Министерство образования и науки Российской Федерации

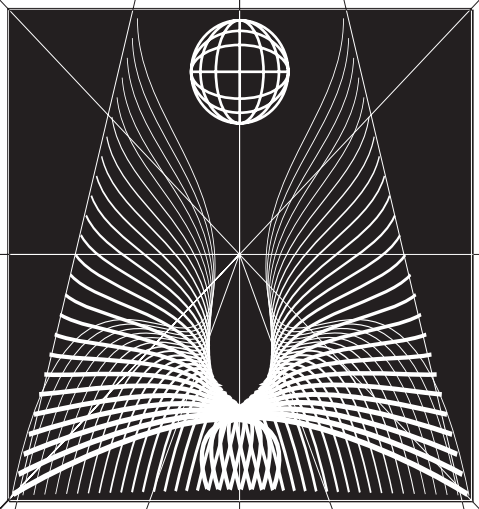
Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта

Иркутский государственный университет путей сообщения
Российская инженерная академия

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование



НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

№3(19)
2008

Редакционная коллегия

А.П. Хоменко - Профессор, главный редактор, ИрГУПС

С.В. Елисеев - профессор, зам.главного редактора, ИрГУПС

С.В. Белокобыльский, профессор, ректор БрГТУ
А.В. Баденников, профессор, ректор АГТА
Ю.Н. Резник, профессор, ректор ЧГУ
И.В. Бычков, директор Института динамики систем и теории управления СО РАН, член-корр. АН СССР
Б.Ю. Виноградов, ректор САПЭУ
Н.И. Воропай, директор Института систем энергетики-СО РАН, член-корр. АН СССР

Журнал издается с 2004 г.

Ответственный за выпуск С.В.Елисеев
Дизайн и макет издания Е.В.Хохрин
Компьютерная верстка А.В. Димов

© Издательство Иркутского государственного университета путей сообщения

Министерство образования и науки Российской Федерации
Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Иркутский государственный университет путей сообщения
Российская инженерная академия

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование

СОДЕРЖАНИЕ

Раздел 1. Механика. Транспорт. Технологии.

Елисеев С.В., Хоменко А.П. Виброзащитные системы. Вопросы управляемости и наблюдаемости 8

Кузнецов Н.К., Перелыгина А.Ю. Исследование динамического способа гашения упругих колебаний трехмассовой системы 14

Новицкий Е.А., Шишкин З.А., Кузнецов К.А. Моделирование газлифтного реактора высокотемпературного хлорирования этилена 19

Кобзов Д.Ю., Кобзов А.Ю., Жмуров В.В. О расчете экономической эффективности модернизации гидроцилиндров ДСМ 26

Засядко А.А., Насников Д.Н. Экспериментальные исследования гидравлической активной виброзащитной системы 31

Данеев А.В., Русанов В.А., Удилов Т.В., Шарпинский Д.Ю. К методам оперативного прогнозирования фронта лесного пожара 38

Измайлов В.В., Наумов А.Е. Применение адаптивных статических моделей для прогнозирования остаточного ресурса электроконтактных соединений 46

Огар П.М., Максимова О.В., Тарасов В.А. Относительная площадь контакта при взаимодействии шероховатой поверхности с упругим слоистым полупространством 49

Резник Ю.Н., Шумилова Л.В. Состояние и перспективы промышленного использования биогидрометаллургической технологии извлечения золота из упорных руд 52

Мельниченко О.В., Цыбульский В.С., Чикиркин О.В. Повышение качества электрической энергии в контактной сети с целью снижения отказов электронного и силового электрооборудования электровоза 58

Раздел 2. Управление в технических системах. Моделирование.

