Реальные данные включали как выборку записей без патологий, так и сигналы с тяжелыми нарушениями органов дыхания (в основном ОРДС и обструкция дыхательных путей).

В качестве примера на рис. 3 и 4 представлены реальные петли ОД. Слева приведены спирографические кривые, справа – сигнатуры петель. Нижние кривые соответствуют нормальной форме спирограмм (рис. 3, б и рис. 4, б) и являются опорными. Верхние петли (рис. 3, а и рис. 4, а) имеют патологические отклонения и сравниваются с опорными.

На рис. 3 показаны петли ОД для случая снижения растяжимости, что вызывает поворот петли вправо. Это изменение обусловлено тем, что для достижения данного уровня объема дыхания (650 мл) требуется большее давление. Петли та-

кого вида можно наблюдать на поздних стадиях ОРДС. Однако наблюдаемое снижение растяжимости может происходить как постепенно, при развитии легочных заболеваний, так и внезапно – при острых нарушениях.

На рис. 4 показан случай расширения петли ОД, вызванного повышением сопротивления дыхательных путей на выдохе, причем инспираторные участки двух кривых аналогичны. Возможной причиной таких отклонений может быть появление нарушений проходимости (обструкция дыхательных путей) [2].

Результаты сравнения числовых характеристик сигнатур анализируемых петель показывают, что в первом случае (рис. 3) наблюдается снижение растяжимости легких ($\Delta\alpha = -15^\circ$), а во втором (рис. 4) наклон петли сохраняется ($\Delta\alpha = 2^\circ$), но изменяется форма петли. Чем больше различие в форме петель, тем большие значения получает критерий среднеквадратического отклонения. В нашем случае величина $\Delta\sigma = 0,31$ превышает значение порога, равное 0,15. Это связано с резким расширением петли ($\Delta r = 0,96$) и увеличением ее площади ($\Delta S_p = 0,08$).

Используя полученные характеристики, можно распознать эти опасные нарушения на ранних стадиях. Резкое уменьшение угла наклона α осевой линии петли ОД свидетельствует об увеличе-

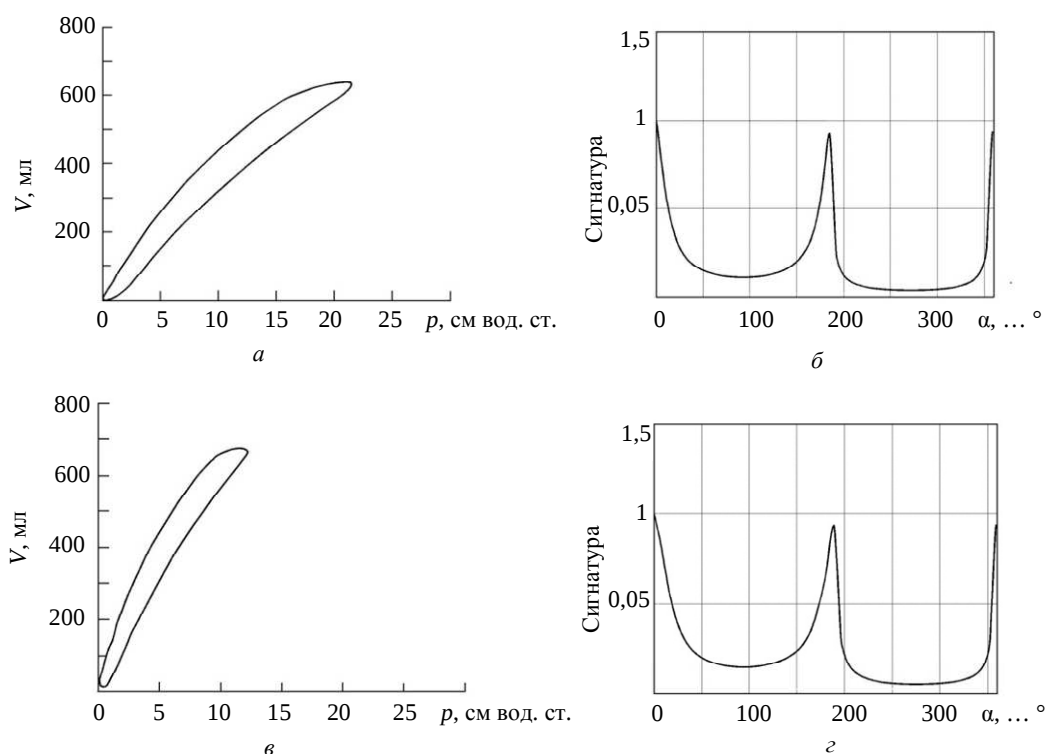


Рис. 3

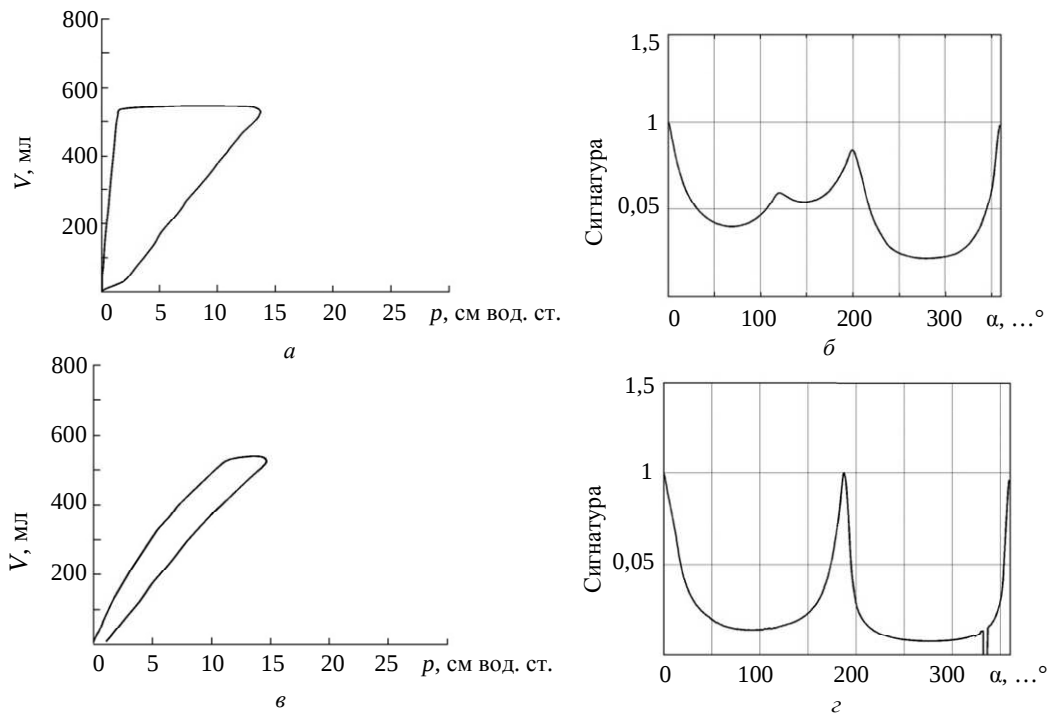


Рис. 4

нии жесткости легких и указывает на развитие возможных осложнений (ОРДС). Резкое изменение σ , увеличение значений параметров r и S_3 указывает на ее расширение и свидетельствует о развитии обструкции дыхательных путей.

В работе приведены результаты экспериментов по оценке эффективности распознавания различных форм петель по сигнатуре (реальные записи спирограмм) и обнаружению значимых изменений динамической растяжимости S и сопротивления R дыхательных путей (модельные сигналы). При моделировании спирограмм задавались разные значения S и R , что обеспечило возможность контроля изменений этих параметров. Результаты экспериментов показали, что во всех случаях были безошибочно распознаны кривые с измененной формой петли ОД, а также с отклонениями в динамической растяжимости легких. И только в 2 случаях из 30 (6,7 %) не удалось зафиксировать отклонения сопротивления дыхательных путей. Анализ записей показал, что эти ошибки были связаны с заданием слишком малых величин управляемого потока. Кроме того, проведен анализ статистической зависимости между заданными значениями R и вычисленными оценками сопротивления: r , r_3 , S_3 . Значения попарных коэффициентов корреляции k оказались достаточно высокими для всех трех параметров ($k > 0,85$), однако наибольшее значение коэффи-

ента корреляции $k = 0,91$ получено для параметра r . Это указывает на то, что данный параметр наиболее важен для контроля значимых изменений сопротивления дыхательных путей по петлям ОД.

Таким образом, в работе предложены числовые характеристики спирографических петель, позволяющие обнаруживать существенные отклонения в заданных режимах ИВЛ и распознавать ранние формы развития патологий дыхательных путей. Кроме того, показана возможность косвенной оценки изменений динамической растяжимости и сопротивления дыхательных путей по числовым параметрам сигнатуры петель.

Разработан комплекс программ автоматического анализа спирограмм, который предполагается использовать в аппаратах ИВЛ для расширения диагностических возможностей систем респираторной поддержки. Как показали исследования в клинических условиях, постоянный контроль формы кривой ОД, ее наклона и ширины является важной составляющей респираторной поддержки, особенно у пациентов с развивающейся патологией легких.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственный контракт № 16.522.12.2016 от 10.10.2012 г.) и РФФИ (проекты № 12-01-00583, № 13-01-00540).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебединский К. М., Мазурок В. А., Нефедов А. В. Основы респираторной поддержки. СПб.: Изд-во МАПО, 2006. 213 с.

2. Rapid Interpretation of Ventilator Waveforms / J. B. Waugh, V. M. Deshpande, M. K. Brown, R. J. Harwood. Upper Saddle River, New Jersey, 2007. 151 p.

3. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений / Пер. с англ. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.

4. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB / Пер. с англ. М.: Техносфера, 2006. 616 с.

L. A. Manilo, A. P. Nemirko, I. S. Salamonova

AUTOMATIC ANALYSIS OF FORM OF SPIROGRAPHIC LOOPS IN MECHANICAL VENTILATION

The analysis of various numerical characteristics of loops "volume-pressure" obtained from a signature of two-dimensional curves is carried out. Possibilities of application of the dynamic analysis of spiograms for an assessment of parameters of ventilation of lungs and early diagnostics of pathologies are shown. Methods of the automatic analysis of loops in the conditions of mechanical ventilation are considered.

Mechanical ventilation, automatic analysis of spiograms, signatures of loops



УДК 378.147+001.891.57

Д. Х. Имаев, Е. Е. Котова

Модели и алгоритмы принятия решений о распределении дидактических ресурсов в среде обучения

Предлагаются динамические модели процесса обучения как системы управления с обратной связью, алгоритмы принятия решений, компьютерные модели и пример имитации влияния возмущений на процесс обучения.

Процесс обучения, модель обучаемого, дидактический ресурс, алгоритмы управления, траектории обучения

Проблема управления процессом обучения стала актуальной в связи с внедрением программированного обучения и кибернетических методов в структуры педагогических процессов примерно с 60-х гг. прошлого столетия и постепенно стала занимать внимание не только отечественных и зарубежных психологов и педагогов [1]–[4], но и специалистов в области управления техническими системами [5]–[8]. Общность законов управления, действующих в системах различной природы (технических, биологических, социальных, экономических и др.), распространяется и на учебные процессы, охватывающие сферы овладения знаниями и получения профессионального образования.

Наряду с психолого-педагогическим направлением исследований в области управления процессами обучения можно выделить формирующееся с начала 60-х гг. кибернетическое направление. В практике и теории педагогики высшей школы помимо эмпирических исследований (наблюдения, эксперимента, измерения) стали применяться строгие формальные методы, связанные с математическим моделированием учебного процесса и его составляющих. Алгоритмам обучения и вопросам программированного обучения посвящены труды Л. Н. Ланды [6], кибернетическим методам исследования в применении к педагогике – А. И. Берга, Э. Я. Кольмана [5], вопросам научной организации обучения и плани-

рования учебного процесса – Э. Д. Мерзона [2]. В 70-е гг. в работах Ю. А. Гастева, А. А. Фельдбаума, Л. А. Растригина [4], [7], [8] и др. были высказаны идеи применения методов кибернетики к задачам обучения. Ю. А. Гастев процесс обучения представлял как «классический образец процесса управления». А. А. Фельдбаум представлял обучаемого, «свойства, качества, характеристики которого нужно изменять в целесообразном направлении путем обучения». Л. А. Растригин представлял моделирование процесса обучения с использованием адаптивной модели и модели ученика.

Как в направлении психолого-педагогических исследований, так и в области математического моделирования систем обучения был обозначен ряд проблем: выявление организационно-педагогических условий процесса обучения, поиск методов и средств активизации учебно-познавательной деятельности студентов, имитация различных аспектов учебного процесса и др., которые, несомненно, актуальны и сегодня. Особенностью образовательного процесса в настоящее время является возрастающая дифференциация и разнородность контингента обучаемых, различие в уровне подготовки, что необходимо учитывать при разработке инновационных учебных программ, учебных материалов, методов и форм обучения. В связи с изменениями и реформированием образовательного процесса, внедрением современных информационных технологий требу-

ются и новые способы решения проблем управления учебным процессом. В частности, многократные компьютерные имитационные эксперименты в «быстром» времени помогут проектировать сценарии учебной работы по новым специальностям, выбирать и планировать различные виды помощи учащимся, распределять бюджет времени, нагрузку преподавателя и т. д. Практическое применение математического моделирования и компьютерной имитации позволит исследовать процесс обучения во многих его существенных проявлениях.

Целью статьи является рассмотрение моделей и алгоритмов принятия решений о распределении дидактических ресурсов в системе управления учебным процессом. Разработки по математическому и компьютерному моделированию процесса обучения базируются на концепциях *динамичности* процесса обучения, подверженного возмущениям среды, *уровневой дифференциации* контингента обучаемых, *разделения дидактических ресурсов* на основную и дополнительную части, *адаптации* процессов дополнительного обучения к индивидуальным характеристикам обучающихся.

Процесс обучения чрезвычайно сложен для формализации. Выбор типов, классов и структур математических моделей остается за специалистами, имеющими опыт преподавания по конкретным методикам и отражает их опыт и традиции школы. Таким образом, предлагая различные модели обучаемого, разработчики помимо объективных сторон процесса отражают и свой субъективный взгляд на проблему.

усвоения материала в процентах к заданному объему знаний. Целью системы управления является уменьшение отклонения δy фактического уровня знаний от заданного y^* .

Ресурс обучения представлен двумя составляющими: постоянной базовой U_0 и дополнительной δu , зависящей от времени. Базовая часть рассчитана на так называемого «среднего» студента и подразумевает групповую форму организации занятий. Дополнительная часть ресурса подразумевает индивидуальную форму организации занятий для «отстающих» студентов. Текущая успеваемость $y(t)$ сравнивается с «программной траекторией» $y^*(t)$. Если выявлено положительное значение $\delta y(t)$, т. е. студент отстает от графика, то следует затратить дополнительный ресурс $\delta u(t)$. При «аддитивной» форме организации дополнительных занятий ресурс δu складывается с базовым $u(t) = U_0 + \delta u$. В этом случае преподаватель, например, повторяет материал, изложенный в базовой части.

Концептуальная модель процесса обучения включает также подсистемы оценки знаний, реализации дидактических ресурсов и принятия решений о дополнительных ресурсах.

Модели обучаемых как объектов управления учебным процессом. Идеализация подсистемы оценки результатов (рис. 1) означает, что уровень знаний обучаемого оценивается в любое время с любой точностью. Переменные $y(t)$ и $\delta y(t) =$

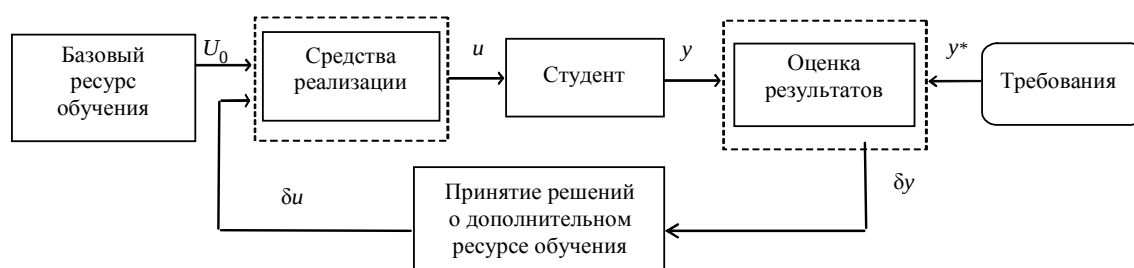


Рис. 1

Концептуальная модель системы управления процессом обучения с разделением дидактических ресурсов [10] изображена на рис. 1. Студент – объект управления – интерпретируется как преобразователь управляющего воздействия u – дидактического ресурса, выраженного в объемах информации за условную единицу времени в управляемую переменную y , – текущий уровень

$y^*(t) - y(t)$ оказываются функциями непрерывного времени, где $y^*(t)$ – заданный уровень знаний. Идеализация средств реализации дидактических ресурсов означает, что информация от преподавателя к обучаемому передается с любой степенью «дозировки» и может корректироваться в любой момент времени.

Допущение о непрерывности переменных приводит к динамическим моделям обучаемых в форме дифференциальных уравнений, типы и порядки которых могут варьироваться с целью учета различных представлений о динамике процесса и характеристик обучаемых. Далее рассматриваются модели в форме обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка. Линейная модель

$$\tau \psi \frac{d^2 y}{dt^2} + (\tau + \psi) \frac{dy}{dt} + y = \kappa \psi u \quad (1)$$

содержит τ – фактор вовлеченности обучаемого в учебный процесс (инерцию восприятия знаний); ψ – фактор памяти; κ – коэффициент, определяющий темп восприятия информации (усвоения знаний). Учет фактора мотивации в виде зависимости $\kappa = \kappa_0 + \mu F(y)$ от оценки уровня знаний y дают нелинейные модели вида

$$\tau \psi \frac{d^2 y}{dt^2} + (\tau + \psi) \frac{dy}{dt} + y = [\kappa_0 + \mu F(y)] \psi u; y_0, \dot{y}_0, \quad (2)$$

где μ – коэффициент мотивации. Функция $F(y)$ может иметь «прогрессивный» или «регрессивный» характер. Нелинейная модель может отражать зависимость фактора $\kappa(\delta y) = \kappa_0 + \mu \delta y$ отклонения уровня знаний от программы индивидуальных занятий.

Ранжирование студентов. Концепция «среднего» студента. Ранжирование позволяет распределить студентов по группам в зависимости от индивидуальных характеристик обучаемости, количественно выражаемых факторами κ, τ, ψ, μ . Далее предлагается выбрать для ранжирования факторы κ, τ [1], [5] и оценивать их в интервале условных единиц. Пусть параметры гипотетически «среднего» студента относятся к середине интервала: $(\kappa_{\text{ср}} / \tau_{\text{ср}}) = (3/3)$. Группа студентов с минимальной скоростью усвоения знаний, максимальной инерционностью вовлечения в учебный процесс и показателями $(\kappa / \tau) = (1/5)$, названа «слабой»; для них необходимы дополнительные занятия. «Сильные» – высокопродуктивные в учебной деятельности студенты – имеют максимальную скорость усвоения знаний и минимальную инерционность вовлечения в учебный процесс, т. е. образуют группу с показателями $(\kappa / \tau) = (5/1)$.

Представление модели обучаемого как преобразователя потока информации в уровень знаний естественно приводит к рассмотрению частотных характеристик. Наглядным способом сопоставле-

ния индивидуальных характеристик обучаемых являются логарифмические амплитудно-частотные характеристики (ЛАЧХ), которые способствуют ранжированию студентов с целью выбора стратегии обучения и тактики дополнительных занятий. Графики ЛАЧХ позволяют учитывать три фактора ($\kappa / \tau / \psi$) линейной модели (1).

Асимптотические ЛАЧХ в области низких частот определяются значением $\kappa\psi$, равным максимальному уровню усвоения материала студентом. Выше этого уровня наступает «динамическое равновесие» – усвоенный за единицу времени учебный материал равняется объему забываемой за то же время части. На рис. 2 сравниваются ЛАЧХ студентов с различными факторами κ и τ при одном и том же значении $\psi = 10$. Прерывистой линией показана низкочастотная асимптота ЛАЧХ модели с параметрами (5, 1, 100). При $\psi \rightarrow \infty$, студентом ничего не забывается.

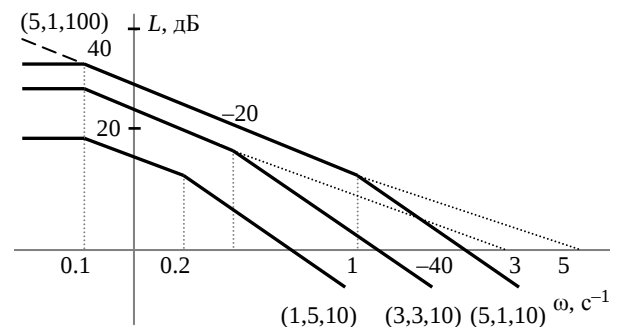


Рис. 2

Как следует из сравнения ЛАЧХ, способности обучаемых с различными факторами (κ, τ, ψ) можно интегрально оценить в виде «полосы пропускания частот»: чем шире полоса частот, тем лучше характеристики обучаемого. Сильный студент с параметрами $(\kappa, \tau, \psi) = (5, 1, 10)$ имеет наибольшую полосу частот, а слабый студент $(\kappa, \tau, \psi) = (1, 5, 10)$ – наименьшую. Студенты со средними способностями имеют ЛАЧХ, располагающиеся между ними.

Траектория обучения «среднего» студента и расчет интенсивности базового ресурса. В соответствии с принятой стратегией обучения базовая часть дидактического ресурса U_0 затрачивается равномерно во времени для всех студентов. Базовый ресурс рассчитывается из условия достижения гипотетическим студентом со средними способностями 100 % уровня знаний в кон-

це периода обучения, т. е. $y(T) = 100\%$. Такая организация учебного процесса соответствует так называемому разомкнутому принципу управления.

Решение линейного дифференциального уравнения (1) при нулевых начальных условиях и $u = U_0$ имеет вид

$$y(t) = \kappa\psi \left[1 + \frac{\tau}{\psi - \tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + \frac{\psi}{\tau - \psi} \exp\left(-\frac{t}{\psi}\right) \right] U_0. \quad (3)$$

Так как условием успешной организации учебного процесса является равномерное распределение во времени дополнительного ресурса $\delta u(t)$, задачу терминального управления предлагается решать в режиме слежения за заданной траекторией $y^*(t)$, которая представляет собой график накопления знаний средним студентом в условиях получения базовой части дидактического ресурса U_0 .

Траектории обучения $y^*(t)$ среднего студента $(\kappa_{\text{ср}} / \tau_{\text{ср}}) = (3/3)$ с различными факторами памяти ψ и длительностью обучения $(T, \text{у. е.})$ изображены на рис. 3: $(\kappa / \tau / \psi) = (3 / 3 / 0)$; $(\kappa / \tau / \psi) = (3 / 3 / 50)$; $(\kappa / \tau / \psi) = (3 / 3 / 100)$; $(\kappa / \tau / \psi) = (3 / 3 / 25)$ при единичном уровне базовых занятий $U_0 = 1.0$ и длительности обучения $T = 36$ и $T = 58$ у. е. Для сравнения там же приведены траектории слабого студента с параметрами $(\kappa / \tau / \psi) = (1 / 5 / 100)$ и сильного студента с параметрами $(\kappa / \tau / \psi) = (5 / 1 / 50)$.

Из условия $y^*(T) = 100\%$ усвоения учебного материала студентом со средними способностями $(\kappa_{\text{ср}} / \tau_{\text{ср}}) = (3/3)$ с удовлетворительной оценкой к концу заданного периода обучения получим аналитическое выражение для базовой части дидактического ресурса:

$$U_0 = \frac{100}{\kappa_{\text{ср}} \psi \left[1 + \tau_{\text{ср}} \exp(-T / \tau_{\text{ср}}) / (\psi - \tau_{\text{ср}}) + \psi \exp(-T / \psi) / (\tau_{\text{ср}} \psi) \right]}.$$

Если решить нелинейное уравнение

$$100 = \kappa_{\text{ср}} \psi \left(1 + \frac{\tau_{\text{ср}}}{\psi - \tau_{\text{ср}}} \exp\left(-\frac{T}{\tau_{\text{ср}}}\right) + \frac{\psi}{\tau_{\text{ср}} - \psi} \exp\left(-\frac{T}{\psi}\right) U_0 \right)$$

при условии $U_0 = 1.0$, то можно определить, чему равен требуемый период обучения T .

Алгоритмы принятия решений о дополнительных дидактических ресурсах. Управление процессом обучения проблемных студентов в ин-

дивидуальном режиме организовано по принципу обратной связи (см. рис. 1). Системы так называемого замкнутого управления позволяют достигать цели в условиях неполной определенности характеристик обучаемых, разницы в уровнях начальной подготовки и возмущений, о которых недостаточна априорная или текущая информация.

Дополнительный ресурс формируется по отклонению $\delta y(t)$ в соответствии с выбранным алгоритмом R :

$$\delta u(t) = \begin{cases} R[\delta y(t)], & \text{если } \delta y > 0 \\ 0, & \text{если } \delta y \leq 0. \end{cases} \quad (4)$$

Вторая строка (4) отражает тот факт, что нельзя применять к студенту отрицательные дидактические усилия, т. е. невозможно искусственно уменьшить объем усвоенных им знаний.

Простейшая тактика $\delta u = R[\delta(y)] = k_P \delta y$ заключается в пропорциональности дидактических усилий на степень отставания студента от графика $y^*(t)$. Недостатком так называемого P -алгоритма является установившаяся ошибка. Это приводит к тому, что в конце периода обучения студент может не набрать необходимого объема знаний.

Если принять так называемый I -алгоритм $R[\delta(y)] = k_I \int \delta y dt$, то дидактические усилия пропорциональны «накопленной» неуспеваемости, что обеспечивает нулевую установившуюся ошибку. Однако система, образованная астатическим объектом и I -регулятором, является структурно неустойчивой.

Наиболее часто используемый в практике управления техническими объектами PI -алгоритм [9]

$$\delta u = R[\delta(y)] = k_P \delta y + k_I \int \delta y dt$$

учитывает как текущую, так и интегральную со-

ставляющие неуспеваемости со своими весовыми коэффициентами. Методы теории управления позволяют получить условие устойчивости: $k_I < k_P / \tau$. Область устойчивости на плоскости параметров настройки (k_P, k_I) находится ниже прямой, проходящей через начало координат с наклоном $1 / \tau$.

Более сложным типовым алгоритмом управления является PID -алгоритм

$$\delta u = R[\delta(y)] = k_P \delta y + k_I \int \delta y dt + k_D d\delta y / dt, \quad (5)$$

в соответствии с которым дидактические усилия учитывают также прогресс или регресс процесса усвоения материала студентом. Условие $k_I < (1 + k k_D) k_P / \tau$ для PID-алгоритма расширяет область устойчивости.

плине; неточная оценка преподавателем уровня подготовки; ошибки в формировании тактики дополнительного обучения; ошибки в исполнении решений – неточная реализация ресурса, рассчитанного в соответствии с принятой стратегией и тактикой; недостаточно адекватная идентифика-

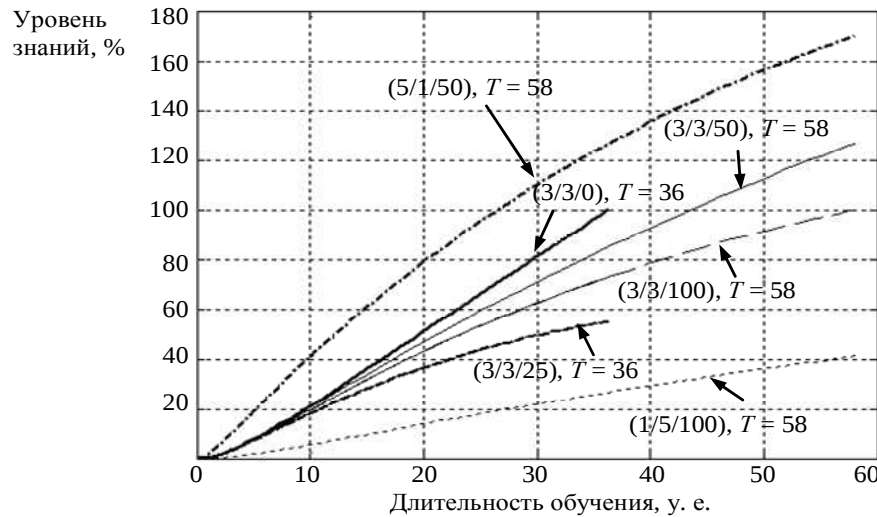


Рис. 3

Реализация принципа обратной связи и оптимальная настройка алгоритмов принятия решений обеспечивают устойчивое слежение за заданной траекторией обучения $y^*(t)$, т. е. достижение цели обучения при желаемом характере изменения во времени дополнительных ресурсов $\delta u(t)$.

Пример компьютерной имитации процесса обучения. Неизбежные нарушения, возникающие в ходе реального учебного процесса, приводят к отклонениям процесса от расчетной траектории. Перечислим некоторые важнейшие нарушения: пропуск занятий базового цикла; различие в уровне исходной подготовки студентов по дисциплине;

ция объекта управления – неверная оценка способностей студента, выражаемых в виде $(\kappa/\tau/\psi/\mu)$ -факторов. С целью качественной и количественной оценки влияния среды на процесс обучения необходимо выявить источники основных возмущений и разработать их математические и компьютерные модели.

Приведем для примера анализ зависимости результатов обучения от вариации индивидуальных характеристик (κ/τ) «слабых» студентов. Компьютерная модель построена по математической модели обучаемого на языке графического редактора Simulink (рис. 4). Подсистемы моделей студентов («среднего» Average student и «слабо-

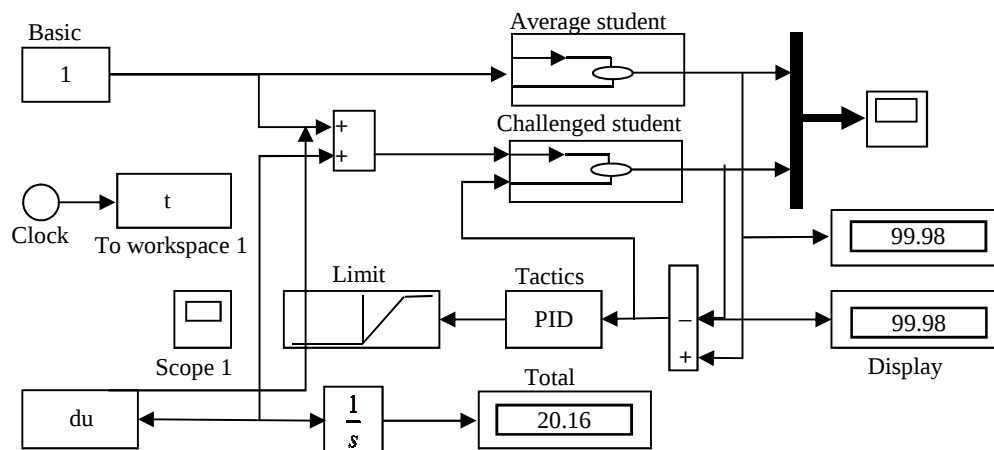


Рис. 4

го» Challenged student) в раскрытом виде изображены на рис. 5, а и б. Нелинейная модель «слабого» студента отражает зависимость фактора $\kappa(\delta u) = \kappa_0 + \mu \delta u$ от отклонения уровня знаний от программы индивидуальных занятий.