Финогенко И.А. О принципе декомпозиции для механических систем с сухим трением 66

Зароднюк Т.С., Горнов А.Ю. Технология поиска глобального экстремума в задаче оптимального управления 70

Федоров В.В., Молчанова Е.И. Разработка интеллектуального редактора базы знаний для создания экспертных систем в среде CUPS 76

Крюков А.В., Закарюкин В.П., Арсентьев М.О. Использование технологий распределенной генерации на железнодорожном транспорте 81

Зоркальцев В.И., Медвежонков Д.С. Транспортная модель с нелинейными затратами на перевозку 87

Пержабинский С.М. Алгоритм внутренних точек, использующий квадратичные аппроксимации 97

Белоусов Р.А., Бузиков И.А., Климов Н.Н., Фискин Е.М., Фискина М.М. Моделирование и разработка программного комплекса автоматизации учета тепла в ЖКХ 102

Министерство образования и науки Российской Федерации
Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Иркутский государственный университет путей сообщения
Российская инженерная академия

Современные технологии
Системный анализ
Моделирование

СОДЕРЖАНИЕ

Раздел 2. Управление в технических системах. Моделирование (продолжение)

Абаев А.В., Бутырин О.В. Математическая модель оценки оперативной деятельности подразделений ГПС 106

Подкаменный Д.В. Вычислительный сервер для решения задачи оптимального управления 109

Пашков Н.Н. Параметрические условия устойчивости разрывных систем управления 114

Раздел 3. Системный анализ и междисциплинарные подходы в исследованиях.

Горбунов В.К., Козлова Л.А. Построение и исследование квазиинвариантных индексов потребления 120

Ворожцова Т.Н. Онтологическое моделирование программного комплекса с использованием микроформатов 128

Козлов В.В. Моделирование нестационарных процессов диффузии растворенных органических веществ донных отложений: изменение направленности потоков и оценка биогенной нагрузки в придонной воде 132

Корольков Б.П., Корольков П.Б. Систематика не вечный двигатель, а веление времени 141

Узунов В.Г., Дьяченко А.А., Спорыхин М.А., Белов И.А. Прогнозный подход в оценке нахождения технических систем в текущем состоянии 150

Бусыгин В.П. Экономическая теория после двух революций 158

Массель Л.В., Бахвалов С.В., Бахвалова З.А. Информационное моделирование взаимодействия субъектов образовательного кластера 164

Мухопад Ю.Ф., Суржик В.В. Перспектива развития транспортных сетей для евро-азиатского коридора 171

Резник Ю.Н., Байбородин Б.А., Сапожников А.А. Критерии и инструменты качества в задачах прогнозирования эффективности предприятий 174

Сольская И.Ю., Федорова Е.А. Повышение квалификации специалистов в области управления персоналом как элемент системы менеджмента качества 178

Иванов А.Г., Бахвалов С.В. Информационное моделирование медицинской информационно-аналитической системы 181

Степаненко А.С. Социально-культурные предпосылки искусственного интеллекта. Системные аспекты 186

Марцынковский Д.А., Резник А.Ю. Методология, принципы и подходы интеграции систем менеджмента 192

Памяти ученых 196

Конференции и семинары 202

Аннотации опубликованных статей 204

Сведения об авторах 220

Министерство образования и науки Российской Федерации
Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Иркутский государственный университет путей сообщения
Российская инженерная академия

Modern technologies
System analysis
Modeling

CONTENTS

Part 1. Mechanics. Transport. Technologies.

Eliseev S.V., Khomenko A.P. Vibroprotecion systems. Problems of controllability and observability 8

Kuznetsov N.K., Pereligina A.Yu. Research of a dynamic means of clearing of elastic fluctuations of three-mass system 14

Novitsky E. A., Shishkin Z. A., Kuznetsov K. A. The modelling of a gas-lift reactor of high-temperature ethylene chlorination 19

Kobzov D.J., Kobzov A.J., Zhmurov B.B. About calculation of economic efficiency of modernization of hydrocylinders DSM 26

Zasjadko A.A., Nasnikov D.N. Experimental research of vibroprotection hydraulic active systems 31

Daneev A.V., Rusanov V.A., Udilov T.V., Sharpinskiy D.Yu. On methods of operative forecasting front of local forest fire 38

Izmailov V.V., Naumov A.E. Adaptive statistical models as applied to the forecasting of the residual lifetime of electrical connections 46

Ogar P.M., Maksimova O.V., Tarasov V.A. Relative the area of contact at interaction of a rough surface with elastic layered half-space 49