В качестве задающего воздействия замкнутой системы управления дополнительным обучением принимается траектория успеваемости «среднего» студента $y^*(t)$. Дополнительные дидактические усилия $\delta u(t)$ в соответствии с PID-алгоритмом (5) формируются блоком PID, который суммирует пропорциональную, интегральную и дифференциальную составляющие с соответствующими коэффициентами k_P, k_I, k_D . Дополнительные усилия согласно выбранной аддитивной форме организации занятий суммируются с базовыми $U_0 = 1$, который генерирует блок Basic.

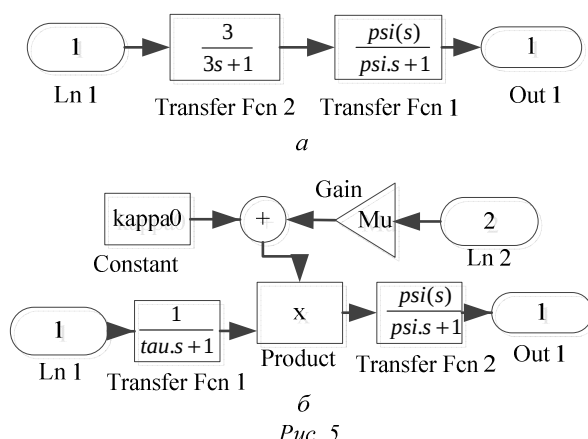


Рис. 5

Блок Limit ограничивает дидактические усилия неотрицательными значениями, что отражает факт передачи знаний только в сторону наращивания. Блок To Workspace служит для передачи результатов имитации в рабочее пространство MATLAB с целью последующей обработки. Блоки Display показывают уровни усвоенных студентами знаний в конце периода обучения. Блоки Score дают возможность визуализации процессов. Для учета суммарных дидактических усилий, представляющих собой интеграл от $\delta u(t)$, служит блок Integrator, выход с которого подается на дисплей Total.

На рис. 6 приведены графики зависимостей дополнительных дидактических ресурсов от времени для различных индивидуальных характеристик (κ/τ) «слабых» студентов. Кривые получе-

ны при одних и тех же параметрах настройки PID-алгоритма, рассчитанных на студента с показателями (2/4).

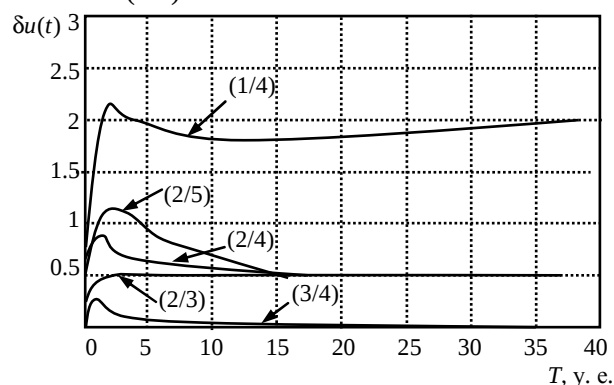


Рис. 6

Для студентов с другими параметрами обратная связь также обеспечивает достижение цели обучения – 100 % уровня знаний к концу периода. Однако требуемый объем дополнительных усилий различается и зависит от параметров студентов. Для менее способных студентов требуется больший объем дополнительных усилий. Таким образом, реализация принципа обратной связи позволяет достичь цели обучения в условиях неточной идентификации индивидуальных характеристик студента.

Представленная модель процесса обучения с разделением дидактических ресурсов рассматривается как система, реализующая принципы разомкнутого и замкнутого управления. Для количественного анализа процессов обучения предложены математические модели обучаемых как динамических объектов управления в форме линейного и нелинейного дифференциальных уравнений, коэффициенты которых отражают индивидуальные характеристики обучаемых. Компьютерные модели системы управления процессом позволяют имитировать различные сценарии процесса с учетом особенностей обучаемых и возмущений среды, что может помочь в планировании учебного процесса, распределении бюджета времени и нагрузки преподавателей.

Дальнейшие исследования и разработки следует сосредоточить на уточнении моделей подсистем оценки успеваемости, реализации дидактических ресурсов и алгоритмов принятия решений в четкой и нечеткой логике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лингарт Й. Процесс и структура человеческого учения. М.: Прогресс, 1970.

2. Мерзон Э. Д. Организация и планирование учебного процесса с учетом индивидуальных особенностей учащихся. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1973.

3. Якунин В. А. Обучение как процесс управления. Психологические аспекты. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1988.
4. Гастев Ю. А. О методологических вопросах рационализации обучения. Кибернетика. Мышление. Жизнь / под ред. А. И. Берга, Б. И. Бирюкова и др. М.: Мысль, 1964.
5. Возможное и невозможное в кибернетике: сб. статей / под ред. А. Берга, Э. Кольмана. М.: Наука, 1964.
6. Ланда Л. Н. Алгоритмизация в обучении. М.: Просвещение, 1966.
7. Фельдбаум А. А. Процессы обучения людей и автоматов. Кибернетика. Мышление. Жизнь / под ред. А. И. Берга, Б. И. Бирюкова и др. М.: Мысль, 1964.
8. Растринин Л. А. Адаптация сложных систем. Методы и приложения. Рига: Зинатне, 1981.
9. Ротач В. Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования. М.: Энергия, 1973.
10. Котова Е. Е. Моделирование процесса обучения с использованием управляющих дидактических стратегий // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. Вып. 5. С. 109–118.

D. H. Imaev, E. E. Kotova

MODELS AND ALGORITHMS OF DECISION-MAKING ON THE DISTRIBUTION OF DIDACTIC RESOURCES IN THE LEARNING ENVIRONMENT

The learning process is modeled as a dynamic feedback control system. The article proposes computer models and decision-making algorithms for such a system and considers an example of the simulation of the disturbances impact on the learning process.

Learning process, learner model, didactic resource, management algorithms, learning path



УДК 001.89+004.89+316.454.5

В. А. Дрещинский

Открытые инновации как механизм сетевого взаимодействия организаций, создающих знания

Приведены организационные причины недостаточной эффективности российских исследовательских компьютерных сетей. В качестве одного из направлений активизации научных исследований и разработок рассматривается концепция «открытых инноваций», основные подходы к их формированию и разработке новых знаний и инноваций.

Сетевые технологии научных исследований, открытые инновации, методика генерации и создания открытых инноваций на базе сетевых технологий

В современном информационном обществе научные знания и технологии научного исследования распределены весьма широко. В этой связи, для того чтобы эффективно реализовывать свои проекты, наукоемкие предприятия зачастую вынуждены прилагать значительные усилия для поиска университетских лабораторий и НИИ, занимающихся соответствующими разработками и имеющих возможности осуществить необходимые компаниям опытно-конструкторские и технологические разработки, осуществить поиск требуемых патентов и ноу-хау. Часто и научные организации не могут в одиночку осуществить инвестиционно- и ресурсоемкие междисциплинарные исследования. Нужна кооперация научных усилий и ресурсов, но субъекты исследований и их потенциальные потребители рассредоточены по стране и нередко до публикации результатов научных исследований не знают, чем занимаются многие их коллеги. В условиях глобализации экономики и в первую очередь такой важнейшей отрасли общечеловеческой деятельности, как наука, эта проблема еще более обостряется.

Значительную роль в получении экономического результата от ускорения сотрудничества в области научных исследований и разработок, в активизации инновационной активности и распространении инноваций могут играть *исследовательские компьютерные коммуникационные*

сети (research network), базы данных и знаний¹. Исследовательская компьютерная сеть представляет собой коммуникационную среду, созданную научным сообществом и связанными с ним предпринимательскими структурами на региональном, национальном или международном уровнях. Исследовательские сети обычно реализуют функции передачи сетевых новостей, ведения централизованных справочников ресурсов и абонентов сети, поддерживают режим обмена электронной почтой и телеконференций. Сети не являются юридическими лицами, а основными принципами их формирования являются: общность интересов и добровольность участия, безвозмездность предоставления собственных знаний и открытость доступа к этим знаниям для членов сети, готовность участников оказывать взаимную поддержку и осуществлять деловое партнерство.

В России в рамках государственных программ, а зачастую по инициативе международных научных организаций, при поддержке зарубежных грантов были созданы компьютерные сети, используемые для обмена информацией в области научных исследований. Многие из них функционируют более 15 лет. Среди них наиболее известными являются:

¹ Елютин А. В., Жижин М. Н. Развитие компьютерных сетей в России для науки и образования. Международная академия информатизации. 1994. Режим доступа <http://www.emag.iis.ru/arc/infosoc/emag.nsf>

RUNNet (Russian University Network) – Федеральная университетская компьютерная научно-образовательная сеть России, созданная в 1994 году в рамках государственной программы «Университеты России», которая объединяет более чем 2000 организаций, создающих знания: университетов, НИИ и наукоемких предприятий. Она обеспечивает пользователей научной информацией, информационно-справочными системами и базами данных по университетам и НИИ, электронными библиотеками научно-методических материалов;

RSSI (Russian Space Science Internet) – Российская космическая научная Интернет-сеть, объединяющая ряд научно-исследовательских институтов РАН и других научных организаций, работающих в сфере космических исследований, в том числе такие известные научные центры, как Институт космических исследований РАН, Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН и др.;

RUHEP/Radio-MSU – международная компьютерная сеть научных центров ядерной физики, предоставляющие услуги подключения широкому кругу некоммерческих организаций России, Германии и стран СНГ, в том числе НИИ ядерной физики МГУ, ФИАН, МФТИ, ИФВЭ, ИТЭФ;

RELARN-IP (Russian ELectronic Academic & Research Network) – добровольное некоммерческое объединение бюджетных научных и учебных организаций, пользователей сетей передачи данных, организованное на базе Российского научного центра «Курчатовский институт» для исследований, проводимых в научно-исследовательских центрах, академических институтах и университетах;

FREEnet (The Network For Research, Education and Engineering) – Российская научно-образовательная инженерная сеть, объединяющая региональные компьютерные сети на базе Института органической химии им. Н. Д. Зелинского РАН;

UTTN (University Technology Transfer Network) – университетская сеть трансфера технологий, созданная с участием СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и объединяющая более 60 технических университетов всех регионов России.

Цель создания научных сетей – содействие вовлечению научно-технического потенциала университетов и научно-исследовательских учреждений в коммерческий оборот путем органи-

зации взаимодействия вузовского и академического секторов науки с промышленностью через центры трансфера технологий, развитие межвузовской и внутрисетевой кооперации, обмен опытом в области коммерциализации технологий, активизация научных связей ученых и разработчиков инновационной продукции.

Основными направлениями деятельности исследовательских компьютерных коммуникационных сетей могут быть:

- формирование, по мере готовности к коммерческой реализации, базы данных результатов исследований и разработок университетов, НИИ, их трансфер;

- информационная поддержка фирм спин-офф по производству и реализации наукоемкой инновационной продукции, разработанной в университетах и НИИ, и содействие их дальнейшему развитию;

- формирование системы взаимодействия университетов с малыми венчурными предприятиями, реализующих интеллектуальную собственность вузов;

- поддержка кооперации проведения научных исследований и разработок в области крупных научно-технических проблем, решаемых коллективами различных университетов и НИИ;

- формирование базы данных запросов и потребностей предприятий в наукоемкой продукции; анализ этих запросов и формирование инновационно ориентированной тематики НИОКР профильных университетов и НИИ в соответствии с прогнозом развития приоритетных отраслей науки и техники;

- содействие кадровому обеспечению трансфера технологий путем организации повышения квалификации специалистов с использованием дистанционного обучения, подготовка семинаров и конференций с использованием технологий on-line;

- развитие межвузовской кооперации и взаимодействия, создание междисциплинарных инноваций;

- разработка и сопровождение сайта научных знакомств ученых по научным интересам, развитие кооперативных отношений между научными коллективами университетов, формирование на кооперативной основе научных коллективов для решения крупных научно-технических проблем.

Большинство рассмотренных исследовательских сетей были созданы в середине 90-х годов, однако, несмотря на значительные усилия, сете-

вые подходы к организации научных исследований в России еще не показали той эффективности, которая заложена в них потенциально. Существует ряд препятствий экономического, технического и организационного плана для эффективной работы сетей в целях науки и образования. Первые две группы причин выходят за рамки научных интересов автора, а основные *организационные проблемы* низкой эффективности российских исследовательских сетей, как показывают результаты проведенных исследований, могут заключаться в следующем:

- отсутствие у крупных корпораций – держателей ценных научных знаний в ряде приоритетных на мировых рынках отраслях российского наукоемкого производства (информационно-коммуникационные, нано-, био-, аэрокосмические, ядерные технологии, альтернативная энергетика и энергосбережение, сырьевой сектор) мотивации для активного обмена научными данными и инновационными разработками с университетами, передачи прав на использование интеллектуальной собственности сторонними организациями;

- недостаточная и не вполне достоверная информация о внешних источниках научных знаний для заинтересованных потенциальных потребителей этих знаний; например, только три университета Санкт-Петербурга имеют в RUNNet информацию о своих перспективных направлениях разработок;

- слабая структурированность, формализация и документирование новых научных знаний и разработок как их создателями, так и головными организациями, администрирующими сеть;

- данные и информация хранятся в формате, затрудняющем их обмен по сетям и использование другими заинтересованными пользователями;

- чрезмерная осторожность и неверие в возможность получения дохода от передачи прав использования интеллектуальной собственности и недостаточный опыт ученых и исследователей, особенно старшего возраста, в сетевом обмене научными данными и информацией, знаниями и разработками, программными продуктами, их низкая правовая и коммерческая защищенность при трансфере интеллектуальной собственности, новых технологий ноу-хау.

Одним из направлений повышения мотивации университетов, НИИ и НИЦ, наукоемких предприятий и корпораций к активному обмену научными данными и инновационными разработками,

по мнению автора, является организация научных исследований и реализация бизнес-моделей, основанных на принципах так называемых открытых инноваций [1], [2]. Это определяется резким возрастанием стоимости НИОКР при значительном сокращении жизненного цикла инновационной продукции.

Модель открытых инноваций на основе сетевых технологий – это способ организации и финансирования проектов научных исследований и разработок, когда иницилирующие их наукоемкие компании или исследовательские лаборатории университетов вместо организации собственных исследований осуществляют активный поиск и инициацию перспективных идей среди абонентов сетевой среды. Для этого в рамках сетевой площадки они могут осуществлять постановку исследовательской задачи для внешних разработчиков, объявлять открытый конкурс, мотивировать и приглашать всех желающих к участию в совместных исследованиях и создании инноваций. В качестве элемента экономической мотивации при реализации подобных проектов, по мнению автора, может служить финансовое вознаграждение участников или обязательство выкупить бизнес малых венчурных фирм. Следует отметить, что венчурный бизнес с большим предпочтением принимает участие в финансировании подобных открытых проектов.

Для создания нового продукта, поиска новых технологичных решений и создания новых рынков наукоемкие компании могут привлекать как собственные, т. е. внутренние, так и внешние научные и конструкторские ресурсы. Причем и результаты внутренних исследований также могут быть выведены на рынок для получения дополнительной прибыли. Фактически, это особая форма краудсорсинга, т. е. передачи функций научных исследований и разработок неопределенному кругу лиц на основании публичной оферты, не подразумевающей заключения трудового договора.

Одновременно может осуществляться активный инсорсинг технологий, а внутренние идеи, технологии и разработки, не интересные по тем или иным причинам самой компании, не кладутся «под сукно», а выводятся на новые рынки, как правило, через технологические фирмы спин-офф. Примером такой фирмы может служить ЗАО «ЭЛТЕХ-Мед», созданное при технопарке СПбГЭТУ «ЛЭТИ» для освоения и выпуска портативных рентгеновских аппаратов на основе разработанного в университете микрофокусного источника излучения.

Опыт работы одной из первых открытых инновационных систем в России Бизнес-инкубатора «Open Innovation Inc.», действующей совместно с Открытым университетом Сколково², позволил формализовать *методику генерации и создания открытых инноваций* на базе сетевых технологий. Она может включать следующие этапы.

На первом этапе заинтересованная компания или исследовательская лаборатория университета может осуществлять *постановку научной задачи исследования* или *заказ инновационной разработки*. Исходными данными для их формализации могут быть возникающие научные или технологические проблемы, планы по созданию новых рынков или разработке новой продукции, программа снижения издержек производства, перспективные проекты, связанные с новыми технологиями. На этом этапе целесообразно крайне четко и конкретно сформулировать конкурсную задачу, определить условия кооперации с партнерами. Заинтересованным наукоемким компаниям целесообразно назначить приз за решение поставленной задачи, сформировать коммитмент – финансовое обязательство оплатить свою долю по требованию на выкуп активов венчурных компаний.

На втором этапе на специальном конкурсном сайте проекта в исследовательской сети для свободного доступа должна осуществляться *публикация технического задания*, в том числе формула и особые требования конкурсной научной задачи или конструкторской разработки, инструменты совместной работы. Одновременно с этим для популяризации проекта и уточнения требований к нему целесообразно активно проводить обучающие и стимулирующие мероприятия различного рода: презентации проекта, выставки инноваций, форумы, круглые столы, научные семинары в предметной области и т. п.

На третьем этапе следует сформировать максимально широкую совокупность участников проекта и провести *регистрацию участников*: исследовательских лабораторий университетов и студенческих научных обществ; профильных специалистов различных НИИ; заинтересованных неспециалистов; малых венчурных фирм, имеющих собственные подобные наработки, и т. п. В

ходе этой работы целесообразно уточнить контент и определить архитектуру Интернет-представительств.

На четвертом этапе непосредственными участниками должно быть осуществлено *выдвижение концепций решения*. Для активизации творческой активности участников и ускорения принимаемых решений в рамках данного этапа целесообразно проводить обучающие тренинги, ознакомительные практики, поездки на действующее предприятие или в лаборатории заказчика. Важнейшим элементом этого этапа является проведение конференций, семинаров, совещаний и заседаний комиссии, в ходе которых целесообразно проводить презентацию концепций решений, осуществлять их обсуждение, анонимное голосование и отбор наиболее перспективных и интересных концепций. Завершаться данный этап может выработкой инструментов дальнейшей совместной работы и текущего рабочего взаимодействия участников, личных контактов и мотивации, а также порядка публикации в специализированных изданиях результатов исследований.

На пятом этапе методами активизации мышления может быть существенно *повышено качество отобранных решений*. Для этого могут использоваться методы теории решения изобретательских задач, латерального мышления, бенчмаркинг лучших элементов решений и их синтез, техники визуализации, форсайты и стратегические сессии, креативное дизайн-мышление.

На шестом этапе инициаторами проекта совместно с бизнес-ангелами и венчурными инвестиционными фондами целесообразно осуществлять *фильтрацию предлагаемых на конкурс проектов*. Фильтрация может осуществляться по вероятности реализации, срокам и стоимости воплощения соответствующего решения. На этом этапе должен также осуществляться патентный поиск и проверка патентной чистоты возможного технического решения. Завершаться данный этап должен структурированием сделок и формированием финансовых активов под заказ.

Основными преимуществами модели открытых инноваций на основе сетевых исследований как элементе национальной инновационной системы, по мнению автора, могут быть:

– значительное сокращение, по сравнению с закрытыми внутренними исследованиями, стоимости и сроков проведения исследований и разработок, поиска и внедрения продуктовых и технологических инноваций за счет более простой схемы орга-

² Материалы Бизнес-инкубатора «Open Innovation Inc.» Режим доступа <http://www.facebook.com/video/video.php?v=205942784226>

низации НИОКР и сокращения бюрократических барьеров при принятии конструкторских, технологических и бизнес-решений;

- активное вовлечение университетов в сферу предпринимательства и активизация процесса обмена научно-технологической информацией и объектов интеллектуальной собственности;

- формирование сети исследовательских университетов, способствующее переносу фундаментальных открытий и прикладных разработок в инновационные продукты, и содействие созданию университетских компаний спин-офф;

- приток новых идей из внешней среды, свободное и заинтересованное взаимодействие многих независимых исследователей и научных организаций в условиях глобальной, динамичной и высококонкурентной рыночной среды инновационных продуктов и технологий и связанный с этим процессом отток невостребованных идей во внешнюю среду;

- организация исследований и разработки компонентов инновационного продукта на основе совместной деятельности отдельных компаний, что обеспечивает высокую вероятность привлечения к решению научных проблем и конструкторских разработок наиболее заинтересованных, компетентных и высокопрофессиональных исследователей;

- возможность разделить риски высоких затрат, связанных с исследованиями и разработками, частично перекладывая неопределенность результатов на партнеров и университеты, а также за счет большей восприимчивости к принятию решений по закрытию проекта;

- снижение мобильности человеческого капитала компании и связанного с ней риска потери части накопленного интеллектуального и организационно-предпринимательского капитала, знаний и умений персонала;

- замена правовой защиты интеллектуальной собственности и результатов интеллектуальной деятельности рыночной коммерческой защитой.

Открытые инновации на основе сетевых исследований *не лишены и недостатков*. Основным недостатком, по мнению автора, является вынесение на открытые конкурсы менее значимых научных задач, связанных с корпоративными исследованиями и разработками, предполагающих хоть и перспективные, но все же «второстепенные» решения и технологии, поскольку базовые,

«прорывные» технологии наиболее вероятно будут оставаться закрытыми ноу-хау компаний.

Другим серьезным недостатком концепции открытых инноваций на основе сетевых исследовательских технологий, по мнению автора статьи, является проблема финансирования на конкурсной основе результатов размещенных университетами или НИИ научных исследований и разработок, находящихся на посевной стадии. Вместе с тем такие результаты могли бы стать крайне важными для последующих прикладных исследований и разработки прототипов инновационных продуктов и технологий.

В процессе генерации и разработки открытых инноваций университеты, НИИ и наукоемкие компании, объединенные исследовательской сетью, как показывает практика, часто сталкиваются с проблемой выбора между двумя стратегиями: защиты прав собственности и свободного обмена знаниями, являющимися общественным благом. Здесь важно найти баланс, поскольку активный обмен результатами исследований содержит значительный риск лишиться прав на свои технологии и разработки, в чем не раз убеждались российские университеты и исследовательские институты. Придерживаясь же жесткой защиты прав собственности и закрытости, участник сети не обменивается знаниями и технологиями, упуская потенциальную прибыль от продажи части прав на свои разработки или принятия на аутсорсинг исследований и разработок других компаний. Поэтому одной из важнейших задач организации, осуществляющей управление, сопровождение и развитие исследовательской сети, использующей открытые инновации, является создание эффективной системы управления объектами интеллектуальной собственности и результатами интеллектуальной деятельности. При этом в рамках сети целесообразно создание некоторого центра, который будет отвечать за координацию и финансирование исследовательских контрактов, как бы страхуя от возможных нарушений договорных обязательств.

Эффективность сетевых технологий, реализующих концепцию открытых инноваций, может оцениваться на основе адаптированных показателей, сформулированных авторами [3], и дополненных рядом специфических показателей, к которым могут быть отнесены:

– соотношение активных членов сетевого сообщества – научных и образовательных учреждений и наукоемких предприятий, принимавших участие в конкурсной разработке инновационных проектов, к общему числу абонентов сети;

– количество совместных научно-исследовательских проектов, выполняемых университетами и НИИ со сторонними наукоемкими и высокотехнологичными организациями;

– количество, степень новизны, приоритетность и период использования инновационных разработок и технологий, созданных на основе сетевых технологий открытых инноваций, и используемых компаниями – абонентами сети;

– число приобретенных и переданных разработок и технологий, сведения о которых размещались в сети;

– соотношение добавленной стоимости, полученной от переданных технологий, к общей стоимости отгруженной наукоемкой продукции;

– количество патентов на изобретение, полезных моделей, других результатов интеллектуальной деятельности, информация о которых в объеме, достаточном для принятия соответствующих решений и последующего использования на договорной основе, приведена в сети;

– соотношение затрат на приобретение технологий (патентов, лицензий, демонстрационных моделей и промышленных образцов, ноу-хау) у сторонних организаций к собственным затратам на исследования;

– активность участия on-line в конференциях, семинарах, совещаниях и заседаниях, в ходе которых рассматривались концепции открытых инноваций и осуществлялось их обсуждение.

Внедрение концепции открытых инноваций на основе сетевых технологий может позволить наукоемким компаниям быстро получать необходимый научно-технологический эффект, если они будут приобретать результаты внешних исследо-

ваний, привлекая к разработкам заинтересованные организации. Чтобы получить максимальную прибыль от реализации собственных, не востребованных к настоящему времени изобретений, разработок и технологий, они могут делиться ими, открывая доступ к лицензированию, или при необходимости продавать их. Это позволяет получить максимум прибыли от совместного создания и коммерциализации инновационных проектов.

По мнению автора, внедрение системы открытых инноваций на основе сетевых технологий может позволить в значительной степени повысить их эффективность. При этом важно правильно очертить область и тематику исследований, которые должны соответствовать интересам соответствующей отрасли и учитывать специфику научных исследований, приоритетных в том или ином университете или предприятии. Выбор тематики и задач исследований может как стимулировать, так и сдерживать процесс создания инноваций. Если темы исследований будут чересчур общими, это ограничит рост инновационной активности, а если они будут узкоспециализированными, затрагивающими области, в которых работают лишь отдельные компании, то это оставит в стороне других участников.

Развитие исследовательских сетей, как показывает зарубежный опыт, может происходить, главным образом, за счет активного участия в них заинтересованных наукоемких предприятий, обладающих высоким инновационным потенциалом, являющихся стратегическими партнерами университетов и научно-исследовательских институтов, в значительной степени финансирующих исследовательские проекты. Важным условием повышения эффективности исследовательской сети является также научная и предпринимательская репутация ее резидентов. При этом очевидно, что часть репутации такая сеть наследует от своих головных участников и отраслей учредителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чесбро Г. Открытые инновации. Создание прибыльных технологий. М.: Поколение, 2007.
2. De Jong J. P. J., Vanhaverbeke W., Kalvet T. Policies for Open Innovation: Theory, Framework and Cases, Reserch project / Vision Era-net. Helsinki, 2008.

3. Монастырный Е. А., Грик Я. Н. Открытые инновации как механизм управления инновационным развитием экономик России // Инновации. Июль 2010. № 7 (141). С. 25–29.

V. A. Deshchinskiy

OPEN INNOVATIONS, AS A TOOL OF NETWORK INTERACTION OF THE CREATING KNOWLEDGE ORGANIZATIONS

The organizational reasons of insufficient efficiency of Russians research computer networks are produced. As one of the directions to increase the activity of scientific researches and workings out, exchange expansion with the scientific data is considered the concept of «open innovations», the basic approaches to their formation and working out.

Network technologies of scientific researches and exchange of the scientific information, open innovations, technique of generation and creation of open innovations on the basis of network technologies

УДК 658

М. И. Житенева

Оценка экологического ущерба от загрязнения окружающей среды

Рассматриваются вопросы экологического вреда (ущерба) окружающей среде, методические подходы к оценке экологического ущерба.

Загрязнение окружающей среды, экологический ущерб, методические подходы к оценке экологического ущерба

Необходимость гармонизации российского законодательства с международными нормами и правилами, внедрение экономических методов охраны окружающей среды и развитие природоохранительного законодательства требуют новых подходов к нормативно-методическому обеспечению оценки экологических рисков и нанесенного экологического ущерба. Понятие «ущерб» обычно трактуется шире, чем материальный или реальный ущерб, и приближается по своему значению к понятию «вред»¹.

В Гражданском кодексе РФ термин «вред» является наиболее общим и охватывает реальный ущерб, упущенную выгоду, а также моральный вред. В Законе РФ «Об охране окружающей среды» понятие «вред окружающей среде» – это «негативное изменение окружающей среды в результате ее загрязнения, повлекшее за собой деградацию естественных экологических систем и истощение природных ресурсов» [1].

Сейчас сохранилось расширительное понимание ущерба окружающей природной среде и

природным ресурсам, под которым понимается денежная оценка всех негативных последствий загрязнения, причиненного окружающей среде, и порчи природных ресурсов. По экспертным оценкам, ежегодный экономический ущерб в результате ухудшения состояния окружающей среды составляет 4–6 % ВВП².

Загрязнение, истощение окружающей среды наносит урон состоянию экологических систем, хозяйственным объектам и здоровью людей. Исходя из этого различают три вида ущерба: экологический, экономический и социальный. Экологический ущерб характеризуется нарушениями, возникающими в природных объектах. Экономический ущерб – исчисленные в стоимостном выражении фактические или возможные потери народного хозяйства в результате ухудшения экологической ситуации. Социальный ущерб – ущерб, наносимый здоровью людей посредством загрязнения атмосферного воздуха, водных объектов, почвы, шумами и т. д.

Из отечественных нормативно-методических документов следует, что при расчете экологического ущерба целесообразно руководствоваться

¹ Медведева О. Е. Проблемы и практика расчета ущерба окружающей среде при обнаружении природоохранного законодательства: докл. на совещ. Росприроднадзора РФ. М., 20.02.2007. URL: <http://www.appraiser.ru/default.aspx?SectionID=326>

² Государственная программа РФ «Охрана окружающей среды» на 2012–2020 годы. URL: <http://www.mnr.gov.ru>

ФЗ «Об охране окружающей среды» и Гражданским кодексом РФ. В этих документах даются общие принципы оценки и возмещения вреда и убытков, включая вред, причиненный окружающей природной среде в результате экологического правонарушения.

Согласно ст. 77 ФЗ «Об охране окружающей среды» юридические и физические лица, причинившие вред окружающей среде в результате ее загрязнения, истощения, порчи, уничтожения, нерационального использования природных ресурсов, деградации и разрушения естественных экологических систем, природных комплексов и природных ландшафтов и иного нарушения законодательства в области охраны окружающей среды, обязаны возместить его в полном объеме в соответствии с законодательством.

Вред окружающей среде, причиненный субъектом хозяйственной и иной деятельности, возмещается в соответствии с утвержденными в установленном порядке таксами и методиками исчисления размера вреда окружающей среде, а при их отсутствии – исходя из фактических затрат на восстановление нарушенного состояния окружающей среды, с учетом понесенных убытков, в том числе упущенной выгоды.

Согласно ст. 78 ФЗ компенсация вреда окружающей среде, причиненного нарушением законодательства в области охраны окружающей среды, осуществляется добровольно либо по решению суда или арбитражного суда. Иски о компенсации вреда окружающей среде, причиненного нарушением законодательства в области охраны окружающей среды, могут быть предъявлены в течение 20 лет.

С точки зрения российских экономистов и экологов отличительной особенностью действующей системы экономической оценки экологического ущерба является ее покомпонентный подход. Данный подход состоит в оценке ущерба по отдельным компонентам природной среды и регламентируется не связанными между собой в методологическом отношении нормативно-методическими документами, содержащими различные технологии расчетов.