Reznik Yu.N., Shumilov L.V. Condition and prospects of industrial usage of biohydrometallurgical technology of extraction of gold from persistent ore 52

Melnichenko O.V., Tsybulskij V.S., Chikirkin O.V. Increased quality to electric energy on wire of the electric transmission, of the reason reduction of the refusal electronic and power electric equipment electric locomotive 58

Part 2. Control in technical systems. Modelling

Finogenko I.A. On a principle of decomposition for mechanical systems with dry friction 66

Zarodnjuk T.S., Gornov A.Yu. Technology of search of a global extremum in a problem of optimum control 70

Fedorov V.V., Molchanov E.I. Development of the intellectual editor of the knowledge base for creation of expert systems in CUPS 76

Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Sokolov V. Yu. Using of distributing generation technologies in railway transport 81

Zorkaltsev V.I., Medvezhonkov D.S. Transport model with nonlinear costs of conveyance 87

Perjabinsky S.M. Interior point algorithm with quadratic approximations 97

Belousov R.A., Buzikov I.A., Klimov N.N., Fiskin E.M., Fiskina M.M. Modeling and development of a program complex of automation of the account of the heat in housing-municipal services 102

Министерство образования и науки Российской Федерации
Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Иркутский государственный университет путей сообщения
Российская инженерная академия

Modern technologies
System analysis
Modeling

CONTENTS

Part 2. Control in technical systems. Modelling (continue).

Abaev A.V., Butirin O.V. Mathematical model of an estimation of operative activity of divisions GPS 106

Podkameny D.V. Computing server for solving of the optimal control task 109

Pashkov N.N. Parametrical conditions of stability of explosive control systems 114

Part 3. System analysis and intersubject approaches in researches.

Gorbunov V.K., Kozlova L.A. Construction and research quasiinvariant indexes of consumption 120

Vorozhtsova T.N. Ontologic modeling of a program complex with use of microformats 128

Kozlov V.V. Modeling of non-stationary processes of diffusion of the dissolved organic substances of ground adjournment: change of an orientation of streams and an estimation of biogenic loading in benthonic water 132

Korolkov B.P., Korolkov P.B. Systematization - not a perpetuum mobile, and command of time 141

Uzunov V.G., Djachenko A.A., Sporyhin M.A., Belov I.A. Long-range plan approach in an estimation of a finding of technical systems in a current condition 150

Busygin V.P. Economic theory after two revolution 158

Massel L.V., Bakhvalov S.V., Bakhvalova Z.A. The information modelling of interaction of subjects educational cluster 164

Muhopad Yu.E., Surzhik V.V. Prospect of development of transport networks for the euro-Asian corridor 171

Reznik Yu.N., Bajborodin B.A., Sapozhnikov A.A. Criteria and tools of quality in problems of forecasting of efficiency of the enterprises 174

Solskaja I.Yu., Fedorova E.A. The improvement of experts in the field of management of the personnel as an element of system of a quality management 178

Ivanov A.G., Bahvalov S.V. The information modeling of medical information-analytical system 181

Stepanenko A.S. Sociocultural precondition of an artificial intellect. System aspects 186

Martsynkovskij D.A., Reznik A.Yu. Methodology, principles and approaches of integration of systems of management 192

In the memory of scientist 196

Conferences and seminars 202

The abstracts of published articles 204

Information about the authors 220

Уважаемые коллеги! Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей и читателей и сообщаем требования к статьям, принимаемым к публикации

Статья представляется в электронном и распечатанном виде. Рекомендуемый объем статьи до 8 стр.
К статье прилагаются:

!1) акт экспертизы; внешний отзыв;
!2) индекс УДК;
!3) сведения об авторах: **фамилия, имя, отчество, ученая степень, звание и должность**, название учреждения (кафедры), контактный телефон или E-mail;
!4) аннотация по образцу (**на русском и английском языках**)

УДК 621.879
Иванов, А.А. Совершенствование систем разработки угольных месторождений / А.А. Иванов, В.П. Петров // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. / Иркутский государственный университет путей сообщения - 2004 - №1(12) - С. 8-15.
Ил. - 5. Табл. - 2. Библ. - 8 наим.

Рассмотрены способы разведки залежей скважинами и горными выработками, задаваемыми в пространстве через равные расстояния.

Ключевые слова: *месторождение, выработка, скважина.*

Количество знаков в аннотации - не более 400.

Индекс УДК, сведения об авторах и аннотация предоставляются в виде файла с расширением *.DOC.

5) **Текст статьи представляется в виде файла с расширением *.DOC** - документа, построенного средствами Microsoft Word 97 или последующих версий, **и распечаткой** на стандартных листах формата А4 (210х297 мм) **в две колонки, заверенной подписью авторов**.

При наборе статьи в Microsoft Word с учетом формата издания рекомендуются следующие установки:

- параметры **страницы** и абзаца: отступы сверху и снизу - 2.5 **см;** слева и справа - **2 см; табуляция** - **2 см;** ориентация - книжная;
- шрифт - **Times New Roman,** размер - 11, межстрочный интервал - одинарный, перенос слов - автоматический;
- **Текст статьи разбивается в две колонки с помощью команды "Форматирование -> Колонки" со следующими параметрами: ширина колонки: 8,5 см, промежуток: 0,8 см.**
- При вставке формул использовать **Microsoft Equation 3** при установках: элементы формулы выполняются ***курсивом;*** для греческих букв и символов назначать фонт (шрифт) Symbol, для остальных элементов - фонт **Times New Roman** (использование букв русского алфавита в формуле нежелательно). Размер символов: обычный - 11 пт, крупный индекс - 7 пт, мелкий индекс - 5 пт, крупный символ - 18 пт, мелкий символ - 11 пт. Все экспликации элементов формул в тексте также необходимо выполнять в виде формул.

6) **Рисунки,** вставленные в текст статьи, должны быть выполнены с разрешением 300 dpi, B&W - для черно-белых иллюстраций, Grayscale - для полутонов, максимальный размер рисунка с надписью: ширина 150 мм, высота 245 мм, представлены **на компакт-диске** в виде файла с расширением *.BMP, TIFF **и распечаткой** на стандартных листах формата А4, должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. Схемы, графики выполняются во встроенной программе MS Word или в MS Excel, с приложением файлов.

7) **Библиографический список** к статье оформляется **в соответствии с требованиями ГОСТ 7.1-2003**.

8) Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взымается

9) Все материалы должны быть представлены в редакцию **на компакт-диске,** проверенном на отсутствие вирусов

Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям.

По вопросам публикации статей обращаться:

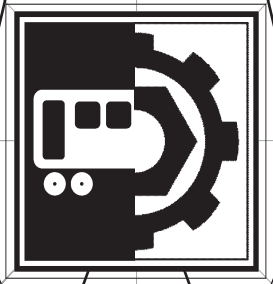
г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15. Офис А-101.
Иркутский государственный университет путей сообщения.
Телефоны: **(8-3952)59-84-28, (8-3952)63-83-26**
Факс: **(8-3952) 59-84-28**
Елисеев Сергей Викторович, Засядко Анатолий Алексеевич
Email: eliseev_s@inbox.ru

Министерство образования и науки Российской Федерации
Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Иркутский государственный университет путей сообщения
Российская инженерная академия

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование



Раздел 1.
Механика. Транспорт.
Технологии.

Содержание научного журнала:

- Инженерная механика
- Транспортные средства
- Энергетика и электромеханика
- Строительство, материалы и конструкции
- Охрана окружающей среды
- Автоматизация технологических процессов
- Современные технологии
- Системный анализ
- Моделирование технических систем
- Транспортные системы
- Энергоснабжение и электромеханика
- Управление техническими системами
- Информационные технологии

Елисеев С.В., Хоменко А.П. УДК 62.52

ВИБРОЗАЩИТНЫЕ СИСТЕМЫ. ВОПРОСЫ УПРАВЛЯЕМОСТИ И НАБЛЮДАЕМОСТИ

Введение активных связей в виброзащитных системах, в тех случаях, когда сила активного управления прикладывается в одной точке, а информация, получаемая измерительной системой, используется от датчиков, располагаемых в других точках (одной или нескольких), сопровождается некоторыми особенностями, требующими учета [1]. Подходя к этой проблеме с несколько иной позиции, отметим, что на практике часто возникает ситуация, когда в виброзащитных системах (ВЗС), приходится при измерениях состояния переходить от системы координат, в которых точки приложения сил, создаваемых звеньями (или типовыми элементами) системы (точки крепления упругих элементов, демпферов и др.) не совпадают с точками наблюдения или описания состояния. В этом случае приходится сталкиваться с различными формами изменения взаимодействия между парциальными подсистемами [2].