В 1999 г. на основании «Временной типовой методики...» [2] Госкомэкологией РФ была утверждена «Методика определения предотвращенного экологического ущерба» (далее – Методика-99) [3]. Методика-99 была предназначена «для получения укрупненной эколого-экономической оценки

ущерба, предотвращаемого в результате осуществления государственного экологического контроля, реализации экологических программ и природоохранных мероприятий, выполнения мероприятий в соответствии с международными конвенциями в области охраны окружающей среды, осуществления государственной экологической экспертизы, мероприятий по сохранению заповедных природоохранных комплексов и других видов деятельности территориальных органов системы Госкомэкологии РФ». В Методике-99 учитывается специфика эколого-ресурсных компонентов окружающей природной среды каждого субъекта РФ и направлений природоохранной деятельности; к исследуемым природным средам отнесены атмосферный воздух, водные ресурсы, почвы и земельные ресурсы, биологические ресурсы (растительный и животный мир). Фактический ущерб от загрязнения окружающей среды определяется теми объемами загрязняющих веществ, которые либо миновали очистные сооружения, либо не были уловлены на очистных сооружениях и поступили в окружающую среду. При расчете предотвращаемый ущерб представляет собой разность между ущербом при отсутствии природоохранных мероприятий и ущербом, уменьшенным благодаря реализации этих мероприятий, т. е. предотвращаемый ущерб определяется как абсолютная величина ущерба для любой ситуации (с учетом и без учета природоохранных мероприятий). На данный момент учеными из разных областей знаний – экологии, медицины, химии, эпидемиологии, промышленной экологии и т. п. разработано множество отраслевых методик на основании того же укрупненного подхода.

Нормативный подход к оценке ущерба проявляется в том, что практически все действующие методики оценки ущерба различным природным средам и объектам ориентированы на использование законодательно установленных стоимостных показателей и применение в расчетах фиксированных величин, заменяющих оценки реальных затрат на ликвидацию негативных последствий и причиненных убытков. Правовой статус утвержденных методик облегчает применение юридических процедур взыскания ущерба в силу законодательной признанности применяемых стоимостных величин. Однако, как показывает практика, оценки подобного рода дают недостоверные результаты, с точки зрения их соответствия разме-

ру и характеру реального ущерба природным ресурсам³.

В зарубежной практике вопросы методического обеспечения экономической оценки экологического ущерба получили развитие прежде всего в связи с наличием в законодательстве жестких норм ответственности за причиненный прошлый и настоящий ущерб, с развитостью рыночных отношений в сфере природопользования, развитой структурой собственности.

Такая оценка представляет собой оценку финансовых обязательств, связанных с возмещением вреда (ущерба). Экологическая ответственность имеет две формы: экономическую и юридическую. Экономическая форма базируется на правомерной деятельности и регулируется экономическими методами, прежде всего материальной заинтересованностью загрязнителя экологии в сокращении отходов. Она вытекает из общего принципа взаимоотношения общества и природы: «загрязнитель платит». Юридическая ответственность порождается неправомерными деяниями и регулируется административно-правовыми методами. Экономическая оценка экологической ответственности, в свою очередь, может осуществляться для различных целей, например для оценки потенциальной экологической ответственности в связи с приобретением объектов недвижимости, размещением производств, удалением отходов, выработкой стратегии управления риском и др.

Структура экологического вреда (ущерба), подлежащего возмещению согласно принятой международной практике и правовым нормам отдельных стран, включает следующие виды ущерба [4]:

- 1) жизни и здоровью;
- 2) имуществу;
- 3) окружающей природной среде.

При этом в каждый из трех видов ущерба может входить исчисление упущенной выгоды (потерянных доходов). Кроме того, отдельной категорией в составе ущерба могут рассматриваться расходы на превентивные мероприятия, т. е. на меры по предотвращению ущерба.

Ущерб имуществу возмещается в исковом порядке и определяется на основе стандартных методов оценки его стоимости методами трех основных методических подходов: затратного, до-

ходного и сравнительного. В странах с рыночной экономикой методология и теория оценки рыночной стоимости имущества имеет давнее и довольно широкое развитие, в связи с этим оценка ущерба имуществу является наиболее отработанной процедурой. Оценка ущерба природным ресурсам, как правило, производится на основании расходов на их восстановление.

В 1980 г. в США был принят «Комплексный закон об ответственности за загрязнение окружающей среды и компенсации за нанесенный ущерб», установивший материальную и финансовую ответственность за причинение ущерба природной среде и получивший в дальнейшем название «Закон о Суперфонде» (Comprehensive Environmental Response, Compensation and Liability Act- CERCLA). Основной целью принятия «Закона о Суперфонде» была ликвидация свалок и деградированных земель, испорченных нерациональной хозяйственной деятельностью. Данный закон применялся к причинителям вреда, независимо от того, когда был причинен экологический ущерб – до принятия данного закона или после, к ответчикам применяется строгая, солидарная и имеющая обратную силу ответственность. Строгая ответственность, устанавливаемая законом, означает, что ответчик обязан возместить ущерб независимо от того, действовал он добросовестно и с соблюдением правил или же халатно.

Солидарная ответственность означает, что ущерб является неделимым и не может быть отнесен к каждому ответчику пропорционально его вкладу, т. е. каждая сторона отвечает за весь нанесенный ущерб. Иными словами, любое лицо, потенциально ответственное за причиненный ущерб, можно обязать возместить все 100 % затрат, даже если оно поместило на свалку 1 % находящихся там отходов.

В США принципы и методы оценки ущерба природным ресурсам с целью определения финансовой ответственности сведены в методическом документе «Руководство по оценке ущерба природным ресурсам в соответствии с Законом о загрязнении нефтью, 1997 г.», в котором подробно изложена процедура оценки ущерба природным ресурсам в результате разливов нефти. Процедура разработана в целях содействия местным органам власти при предъявлении иска.

Вместе с тем судебная практика рассмотрения исков по возмещению ущерба природным ресурсам в США показывает, что стоимостная оценка ущерба

³ О состоянии методического обеспечения оценки ущерба природной среде в Российской Федерации и за рубежом И. К. Яжлев. http://www.aekos.ru/documents/analytic/appraisal_of_damage

компонентам окружающей природной среды чрезвычайно трудный и спорный вопрос.

В странах, где законодательством предусмотрена ответственность за прошлый экологический ущерб, наиболее простой вариант оценки производится в рамках процедуры «environmental due diligence» (или оценки воздействия на окружающую среду). Оценку осуществляют многочисленные компании в сфере оценки недвижимости, инженерных и экологических услуг. Процедура оценки не регламентируется законодательством, однако она является общепринятой в хозяйственной практике.

В отличие от стран с развитой экономикой (стран ОЭСР, стран ЕС), в России до настоящего времени не предпринимались системные меры для ликвидации экологического ущерба⁴. Российская Федерация отстает от стран ОЭСР и ЕС в решении проблемы оценки и ликвидации накопленного экологического ущерба минимум на 15–20 лет, в связи с чем представляется необходимой разработка и реализация комплекса мер по ликвидации экологического ущерба, связанного с хозяйственной деятельностью, основанного на международном опыте и всестороннем изучении масштабов проблемы накопленного экологического ущерба в Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон «Об охране окружающей среды» от 10.01.2002 № 7 (с изм. от 07.12.2011 № 417-ФЗ).
2. Временная типовая методика определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей среды. М: Экономика, 1986.
3. Временная методика определения предотвращенного экологического ущерба. Утверждена Председателем Госкомэкологии РФ В. И. Даниловым-Данильяном 09.03.1999. М., 1999.
4. Оценка стоимости недвижимости / С. В. Грибовский, Е. Н. Иванова, Д. С. Львов, О. Е. Медведева. М.: Интерреклама, 2003.

М. I. Zhitenyova

ASSESSMENT OF ECOLOGICAL DAMAGE FROM ENVIRONMENTAL POLLUTION

In article questions of ecological harm (damage) to environment, methodical approaches to an assessment of ecological damage are considered.

Environmental pollution, ecological damage, methodical approaches to an assessment of ecological damage

⁴ URL: <http://nera.biodat.ru/>



УДК 940.55 (47=57)

Р. А. Ялышев

Национальная политика Советского Союза в годы перестройки

Рассматривается процесс разработки новых принципов национальной политики в условиях обострения национальных отношений в СССР периода перестройки. Выделяются основные этапы, характеризующие курс М. С. Горбачева в сфере национальных отношений и основные шаги союзного руководства по разработке и реализации национальной политики. Делается попытка проанализировать основные причины провала национальной политики Горбачева и, как следствие, распада СССР.

СССР, перестройка, М. С. Горбачев, союзные республики, новый союзный договор, распад СССР

Открываем попавшуюся на глаза газету «Правда» за 1 марта 1985 г. На первой странице статья – «В единой семье народов-братьев», в которой подводятся итоги выборов в Верховные Советы автономных республик. В глаза бросаются традиционные для тех времен цифры – 99,99 % проголосовавших в большинстве республик. Далее подробный статистический отчет о количестве «партийных» и «беспартийных», рабочих и колхозников и т. д. Но в тексте нет ни слова о национальном составе [1].

До избрания М. С. Горбачева Генеральным секретарем ЦК КПСС оставалось ровно десять дней. В тот момент невозможно было даже в общих чертах представить распад раздираемого национальными конфликтами огромного государства менее чем через 7 лет. Однако это случилось. Одной из главных причин краха стали национальные проблемы.

С приходом Горбачева к власти начался новый этап в истории СССР, впоследствии получивший название эпохи перестройки. История перестройки закончилась крушением СССР в декабре 1991 г. Основной задачей этой статьи является попытка проанализировать национальную политику Горбачева и определить, какую роль она сыграла в разрастании межнациональных конфликтов и в распаде СССР.

Политика советского интернационализма (1985–1987). 11 марта 1985 г. М. С. Горбачев возглавил СССР. Страна ждала от него перемен и он

это чувствовал. Однако можно сказать, что сфера национальных отношений в Союзе ССР к этому времени выглядела вполне благополучно и не требовала немедленного и глубокого реформирования. Большинство руководителей и простых граждан полагали, что национальные проблемы в Советском Союзе в целом успешно решены и построена единая общность – советский народ. Горбачев действовал исходя из этих представлений.

На протяжении многих лет практически во всех крупных программных выступлениях советские руководители затрагивали тему национальных отношений. При этом регулярно звучала привычная риторика: «национальный вопрос, оставшийся от прошлого, в Советском Союзе успешно решен», «ленинская национальная политика выдержала испытание исторической практикой» и т. п. При этом всегда говорилось об отдельных недостатках в сфере межнациональных отношений, таких как местничество, национальная замкнутость, иждивенческие настроения и т. д. В таком ключе была выдержана речь Л. И. Брежнева на торжественном заседании, посвященном 50-й годовщине образования СССР. В своем выступлении глава страны упомянул о существовании национальной проблемы в СССР, но в целом речь была выстроена в мажорных тонах [2].

В 1982 г. новый Генеральный секретарь ЦК КПСС Ю. В. Андропов выступил с речью по поводу 60-летия СССР. Он более объективно оценил ситуацию и, в частности, отметил, что «искажения в сфере национальных отношений питаются

не только пережитками прошлого, но и просчетами в работе» [3]. Андропов был готов к серьезному обсуждению проблем в сфере национальной политики. Незадолго до своей смерти он поставил задачу подготовки специального пленума ЦК КПСС по этим проблемам и рассматривал возможность предоставления статуса автономии немцам Поволжья, чтобы удержать эту трудолюбивую и высококвалифицированную часть населения СССР от переселения в Германию [4]. Но Андропов умер, не успев реализовать свои планы.

М. С. Горбачев в своей речи на пленуме ЦК КПСС в день избрания генсеком лишь вскользь упомянул о том, что партия «способна учесть интересы всех наций и народностей страны» [5]. Однако реформаторский порыв Горбачева изначально не распространялся на сферу национальных отношений. В первые три года правления Горбачев был уверен, что в этой сфере в союзе все в порядке.

Традиционный для советской системы интернационализм и убежденность в крепости единства Советского Союза привели Горбачева к серьезным ошибкам в выработке национальной политики на первом же этапе перестройки.

С начала 1986 г. с подачи Горбачева стала набирать обороты политика гласности, ставшая одним из основных направлений реформаторского курса нового советского лидера. Гласность подразумевала ослабление цензуры в СМИ, большую открытость власти, расширение свободы слова и т. д. Таким способом команда Горбачева стремилась быстро устранить некоторые недостатки хозяйственной системы СССР, избавиться от постаревших брежневских кадров, привлечь общество к решению существовавших проблем. Надо отметить, что свобода слова была необходима для перемен, затеянных Горбачевым.

Серьезной ошибкой можно признать то обстоятельство, что власть очень быстро стала утрачивать контроль над процессом проникновения гласности в работу СМИ. При этом никак не был просчитан фактор распространения гласности на сферу национальных отношений. В доперестроечные годы вспышки национализма случались в Прибалтике, Грузии, Западной Украине и т. д. Они обычно обсуждались на Политбюро, и власть их гасила за счет собственного авторитета, но в СМИ эта информация практически никогда не

проникала. Отчасти по этой причине проблема не обретала широких масштабов.

Не так трудно было проанализировать возможные сценарии распространения национализма в условиях гласности, но этого сделано не было. Позволив обсуждать проблемы, надо было быть готовым их решать. Однако Горбачев пребывал в плену стереотипов, считая национальный вопрос в целом решенным.

Наглядным примером недооценки М. С. Горбачевым всех тонкостей национальных отношений может служить ситуация со сменой партийного руководства в Казахстане в конце 1986 г., когда во главе республики вместо казаха Д. А. Кунаева был поставлен русский Г. В. Колбин. Это вызвало столкновения на национальной почве в Алма-Ате, но даже после таких событий адекватные выводы Горбачев сделал не сразу.

Первые тревоги по поводу национальных отношений М. С. Горбачев испытал, побывав в феврале 1987 г. в Эстонии и Латвии. Он увидел проблему, но полагал, что она обусловлена бюрократическими издержками и отсутствием у союзного руководства должного уважения к национальной специфике [6]. После возвращения из поездки на заседании Политбюро Горбачев сказал, что для решения национального вопроса надо «осадить руководящих работников» [6].

Такие суждения показывают, что глубина проблемы не была понятна высшему руководству страны в полном объеме. Впоследствии это признали и Горбачев [7] и многие его сподвижники. Так А. С. Грачев, будущий пресс-секретарь Горбачева, отмечает, что до своей поездки в Прибалтику Горбачев просто не мог представить, что в СССР есть республики, не желающие жить даже в обновленном союзе [8].

Следует отметить, что десятилетиями выстраивавшаяся политика создания единой советской общности народов в условиях гласности терпела крах. Быстрый рост националистических проявлений заставил союзное руководство искать иные способы решения национальных проблем. С 1988 г. направление национальной политики меняется.

Курс на перераспределение полномочий (1988–1990). Большинство руководящих кадров, включая М. С. Горбачева, и значительная часть граждан СССР понимали, что реалии жизни в стране зачастую расходились с тем, что было прописано в

советских законах. Ярким примером тому служит сфера национально-государственных отношений внутри СССР. Так Конституция Союза ССР гарантировала право наций на самоопределение, а союзные республики обладали широкими правами и полномочиями, в том числе правом выхода из СССР. Однако федеративные отношения на практике нарушались. Во многих аспектах жизни Советский Союз существовал фактически как унитарное государство.

На заседании Политбюро в апреле 1988 г. М. С. Горбачев выступил с резкой критикой существовавшей системы власти и высказался за определенное перераспределение полномочий между союзным центром и республиками [9].

На первый взгляд новое направление национальной политики хорошо сочеталось с программой экономических реформ, которые с подачи генсека осуществлялись в это же время правительством Н. И. Рыжкова и были направлены на расширение прав республик при осуществлении экономической деятельности.

Летом 1988 г. этот курс был закреплён в решениях XIX партийной конференции. В частности, на конференции Горбачев говорил о необходимости привести «в соответствие с радикальной экономической реформой права союзных республик», «уточнить положение, права и обязанности союзных, автономных республик, других национальных образований» [10]. Таким образом, Горбачев предлагал решить проблему межнациональных отношений путем перераспределения полномочий между центром и республиками. При этом речь шла о совершенствовании действующей Конституции СССР и законов, регулирующих национальные вопросы. Участники конференции закрепили этот курс в специальной резолюции «О межнациональных отношениях».

Однако принятые на конференции решения о перераспределении полномочий реализовывались крайне вяло, так как наряду с ними было принято решение о немедленном осуществлении глубоких политических реформ. Речь шла о возврате к ленинским принципам демократии, то есть о создании съезда народных депутатов СССР. Трудно было ждать серьезных и быстрых решений в сфере национальной политики, так как большинство изменений требовали политической воли и четко функционирующего законодательного механизма. В 1988 г. не оказалось ни того, ни другого. Власти

теряли время. Националисты, воспользовавшись демократизацией, укрепляли свои позиции, усиливая националистическую пропаганду. Обстановка быстро накалялась.

Весной 1989 г. были проведены выборы народных депутатов СССР. Избирательная кампания проходила в острой борьбе между различными политическими силами. В Прибалтике серьезного успеха добились националисты. В итоге первый Съезд народных депутатов СССР вынес вопросы национально-государственного строительства на обсуждение широких масс. Депутаты из республик Прибалтики все усердней стали лоббировать идею заключения нового союзного договора между республиками вместо Договора об образовании СССР 1922 г., которая впервые была озвучена прибалтийскими партийными функционерами еще в 1988 г. Союзные власти категорически отвергали идею нового договора, понимая ее разрушительную силу. Однако альтернативных своевременных и эффективных решений национальных проблем они найти не смогли.

Отметим, что весной 1989 г. М. С. Горбачев уже осознал реальность угрозы распада СССР, но полагал, что ее можно предотвратить. Впоследствии он так описывал ситуацию в своих воспоминаниях: «... допуская возможность отделения в принципе, я, не скрою, надеялся, что развитие экономической и политической реформы будет опережать процедуры «отделенческого процесса» [11]. Но в жизни все шло наоборот.

Наглядной демонстрацией отсутствия политической воли в вопросе определения национальной политики стали события осени 1989 – весны 1990 гг. В команде Горбачева начались «шатания». Большинство сподвижников генсека высказывались за продолжение «плавной» модернизации федеративных отношений путем внесения изменений в законодательство. Однако ближайшие советники Горбачева уже предлагали согласиться на перезаключение союзного договора. Сам Горбачев «искал консенсус».

В сентябре 1989 г. состоялся пленум ЦК КПСС по национальному вопросу. На нем вновь был подтвержден курс на внесение изменений в Конституцию СССР, но при этом была предпринята попытка увлечь сторонников заключения нового союзного договора компромиссной идеей подписать новую декларацию об образовании СССР как составную часть Конституции. Однако главным результатом пленума можно признать тот факт, что сепаратистские силы все больше стали чувствовать нерешительность Горбачева и

продолжили оказывать на него давление. Следствием такой обстановки стало то, что уже принятые решения властей не реализовывались, а «пропихивание» идеи нового союзного договора продолжалось и набирало силу.

К концу 1989 г. союзные власти находились в растерянности по поводу дальнейших шагов в реализации национальной политики Советского Союза.

Финалом в политике перераспределения полномочий между центром и республиками стало принятие Верховным Советом СССР целой серии законов, которые напрямую были связаны с проблемами межнациональных отношений. Произошло это стремительно в апреле – мае 1990 г. Были приняты законы «Об усилении ответственности за посягательства на национальное равноправие граждан и насильственное нарушение единства территории Союза ССР», **«О порядке решения вопросов, связанных с выходом союзной республики из состава СССР»**, «Об основах экономических отношений Союза ССР, союзных и автономных республик», «О языках народов СССР», «О свободном национальном развитии граждан СССР, проживающих за пределами своих национально-государственных образований или не имеющих их на территории СССР», «О гражданстве СССР» и др. [12. Ч. 19. С. 65–67, 72–77, 92–97, 128–134, 144–148, 221–231].

Наиболее важным был закон **«О разграничении полномочий между Союзом ССР и субъектами федерации»** [12. Ч. 19. С. 140–144]. Проект этого закона был принят Верховным Советом СССР 26 апреля 1990 г. и подписан М. С. Горбачевым в тот же день.

Очевидно, что законы сильно запоздали. Следствием этой ситуации стало то, что межнациональные проблемы стремительно нарастали. Национальная политика вышла из-под контроля союзных властей: центр оказывался не в состоянии направлять и осуществлять ее без участия республиканских лидеров.

Главным итогом курса «консервативной» модернизации СССР путем перераспределения полномочий следует признать тот факт, что этот курс так никогда и не был реализован полностью. В течение 1988–1989 гг. власти избранный курс национальной политики в основном только декларировали, но необходимых мер не принимали. Когда же решения приобрели конкретные формы законов, направление национальной политики уже изменилось, и был взят радикальный курс на разработку нового союзного договора.

Новый союзный договор. Решение о разработке и подписании нового союзного договора было принято в феврале 1990 г. на пленуме ЦК КПСС, а в марте это решение подтвердил третий Съезд народных депутатов СССР.

Поначалу союзные власти пытались объединить старый и новый курсы национальной политики. Не случайно депутаты Верховного Совета СССР в процессе обсуждения закона о перераспределении полномочий в первом чтении неоднократно спрашивали ведущего заседание Р. Н. Нишанова, что они обсуждают: закон или договор. Нишанов отвечал весьма расплывчато. Все его ответы сводились к тезису: что получится, то и примем [12. Ч. 4. С. 23–24]. Однако «техническая» попытка выдать закон за договор не удалась. Закон был принят в качестве основы для работы над союзным договором.

Отметим ряд важных причин, которые заставили Горбачева поменять курс и заняться разработкой нового договора. Во-первых, таким образом он хотел удержать в составе СССР республики Прибалтики, которые первыми выдвинули идею договора, а к началу 1990 г. уже стремились выйти из союза. Во-вторых, союзное руководство стремилось перехватить инициативу у российской оппозиции в лице Б. Н. Ельцина, который стремился к власти в РСФСР и взял на вооружение идею нового союзного договора. В-третьих, такое решение можно признать определенной уступкой республикам в обмен на их согласие учредить пост Президента СССР для укрепления союзной вертикали власти [4].

Надо признать, что в начале 1990 г. руководители СССР еще не могли полностью оценить весь риск курса на заключение нового договора. Расчет был на то, что с Россией, Украиной, Белоруссией, Казахстаном и республиками Средней Азии особых проблем не будет, а наличие такого мощного ядра заставит задуматься и остальных. Опасность выхода казалась реальной только в отношении прибалтийских республик. В то же время именно представители Прибалтики требовали нового договора, и была надежда, что уступив их требованиям, центр создаст благоприятные условия для борьбы тех сил в Латвии, Литве и Эстонии, которые выступали против сепаратизма.

Надежды не оправдались, а вскоре ситуация стала развиваться стремительно. В России выборы выиграл Б. Н. Ельцин. Он стал руководителем республики, возглавив Верховный Совет РСФСР. Благодаря авторитету Ельцина и с его подачи первый Съезд народных депутатов РСФСР 12 июня 1990 г. принял *Декларацию о суверенитете России*, в

которой говорилось о верховенстве российских законов над союзными.

Принятая Россией декларация фактически спровоцировала большинство республик и других субъектов федерации на принятие аналогичных решений. Позднее этот процесс получил название «парад суверенитетов». Одним из результатов повальной суверенизации республик явилась «война законов» между союзом и его субъектами, которая сильно ударила по целостности единого государства и усилила центробежные тенденции.

Слабость позиций союзного руководства и укрепление республиканских властей привели к тому, что национальную политику стало невозможно выстраивать без участия республик, и Горбачев постарался вовлечь республиканских лидеров в процесс разработки и подписания нового союзного договора. На первом заседании специально созданного нового органа – Совета федерации – присутствовали почти все руководители союзных республик. В 1990 г. к работе над договором удалось привлечь представителей 12 союзных республик, за исключением делегатов от республик Прибалтики.

Первый вариант нового союзного договора был подготовлен к ноябрю 1990 г. Проект договора носил федеративный характер и позволял создать прочное единое государство с сильным центром [13]. Фактически именно поэтому его заблокировал Б. Н. Ельцин при поддержке ряда республиканских лидеров, стремившихся превратить союз в конфедерацию и желательно без участия центра. Подписание не состоялось.

В январе 1991 г. союзные власти решились применить силовые методы для наведения конституционного порядка в республиках Прибалтики. Но провал операций в Вильнюсе и Риге окончательно выбил почву из под ног союзного руководства. У Горбачева оставался последний шанс – прямо опереться на мнение народа.

В марте 1991 г. состоялся первый в истории страны общесоюзный референдум по вопросу о сохранении СССР. Граждане Советского Союза большинством голосов (76,4 %) высказались за сохранение единого государства и тем самым дали в руки Горбачева серьезный аргумент в его противостоянии с Ельциным и главами других республик.

Результаты референдума позволили М. С. Горбачеву запустить *«новоогаревский процесс»* обсуждения нового союзного договора. К лету 1991 г. в ходе острых дискуссий был выработан довольно противоречивый проект союзного договора,

сочетавший в себе как элементы федерации, так и конфедеративные принципы, но позволявший при наличии политической воли сохранить единую страну.

Заключение договора было назначено на 20 августа 1991 г. Однако подписать документ не удалось, так как конфликт сторонников и противников договора в команде Горбачева достиг апогея и вылился в выступление ГКЧП, направленное на срыв подписания нового союзного договора. Проявив нерешительность, ГКЧП потерпел поражение.

Выступление ГКЧП окончательно подорвало авторитет союзного руководства. В дальнейшем выработка конкретных шагов национальной политики в первую очередь зависела от позиции российского руководителя Б. Н. Ельцина, а он проводил последовательную политику демонтажа важнейших союзных структур и вскоре окончательно встал на путь отказа от единого государства. В этих условиях деятельность Горбачева фактически свелась к попыткам возродить «новоогаревский процесс» и зацепиться хоть как-то за конфедеративный новый союзный договор. Горбачев шел практически на любые уступки республикам, но и это не помогло. В команде Ельцина верх взяли силы, стремившиеся к разрушению СССР и обретению Россией самостоятельности.

Осенью 1991 г. руководство России и Украины осуществляло согласованную политику, направленную на быстрое уничтожение союзного государства [14], а в декабре они совместными усилиями при участии руководства Белоруссии воспользовались слабостью союзного руководства и разрушили СССР, подписав «Беловежские соглашения». Союзные власти в лице Президента СССР М. С. Горбачева не нашли в себе сил противостоять процессу распада, и СССР прекратил свое существование.

Следует подчеркнуть, что решение М. С. Горбачева согласиться на разработку и подписание нового союзного договора являлось грубейшей ошибкой. В условиях роста национализма и сепаратистских настроений союзное руководство поддалось давлению со стороны республик в надежде, что на уступки центра республики отреагируют своими уступками и заключат новый договор. Однако на практике переговорный процесс по новому союзному договору стал мощным инструментом для шантажа центра со стороны республиканских лидеров. В итоге новый союзный договор фактически превратился в механизм демонтажа союзной государственности и привел к распаду СССР.

Необходимо признать, что в целом национальная политика эпохи перестройки по большому счету состоит из серии серьезных ошибок и просчетов.

В начале перестройки Горбачев вообще не осознавал степень важности национальной политики для такой огромной многонациональной федерации и не учел национальный фактор в ходе осуществления своего реформаторского курса.

На фоне обострения национальных противоречий в процессе перестройки команда Горбачева пыталась на ходу выработать общее направление национальной политики. Но Горбачев так и не смог четко продемонстрировать свою позицию. Он оказался неспособен создать серьезную программу действий в национальной сфере и последовательно ее реализовывать. Важнейшие решения постоянно принимались с большим опозданием и в ответ на уже возникшие проблемы, не было движения на опережение. Такой подход порождал множество ошибок и непоследовательность курса национальной политики. А это, в свою очередь, создавало благоприятную обстановку для центробежных тенденции и в итоге привело к распаду единого государства.

Следует отметить слабый анализ командой Горбачева причин стремительно нараставших национальных проблем. Поэтому и наблюдается череда ошибочных решений при урегулировании национальных конфликтов: где надо было продемонстрировать авторитет власти и, возможно, применить силу, долго и мучительно искали компромиссы; где требовались деликатность и осторожные подходы, использовался силовой способ. Характерно и то, что союзные власти постоянно попадались на провокации националистов.

Неспособность союзного руководства выработать своевременный и эффективный ответ на рост национализма и сепаратизма в советской федерации в виде взвешенного курса национальной политики стала важнейшей причиной распада страны. А ключевой ошибкой стало принятие решения о выработке и подписании нового союзного договора в условиях стремительно усиливавшихся центробежных тенденций.

Неспособность союзного руководства выработать своевременный и эффективный ответ на рост национализма и сепаратизма в советской федерации в виде взвешенного курса национальной политики стала важнейшей причиной распада страны. А ключевой ошибкой стало принятие решения о выработке и подписании нового союзного договора в условиях стремительно усиливавшихся центробежных тенденций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В единой семье народов-братьев // Правда. 1985. 1 марта. С. 1.
2. Черняев А. С. Моя жизнь и мое время. М.: Международные отношения, 1995. С. 331–332, 336.
3. Андропов Ю. В. Шестьдесят лет СССР. М.: Политиздат, 1982. С. 10–13.
4. Ялышев Р. А. Межнациональные проблемы в СССР в период перестройки // Реформы и революции в России. Век XX. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. С. 131, 144–146.
5. Доклад М. С. Горбачева на Пленуме ЦК КПСС // Правда. 1986. 12 марта. С. 3.
6. Черняев А. С. Шесть лет с Горбачевым: По дневниковым записям. М.: Прогресс-Культура, 1993. С. 142–143.
7. Горбачев М. С. Размышления о прошлом и будущем. М.: Терра, 1998.
8. Грачев А. Горбачев. М.: Вагриус, 2001. С. 276.
9. Союз можно было сохранить. Белая книга // Документы и факты о политике М. С. Горбачева по реформированию и сохранению многонационального государства. М.: Апрель-85, 1995. С. 24–25.
10. XIX Всесоюзная конференция КПСС // Стенограф. отчет. Т. 1. М.: Политическая лит., 1988. С. 66–68.
11. Горбачев М. С. Жизнь и реформы. Кн. 2. М.: Новости, 1995. С. 500.
12. Третья сессия Верховного Совета СССР: Стенограф. отчет. Ч. 1–19. М.: Издание ВС СССР, 1990.
13. Проект Договора о ССГ // Правда. 1990. 24 ноября. С. 1–3.
14. Ялышев Р. А. Осень 1991 года: судьба нового Союзного договора после ГКЧП // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2010. Вып. 7. С. 119–128.

R. A. Yalyshev

THE NATIONAL POLICY OF THE SOVIET UNION DURING THE YEARS OF PERESTROIKA

Discusses how to develop new approaches in national policies in a worsening national relations in the USSR period of perestroika. Highlights the main stages in the course of M.S. Gorbachev national relations and the basic steps of the Union leadership for the development and implementation of national policies. An attempt is made to analyse the main reasons for the failure of national policies of Gorbachev and the collapse of the Soviet Union.

USSR, perestroika, M.S. Gorbachev, the new Union Treaty, the collapse of the USSR



УДК 621.3.93

В. П. Северинова, К. М. Северинов

Становление и развитие Электротехнического института (ЭТИ) 1905–1913 гг.