Рассмотрим активную виброзащитную систему, имеющую несколько датчиков контроля состояния в разных точках объекта. Будем полагать, что в точке А приложено управление (рис.1), а $B_1, B_2, ..., B_r$ - точки наблюдения за состоянием.

В случае конкретизации принципиальной схемы ВЗС на рис.1 ей может быть сопоставлена эквивалентная в динамическом отношении система автоматического управления, структурная схема которой позволяет определить все необходимые передаточные функции [3].

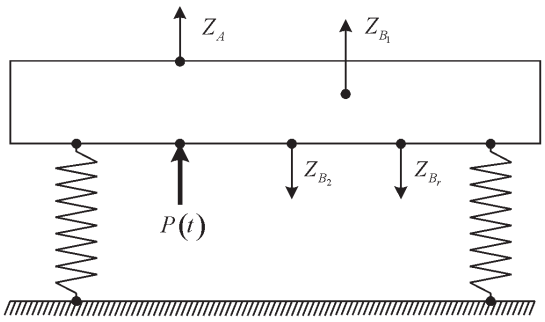


Рис. 1. Принципиальная схема расположения точек управления и наблюдения

Пусть связь между управлением и перемещением точек определяется законом:

$$P = -k\sum_{\rho=1}^{r} W_{AB}(p)_\rho Z_\rho, \qquad (1)$$

где Z_ρ - перемещение точки ρ, а $W_{AB}(p)_\rho$ - соответствующие передаточные функции между точками B_ρ и входными воздействиями.

Вместе с тем

$$Z_\rho = W_{AB}(p)P(t) + \xi_\rho \left(\rho = \overline{1,r}\right), \qquad (2)$$

где ξ_ρ - закон движения точки B_ρ при отсутствии управления $P(t)$. Будем полагать, что вибрационное состояние ВЗС будет иметь в качестве выходной переменной

$$Z_B = \sum_{\rho=1}^{r} a_\rho Z_\rho, \qquad (3)$$

тогда после ряда преобразований, аналогичных [1], найдем

$$Z_B = -k\sum_{\rho=1}^{r} a_\rho W_{AB}(p)_\rho Z_B + \xi_B; \qquad (4)$$

при этом

$$\xi_B = \sum_{\rho=1}^{r} a_\rho \xi_\rho. \qquad (5)$$

В данном случае система может рассматриваться как эквивалентная система с некоторой одной точкой наблюдения при передаточной функции

$$W_{AB}(p) = \sum_{\rho=1}^{r} a_\rho W_{AB}(p)_\rho \qquad (6)$$

с идеальным усилителем в цепи обратной связи (ОС).

Такой подход целесообразен в предположении, что весовая функция (3) при определенном выборе коэффициента локального усиления a_ρ будет более полно характеризовать состояние системы.

Для упрощения процедур оценки свойств ВЗС могут быть выбраны главные координаты системы, использование которых упрощает анализ возможностей изменения динамических свойств. Будем полагать, что виброзащитная система имеет пять степеней свободы и может быть приведена к цепной схеме, как показано на рис.2,а,б,в.