Рассказывается о строительстве нового здания ЭТИ (1903), о трудностях, связанных с финансированием и вопросами строительства и оборудования лабораторий. Описываются организационные и учебные мероприятия 1905–1913 гг.

Электротехнический институт императора Александра III, архитектор А. Н. Векшинский, непредвиденные расходы на строительство, профессор А. С. Попов, профессор П. Д. Войнаровский

В 1886 г. в Санкт Петербурге было организовано Техническое училище почтово-телеграфного ведомства, которое в 1899 г. приобрело статус Электротехнического института – полноправного высшего учебного заведения с пятилетним сроком обучения, получившего имя императора Александра III. До начала XX века институт был первым и единственным в России высшим учебным заведением по всем отделам электротехнической специализации. Со дня основания учебное заведение располагалось в тесных непригодных помещениях Телеграфного департамента, поэтому было принято решение о строительстве отдельного здания. Государственный Совет выделил на строительство нового здания вуза огромную по тому времени сумму – 1 399 505 рублей 45 копеек.

К 1903 г. здание института на Аптекарском острове (проект академика архитектуры А. Н. Векшинского) было построено (рис. 1). На его фронте еще нет часов: часы были установлены в



Рис. 1

1911 г. В 1903 г. институт переехал в просторные светлые помещения с многочисленными лабораториями разных направлений электротехники, но оставалось много финансовых проблем, связанных как с вопросами строительства так и оборудования лабораторий. В докладной записке от 8 декабря 1905 года директор Электротехнического института (ЭТИ) А. С. Попов сообщал, что в делах, принятых от бывшего директора Н. Н. Качалова, содержится только приблизительный отчет об израсходованных и подлежащих оплате подрядчиков суммах [1, лист 171]. Поскольку не было окончательной сметы, вовремя рассчитаться с подрядчиками не получалось.

За короткий период руководства институтом (сентябрь–декабрь 1905 г.) А. С. Попов не успел изменить положение дел: 31 декабря 1905 г. он скоропостижно скончался. К новому, избранному директору института П. Д. Войнаровскому (январь 1906 г. – октябрь 1912 г.) перешли не только заботы о деятельности вуза, но и ответственность за долги и перерасход средств.

2 января 1906 г. исполняющий обязанности директора института П. Д. Войнаровский докладывал в Главное управление почт и телеграфов, в ведении которого находился институт, что суммы, ассигнованные на сооружение зданий Электротехнического института, почти все израсходованы и на оплату выполненных работ недостает еще около 140 000 рублей [1, лист 293].



П. Д. Войнаровский

Перерасход средств, выделенных Государственным Советом, был вызван непредвиденными обстоятельствами. Так дополнительные финансовые затраты на строительные работы были связаны со сложностью грунтов площадки и необходимостью большого объема дренажных работ. В частности, вокруг учебного корпуса и общежития были выполнены дренажные работы для осушения подвальных помещений, используемых для учебных целей и в качестве квартир служащих.

К крупным сверхсметным работам относилось увеличение площади генераторной станции почти вдвое. Генераторная станция, помимо своего лабораторного назначения, обеспечивала энергией все помещения института, которые в ходе строительства увеличились: расширили общежитие института с 50 до 100 мест, устроили столовую, построили корпус квартир для профессоров, надстроили полуэтаж для технических служб. Другой крупной работой, не учтенной при проектировании, являлось сооружение новой газовой магистрали. Магистраль Газового общества, проложенная по Песочной улице, оказалась недостаточного диаметра для обеспечения потребностей увеличенных помещений. С Архиерейской улицы (ныне улица Льва Толстого) с дюкером под рекой Карповкой проложили новую газовую магистраль. В процессе строительства производителю работ архитектору А. Н. Векшинскому тоже приходилось искать решения трудных вопросов. Так при установке водогрейных котлов для отопления общежития пришлось экстренно укреплять подошву фундамента подбутовкой, чтобы сохранить целостность стен.

Но денежных средств от государства не поступало, а непредвиденные работы требовали

оплаты. Производитель работ и автор проекта А. Н. Векшинский, тратил свои средства. Из полученных в счет вознаграждения 36 000 рублей более 25 000 рублей были израсходованы на наем помощников и наблюдение за ходом работ [1, лист 372]. Напряженная работа по строительству, совмещаемая с должностью старшего техника городской управы Санкт Петербурга (1904–1908), подорвали здоровье А. Н. Векшинского. В 1907 г. он заболел и на два месяца был отправлен за границу на лечение. В феврале 1908 г. он скончался в Италии (похоронен в Сан-Ремо).

Несмотря проблемы с финансами, дополнительные строительные работы шли в период 1907–1912 гг. Они были необходимы для формирования технической базы института в связи с развитием электротехнической науки, особенно энергетического направления в научной и учебной деятельности института и строительством электростанций. В эти годы институт уже стал ведущим центром развития электроэнергетики в России.

Главной особенностью Электротехнического института стало широкое развитие лабораторных практических занятий. В 1903 г. организованы первые лаборатории энергетического направления, которых не было ни в одном институте – лаборатория электрических линий с высоковольтной установкой на 200 кВ и генераторная станция. В 1911 г. к генераторной станции пристроено помещение для лаборатории по испытанию паровых котлов и двигателей внутреннего сгорания, применяемых на электростанциях. В 1912 г. пристройкой была расширена почти в полтора раза площадь электромеханической лаборатории. Это позволило оснастить лабораторию машинами постоянного тока, генераторами и двигателями переменного тока – новейшей техникой крупных электрических фирм. Кроме того, для удобной связи учебного корпуса и здания общежития, где располагались также вспомогательные отделы и столовая, в 1910 г. был сооружен капитальный теплый переход.

В момент образования институт не получал от Государственного казначейства практически никаких средств. Так оборудование электротехнической лаборатории было обеспечено машинами, приборами и реостатами, пожертвованными «Товариществом П. Н. Яблочков и К^о», полученными в дар от акционерных обществ «Гелиос», «Сименс и Гальске», «Кертинг и Матисен» и пополнялось суммами, выделяемыми советом института, а также от частных лиц и фирм. Тем не менее,

недостающие для лабораторных работ предметы были взяты во временное пользование у разных организаций: Технического комитета Главного управления почт и телеграфов, Императорской академии наук и других высших учебных заведений. На оборудование института Государственный Совет 12 мая 1903 г. выделил кредит в сумме 574 тысячи рублей.

Новые здания института надо было почти полностью укомплектовать оборудованием, а это вызвало большие трудности. В 1905 г. по устной договоренности директора А. С. Попова с министром внутренних дел часть средств, выделенных на оборудование новых лабораторий в размере 60 000 рублей, были перечислены для срочного расчета с кредиторами [1, лист 166]. 40 000 рублей из этой суммы предназначались на приобретение оборудования у иностранных фирм.

Позднее директор института П. Д. Войнаровский неоднократно обращался к начальнику Управления почт и телеграфов об отпуске недоассигнованных средств. «Не вполне законченное оборудование... вносит в учебное дело института весьма существенный пробел и пагубно отражается на правильной и успешной постановке учебных занятий» — писал он в докладной записке от 22 марта 1908 г. [1, лист 167]. В ответ на обращение П. Д. Войнаровского Государственный контроль провел в 1908 году ревизию документов 1905 года и потребовал документы расходов на строительство. На обращение директора по поводу кредитов министр финансов В. Н. Коковцов не отказал: он не возражал против ассигнований из Государственного казначейства, но, так как кредиты не относятся к текущим потребностям ведомства, а относятся к расходам прежних лет, предлагал обратиться с просьбой об особом распоряжении законодательных учреждений [1, лист 184].

Помимо необходимости оплаты долгов по строительству и оборудованию институту не хватало средств на текущие расходы. В 1908 г. институт находился в крайне тяжелом финансовом положении: был сокращен кредит на содержание и обслуживание. При этом не учитывалось, что число студентов в 1908 году увеличилось до 600 человек вместо первоначальных 300, а значит, увеличилось и количество обслуживающего персонала. Кроме того, недостаточные суммы выделялись на отопление и вентиляцию, что составляло основные статьи перерасхода штатного ассигнования. На них выделили только 12 900 рублей, в

действительности же топливо расходовалось даже при крайней экономии на сумму 21 320 рублей. Совершенно не учитывалось, что для отопления был необходим дорогой кардифский уголь, ибо копать обыкновенного угля вредно влияла на растения и деревья Императорского ботанического сада с редкой коллекцией растений, представляющих собой «весьма ценное государственное имущество». Недостающие суммы выделялись из специальных средств самого института. Лишь в июне 1909 г. был «Высочайше утвержден» одобренный Государственным Советом и Государственной думой закон об отпуске дополнительных средств на содержание Электротехнического института императора Александра III в сумме 31 720 рублей. При этом часть расходов — 11 500 рублей должна была возмещаться из средств института» [2].

Положение директора П. Д. Войнаровского становилось безвыходным из-за невозможности оплаты подрядчиков и поставщиков, в том числе и иностранных фирм. В адрес института поступали требования расчета и угрозы судом, росли проценты обязательств института по строительству, возбуждались судебные дела. Главный подрядчик М. Е. Сеницын указывал на то, что, «окончив и сдав еще в 1903 году работы по постройке зданий Электротехнического института», он в течение пяти лет не может получить причитающиеся ему деньги. 17 декабря 1908 г. М. Е. Сеницын доводит до сведения руководства института, что «всякое промедление в уплате вынуждает его искать защиты справедливых требований всякими законными путями» [1, лист 188].

Не дождавшись расчета, скончался мастер газо-водопроводных работ Ф. Ф. Блюм. В ноябре 1909 г. его брат, наследник, предъявил через Санкт-Петербургский окружной суд иск институту на сумму 11 804 рублей 34 копейки, а 10 сентября 1909 г. архитектор В. Ф. Франкевич заявил: «... всякая дальнейшая задержка денег поставит меня в невозможное положение». Вдова архитектора А. Н. Векшинского также не раз обращалась в разные инстанции за помощью в получении невыплаченных мужу денег. В прошении к председателю Совета министров П. А. Столыпину она писала: «Потеряв в последние годы постройки свое здоровье, мой муж вынужден был лечиться здесь и за границей, на что ушли все его сбережения, и за задержкой платежей по постройке образовался значительный долг. Каждый день задержки приносит мне большой ущерб и ставит меня в безвыходное положение...» [1, лист 372].



П. А. Столыпин

Зимой 1908 г. архитектор В. Ф. Франкевич составил окончательный отчет по постройке здания ЭТИ. Расход на строительство превышал выделенное финансирование на 203 583 рубля 12 копеек [1, лист 192 об.]. Наконец, в январе 1909 года премьер-министр П. А. Столыпин признал, что перерасход на постройку зданий Электротехнического института императора Александра III вызван необходимостью сообразно с целями возведения здания. Он также признал, что платеж подрядчикам и производителю работ не терпит дальнейшего отлагательства и заявил, что «за работы, выполненные пять лет назад, необходимо немедленно рассчитаться во избежание уплаты процентов и обращения всех к суду, что некоторые уже сделали» [1, лист 195].

7 марта 1909 г. Министерство финансов распорядилось об открытии дополнительного кредита в 160 994 рубля для расчета по строительству зданий ЭТИ. Это покрывало сумму долгов, хотя и не в полной мере [1, лист 231]. Окончательный расчет был произведен только в 1910 году, включая расчет за оборудование с иностранными фирмами Швейцарии, Берлина, Геттингена, Дюссельдорфа, а также с фирмами «Лангензинен», «Шухардт и Шуте», «Сименс и Гальске». Были заплачены долги подрядчикам. Но на деньги, выделенные вдове А. Н. Векшинского в размере 20 373 рубля 43 копейки, Санкт-Петербургским коммерческим судом был наложен арест по исполнительным листам на 30 000 рублей по долговым обязательствам архитектора А. Н. Векшинского [1, лист 282]. Ущерб от задержки платежей по постройке привел вдову к разорению.

Несмотря на материальные и моральные издержки, институт успешно вел учебную и научную работу. «Автономность управления институтом», дарованная именным указом от 27 августа 1905 г. дала свободу в решении вопросов самоуправления и внутреннего распорядка. Период с 1905 по 1912 гг. отмечен особой интенсивностью работы совета института. За 1906 г. было проведено 35 заседаний совета. Совет института под руководством председателя, профессора П. Д. Войнаровского, пересмотрел всю учебную программу и расширил преподавание электротехнических дисциплин. 9 июня 1906 г. были утверждены «Правила прохождения студентами курса в институте по предметной системе и правила внутреннего распорядка жизни института» [2]. Предложенная система развивала самостоятельный подход в изучении курсов и способствовала увлечению наукой. Несмотря на все трудности и сложности этого периода были созданы все условия для научного развития и творчества талантливой молодежи: лаборатории заново оборудованы новейшей техникой, создан сильный преподавательский коллектив, новая, «предметная» система обучения коренным образом изменила и расширила программу преподавания. Выпускники института периода 1908–1913 гг. стали руководящими специалистами электротехнической промышленности и учеными: Р. А. Лютер, А. А. Смуров, С. А. Ринкевич, И. В. Егiazаров, В. К. Горелейченко, Н. А. Скрицкий, И. Г. Фрейман и др.

В лабораториях наряду с учебными занятиями проводились научно-исследовательские работы и выполнялись заказы правительственных и сторонних организаций. В отделении электрических линий испытывались материалы для воздушной и кабельной сетей Санкт-Петербургского трамвая. Результаты исследований публиковались в научно-периодической печати (журнал «Электричество», «Почтово-телеграфный журнал», «Известия электротехнического института императора Александра III»). Студенты старших курсов периодически отправлялись администрацией института для ознакомления с уровнем развития электротехнической промышленности в научные экскурсии по России и европейским странам. В 1910 г. Государственный Совет и Государственная дума одобрили закон о предоставлении права на производство строительных работ лицам, имеющим квалификацию инженера-электрика [2].

1906–1912 гг. были важным периодом в жизни института. На открытом заседании Ученого совета, посвященном 25-летию юбилею института, профессор П. С. Осадчий особо отметил значение этого времени – времени совершенствования и специализации преподавания новейших отраслей техники и одновременно организации и развития техники сильных токов, создавшей электротехническую промышленность [3].

В январе 1913 г. Совет института вынес благодарность П. Д. Войнаровскому за труды в особо тяжелые годы для института. Напряженная административная работа, ответственность за строительство как директора института и члена Техническо-строительного комитета МВД, ведающего главными стройками России, груз моральной ответственности за долги института – все это подорвало здоровье Павла Дмитриевича Войнаровского и привело к трагическому концу. 13 июня (ст. с.) 1913 г. на 47-м году жизни его не стало.

Наряду с развитием силовой электроэнергетики в институте появились две новые лаборатории – слабых токов. В лаборатории электрической сигнализации (пожарной, электрической, железнодорожной), организованной в 1908 г., были установлены блок-аппараты железнодорожной сигнализации Сименса и Гальске [7]. Ими были в то время оборудованы почти все железнодорожные сети Австрии и Германии, а в России только начиналось их использование. Второй лабораторией (1909 г.) была учебная радиотелеграфная станция – лаборатория нового направления связи – радиотелеграфии, основы которой заложил А. С. Попов [7]. В этой лаборатории имела учебная радиостанция, приемная и передающая. Радиостанция ЭТИ была третьей, предназначенной для учебных и научных целей, после радиостанций Института путей сообщения, установленной в 1904 г., и физического кабинета Академии наук (1908 г.) [4]. Средств для организации радиотелеграфной станции выделено не было: она оборудовалась за счет небольших собственных средств института и приборами, пожертвованными акционерным обществом «Сименс и Гальске». В лаборатории получали навыки специалисты по строительству и обслуживанию правительственных радиостанций. В 1911 г. директор П. Д. Войнаровский обратился в Главное управление почт и телеграфов с просьбой выделить средства на замену старого оборудования и для переоснащения действующих станций в связи с

развитием техники и появлением новых приборов, а также для строительства мачты радиотелеграфной сети. Руководство Главного управления поддержало просьбу института [4]. Дальнейшие обстоятельства – изменение позиции Главного управления в пользу строительства радиостанции практического назначения, затем смена его руководства и руководства ЭТИ (кончина П. Д. Войнаровского), начало Первой мировой войны, осложнили и задержали на некоторое время развитие радиолaborатории.

В 1911 г. директор института обратился с призывом к преподавателям собирать материалы, ценные с точки зрения истории техники, для будущего музея института. Уже в том же году как ценный экспонат в радиотелеграфной лаборатории сохранялась полная радиотелеграфная установка системы Попова-Дюкрете, созданная при непосредственном участии А. С. Попова [5].

Возросшая в 1900-х гг. активность студенчества привела к образованию различных культурных и общественных организаций. Советом института в ответ были разработаны правила студенческих организаций. В период 1908–1912 гг. появились 12 различных кружков студентов, действующих на основе своих уставов: научно-технический кружок, бюро труда, издательское общество, касса взаимопомощи. Первым был кружок любителей хорового пения, основанный 31 марта 1908 г., которым руководил Я. В. Прохоров – ученик Н. А. Римского-Корсакова, окончивший Санкт-Петербургскую императорскую консерваторию [8].

Знаменательными событиями этого периода были съезды выпускников – инженеров-электриков и юбилей института. Окончившие ЭТИ инженеры-электрики направлялись на работу в разные районы России, в том числе и весьма отдаленные. Регулярные съезды выпускников позволяли участникам делиться опытом, получать помощь по техническим вопросам, узнавать новости науки и техники. В 1908 г. состоялся первый съезд с числом участников 141 человек. В 1910 г. на второй съезд собралось уже 170 человек. В 1911 г. Электротехнический институт праздновал свое 25-летие. К юбилею на здании института по инициативе П. Д. Войнаровского были установлены электрические часы, получавшие сигналы точного времени из Пулковской обсерватории. Юбилей института стал важным событием для электротехники России и Петербурга, что было отмечено столичной прессой [5], [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РГИА. Ф. 1289. Оп. 2. Д. 2924.
2. Исторические даты Электротехнического института императора Александра III. Двадцатипятилетие Электротехнического института императора Александра III (1886–1911). Типо-литография Н. И. Евстифеева СПб., 1914.
3. Проф. П. Осадчий. Вместо предисловия // Известия Электротехнического института императора Александра III. Вып. VI. Юбилейный. СПб., 1912.
4. Глуценко А. А. Место и роль радиосвязи в модернизации России (1900–1917). СПб.: ВМИРЭ, 2005.
5. Почтово-телеграфный журнал: Отдел неоф. 1912. С. 94.
6. Юбилей Электротехнического института // Нива. 1912. № 1. С. 18–19.
7. Лаборатории Электротехнического института императора Александра III 1910–1911 уч. год. СПб.: Типография М. Стасюлевича, 1911. С. 27, 32.
8. ЦГИА. Ф. 990. Оп. 1. Д. 1027. Л. 83.

V. P. Severivova, K. M. Severinov

ESTABLISHMENT AND FORMATION OF THE ELECTROTECHNICAL UNIVERSITY (LETI) 1905–1913 yy.

The article tells about the construction of the new building of THESE (1903), the hard-link associated with financial problems, with the issues of construction and equipment of laboratories. Also describes the organizational and training activities 1905–1913 ears.

Electrotechnical Institute of the Emperor Alexander III. Architect A.N. Vekshinsky. Money contingencies for construction. Professor A. S. Popov. Professor P. D. Voynarovsky



СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Аббакумов Константин Евгеньевич

Зав. кафедрой электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ, д-р техн. наук, профессор.

Тел.: (812) 234-37-26.

E-mail: KEAbbakumov@mail.ru.

Бабичев Дмитрий Анатольевич

Аспирант кафедры микро- и нанoeлектроники СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (921) 447-99-33.

E-mail: demon-leti@yandex.ru.

Белов Михаил Петрович

Доцент кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ, канд. техн. наук.

Тел.: (812) 346-12-48.

E-mail: milesa58@mail.ru.

Бессонов Виктор Борисович

Аспирант кафедры электронных приборов и устройств СПбГЭТУ.

Тел.: (812) 234-35-59.

E-mail: vbbessonov@yandex.ru.

Ваганов Михаил Александрович

Доцент кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ, канд. техн. наук, доцент.

Тел.: (812) 234-23-90.

E-mail: MAVaganov@mail.eltech.ru.

Вайчикаускас Мария Александровна

Аспирантка кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (911) 828-94-24.

E-mail: sovizo@mail.ru.

Герасимов Владимир Александрович

Ассистент кафедры электронных приборов и устройств СПбГЭТУ.

Тел.: (812) 234-13-91.

E-mail: vl.gerasimov@mail.ru.

Демьянчук Анна Алексеевна

Аспирантка кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (911) 126-82-47.

E-mail: vleti@ya.ru.

Дрецинский Владимир Александрович

Д-р воен. наук, профессор кафедры инновационного менеджмента СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (921) 353-14-09.

E-mail: madresh@mail.ru.

Житенева Марина Ивановна

Старший преподаватель кафедры прикладной экономики СПбГЭТУ.

Тел.: (812) 346-29-20.

E-mail: mizh197@mail.ru.

Иванов Александр Николаевич

Ассистент кафедры БЖД СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (911) 224-73-96.

E-mail: ivanov_a_n@inbox.ru.

Имаев Дамир Хабибович

Профессор кафедры автоматики и процессов управления СПбГЭТУ, д-р техн. наук.

Тел.: +7 (921) 584-64-45.

E-mail: damir.imaev@mail.ru.

Каршиев Зайнидин Абдувалиевич

Аспирант кафедры вычислительной техники СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (965) 069-36-61.

E-mail: zaynidin85@mail.ru.

Кострин Дмитрий Константинович

Ассистент кафедры электронных приборов и устройств СПбГЭТУ.

Тел.: (812) 234-13-91.

E-mail: dkkostrin@mail.ru.

Котова Елена Евгеньевна

Доцент кафедры автоматики и процессов управления СПбГЭТУ, канд. техн. наук.

Тел.: (812) 234-37-98.

E-mail: apu_kotova@mail.ru.

Куприянов Михаил Степанович

Профессор кафедры вычислительной техники
СПбГЭТУ, д-р техн. наук.
Тел.: (812) 952-06-42.
E-mail: mikhail.kupriyanov@gmail.com.

Лебедев Владимир Вячеславович

Генеральный директор ОАО «Ковровский
электромеханический завод».
Тел.: (812) 234-68-18.
E-mail: vvputov@mail.ru.

Манило Людмила Алексеевна

Профессор кафедры биотехнических систем
СПбГЭТУ, д-р техн. наук.
Тел.: +7 (921) 987-85-96.
E-mail: lmanilo@yandex.ru.

Молдовян Николай Андреевич

Профессор кафедры автоматизированных си-
стем обработки информации и управления
СПбГЭТУ, д-р техн. наук.
Тел.: +7 (931) 210-43-55.
E-mail: nmold@mail.ru.

Мондикова Яна Александровна

Аспирантка кафедры автоматизированных
систем обработки информации и управления
СПбГЭТУ.
Тел.: (812) 234-27-73.

Немирко Анатолий Павлович

Д-р техн. наук, профессор кафедры биотехни-
ческих систем СПбГЭТУ.
Тел.: +7 (921) 744-42-15.
E-mail: apn-bs@yandex.ru.

Нечитайленко Роман Александрович

Аспирант кафедры автоматизированных си-
стем обработки информации и управления
СПбГЭТУ.
Тел.: (812) 234-27-73.
E-mail: vvcehanovskiy@mail.ru.

Пименова Ирина Александровна

Магистрант кафедры робототехники и авто-
матизации производственных систем СПбГЭТУ.
Тел.: +7 (981) 154-76-57.

Полушин Илья Геннадьевич

Профессор Западного университета Онтарио,
Канада, д-р техн. наук.
Тел.: (812) 234-68-18.
E-mail: vvputov@mail.ru.

Путов Антон Викторович

Доцент кафедры систем автоматического
управления СПбГЭТУ, канд. техн. наук.
Тел.: (812) 234-68-18.
E-mail: anputov@yandex.ru.

Путов Виктор Владимирович

Зав. кафедрой систем автоматического управ-
ления СПбГЭТУ, декан ФЭА, профессор, д-р
техн. наук.
Тел.: (812) 234-39-32.
E-mail: vvputov@mail.ru.

Рыжков Алексей Викторович

Аспирант кафедры автоматизированных си-
стем обработки информации и управления
СПбГЭТУ.
Тел.: +7 (911) 016-04-35.
E-mail: ryzhkov.alex@gmail.com.

Саламонова Ирина Сергеевна

Аспирантка кафедры биотехнических систем
СПбГЭТУ.
Тел.: +7 (921) 633-29-88.
E-mail: i.salamonova@yandex.ru.

Северинов Константин Маркович

Учитель истории физ.-мат. лицея № 30 (СПб.).
Тел.: +7 (921) 975-29-03.

Северинова Вера Павловна

Зав. экспозиционным выставочным отделом
Музея истории СПбГЭТУ.
Тел.: (812) 346-47-79.

Селуянова Анастасия Викторовна

Студентка гр. 8181 СПбГЭТУ.
Тел.: +7 (911) 941-32-57.
E-mail: seluyanova_91@mail.ru.

Советов Борис Яковлевич

Профессор кафедры автоматизированных си-
стем обработки информации и управления
СПбГЭТУ, д-р техн. наук, профессор.
Тел.: (812) 234-27-73.
E-mail: bysovetov@mail.ru.

Соловьева Елена Борисовна

Зав. кафедрой теоретических основ электро-
техники СПбГЭТУ, д-р техн. наук, профессор.
Тел.: (812) 346-17-96.
E-mail: selenab@hotmail.ru.

Степаненко Николай Вадимович

Ассистент кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (921) 752-59-03.

E-mail: zak-hak@mail.ru.

Тупик Виктор Анатольевич

Проректор по международной деятельности СПбГЭТУ, д-р техн. наук, доцент.

Тел.: +7 (812) 346-28-53.

E-mail: VATupik@etu.ru.

Ухов Андрей Александрович

Доцент кафедры электронных приборов и устройств СПбГЭТУ, канд. техн. наук.

Тел.: (812) 234-13-91.

E-mail: aauhov@yandex.ru.

Холод Иван Иванович

Доцент кафедры вычислительной техники СПбГЭТУ, канд. техн. наук.

Тел.: +7 (921) 795-42-58.

E-mail: iiholod@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.

Шейнман Елена Львовна

Доцент кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ, канд. техн. наук, доцент.

Тел.: +7 (905) 277-28-28.

E-mail: bell.sunny@yandex.ru.

Шувалова Ольга Николаевна

Инженер ОАО «Концерн "Океанприбор"».

Тел.: +7 (911) 919-29-79.

E-mail: shuvalova_o_n@mail.ru.

Ялышев Ренат Амируллович

Доцент кафедры истории культуры, государства и права СПбГЭТУ, канд. ист. наук.

Тел.: (812) 234-67-67.

E-mail: renyal@mail.ru.



ПРАВИЛА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ АВТОРАМИ

В редакционный совет журнала «Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» необходимо представить:

- файлы на CD-диске (в отдельных случаях по предварительному согласованию с редсоветом допускается передача материалов по электронной почте):
 - рукопись статьи;
 - сведения об авторе(ах);
- документы на листах формата А4 (1 экз.):
 - рукопись статьи (статья должна быть объемом 6 маш. с., обзорная статья – до 12 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, нижнее и левое 2,5 см, правое 2 см, верхний колонтитул 2 см, нижний колонтитул 2 см;
- основной текст статьи: шрифт «Times New Roman» 10,5 pt; выравнивание по ширине; первая строка с абзацным отступом 0,6 см; межстрочный интервал «Множитель 1.1»; автоматическая расстановка переносов.

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» 11,5 pt, обычный; выравнивание по правому краю, абзацный отступ слева 0,6 см; автоматические переносы отключены; интервалы перед абзацем 20 pt, после 8 pt, межстрочный интервал одинарный).

Название статьи набирается прописными буквами (шрифт «Times New Roman» 15 pt; жирный; выравнивание по левому краю; автоматические переносы отключены; интервалы перед абзацем 12 pt, после него – 12 pt; межстрочный интервал одинарный).

Аннотация содержит 3–7 строк, характеризующих содержание статьи (шрифт «Times New Roman» 8,5 pt, курсив; выравнивание по ширине; отступы: слева и справа 0,6 см; интервалы перед абзацем 6 pt, после 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» 9,5 pt, жирный; выравнивание по левому краю; автоматические переносы отключены; интервалы перед абзацем 12 pt, после него 12 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» 11 pt, жирный; выравнивание по центру; интервалы: перед абзацем 12 pt, после него 8 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» 8,5 pt; первая строка с абзачным отступом 0,6 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* используется редактор MathType. Необходимо использовать следующие установки редактора формул. Размеры: «полный» 10,5 pt, «подстрочный» 9 pt, «под-подстрочный» 7 pt, «символ» 14,5 pt, «подсимвол» 12,5 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.

При наборе формул без использования редактора формул индексы ставятся размером 9 pt со смещением на 3 pt вверх или вниз (Главная → Шрифт → Дополнительно → Смещение) в зависимости от того, надстрочный или подстрочный индекс. Не использовать Шрифт → Видоизменение → надстрочный/подстрочный. Если у величины есть одновременно и надстрочные, и подстрочные символы, то формула создается только в редакторе MathType.

Формулы, помещенные на отдельной строке, набираются с интервалами: перед формулой 4 pt, после нее 4 pt; межстрочный интервал одинарный.

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 одинарный интервал, шрифт «Times New Roman»; основной текст 9 pt, индексы 7 pt, подындекс 5,5 pt. Нумерационный заголовок содержит слово «Таблица» и ее номер арабскими цифрами (без знака номера перед ними и без точки на конце), интервал после 4 pt; выравнивается по правому краю таблицы и выделяется светлым курсивом; интервалы: перед таблице 6 pt, после нее 6 pt. Ширина таблицы не более 7,9 см, большие таблицы – не более 16,5 см.

Рисунки в электронном виде и подписи к ним создаются средствами Word или другими программами (CorelDRAW, Visio, Adobe Illustrator, Excel (с предоставлением оригинала рисунка в электронном виде)) в черно-белом виде. Качество рисунков и фотографий (в форматах .jpeg, .tiff) должно быть не менее 300 dpi. Основные линии на рисунках (границы блоков и соединительные линии на схемах, линии графиков) имеют толщину 1 pt, вспомогательные (линии-выноски, оси, размерные линии) – 0,6 pt. Не допускается вставлять рисунки в рамки или полотно.

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, 9 pt) и располагается по центру под рисунком (например, *Рис. 1*). Все тексты и обозначения на рисунке даются шрифтом размером 9 pt, индексы 7 pt, подындексы 5,5 pt с одинарным интервалом; цифровые обозначения на линиях выносок и номер рисунка даются курсивом. Буквенные обозначения фрагментов рисунка (шрифт «Times New Roman», курсив, 9 pt) ставятся под фрагментом перед нумерационным заголовком; в тексте ссылка на фрагмент ставится после нумерационного заголовка через запятую (например, рис. 1, *a*); интервалы: перед и после рисунка 6 pt. Ширина рисунка не более 7,9 см, большие рисунки – не более 16,5 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