Если принять следующие обозначения:

$$a=\left(L_3p^2+k_4\right)\left[\left(m_5+L_4\right)p^2+k_5+k_6\right];$$

$$b=\left[\left(m_4+L_3+L_4\right)p^2+k_4+k_5\right]\times$$

$$\times\left[\left(m_5+L_5\right)p^2+k_5+k_6\right]-\left(L_4p^2+k_5\right)^2;$$

$$a_1=\left(L_2p^2+k_3\right)\left[\left(m_1+L_1\right)p^2+k_1+k_2\right]; \quad (7)$$

$$b_1=\left[\left(m_2+L_1+L_2\right)p^2+k_2+k_3\right]\times$$

$$\times\left[\left(m_1+L_1\right)p^2+k_1+k_2\right]-\left(L_1p^2+k_2\right)^2;$$

$$d=\left(m_3+L_2+L_3\right)p^2+k_3+k_4,$$

то передаточная функция по силовому входу F_3 примет вид

$$W=\frac{bb_1}{dbb_1-ab_1-ba_1}. \quad (8)$$

Полагая, что система обладает симметрией, при которой выполняются условия:

$$L_1=L_2=L_4=L;\ L_3=0;\ m_j=m;\ k_i=k, \quad (9)$$

можно найти одну из главных частот системы

$$\omega_1^2=\frac{2k}{m+L}, \quad (10)$$

при этом из частотного уравнения, определяемого из (7), выводятся автономные фрагменты

$$\left(m+L\right)p^2+2k=0, \quad (11)$$

где $p=j\omega,\ j=\sqrt{-1}$.

В системе с четырьмя степенями свободы ($m_5=0,\ k_6=0,\ L_4=0$) преобразованная структурная схема имеет вид, как показано на рис.3.

Для ВЗС с четырьмя степенями свободы выражения (7) редуцируется к виду

$$a=\left(L_3p^2+k_4\right);$$

$$b=\left(m_4+L_3\right)p^2+k_4+k_5;$$

$$a_1=\left(L_2p^2+k_3\right)\left[\left(m_1+L_1\right)p^2+k_1+k_2\right]; \quad (12)$$

$$b_1=\left[\left(m_2+L_1+L_2\right)p^2+k_2+k_3\right]\times$$

$$\times\left[\left(m_1+L_1\right)p^2+k_1+k_2\right]-\left(L_1p^2+k_2\right)^2;$$

$$d=\left(m_3+L_2+L_3\right)p^2+k_3+k_4.$$

Отметим, что для ВЗС с четным числом степеней свободы (более двух) при определении главных частот колебаний необходимо учитывать некоторые особенности. В том случае, когда ВЗС имеет три степени свободы ($k_5=0,\ m_4=0,\ L_3=0$), то структурная схема (рис.3) преобразуется, как это показано на рис.4.

Частотное уравнения, полученные с использованием структурной схемы на рис.4, имеет вид

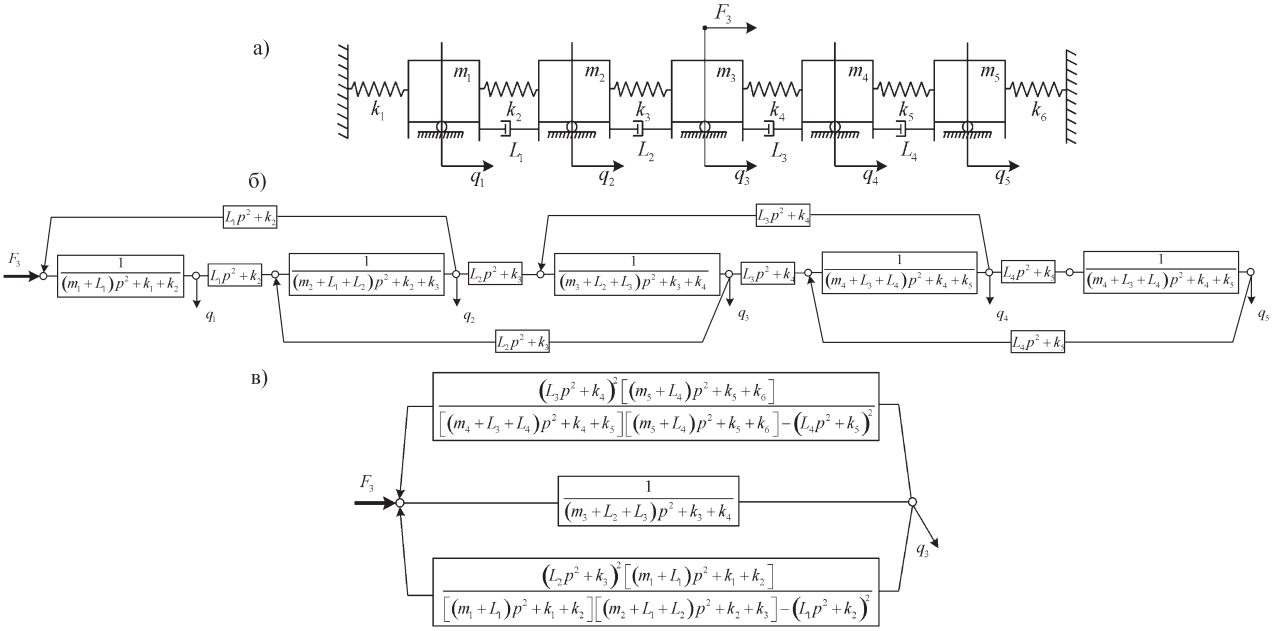


Рис. 2. Расчетная (а), структурная (б) и преобразованная (в) схемы ВЗС с пятью степенями свободы: k_i **- коэффициенты упругости пружины** $\left(i=\overline{1,6}\right)$**;** m_j **- массы отдельных элементов системы** $\left(j=\overline{1,5}\right)$**;** L_γ **- приведенные массы пассивных устройств для преобразования движения** $\left(\gamma=\overline{1,4}\right)$**.**

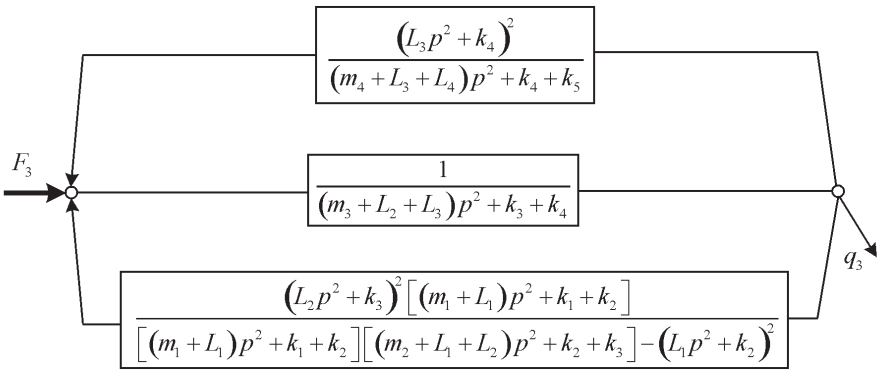


Рис. 3. Структурная схема преобразованной системы с 4-мя степенями свободы.

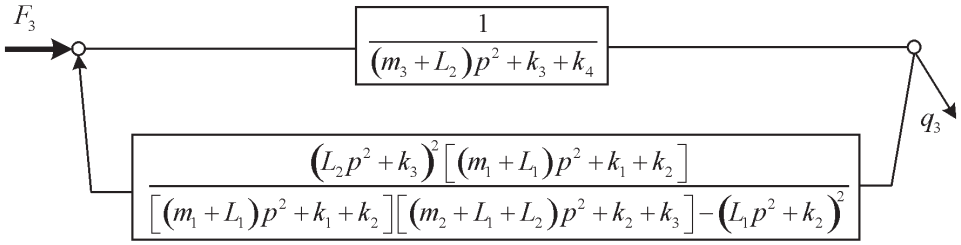


Рис. 4. Преобразованная структурная схема ВЗС с тремя степенями свободы.

$$\Delta=\left[(m_3+L_2)p^2+k_3+k_4\right]\times$$
$$\times\left[(m_1+L_1)p^2+k_1+k_2\right]\times$$
$$\times\left[(m_2+L_1+L_2)p^2+k_2+k_3\right]-\left(L_1p^2+k_2\right)^2- \quad (13)$$
$$-\left(k_3+L_2p^2\right)^2\left[(m_1+L_1)p^2+k_1+k_2\right]=0.$$

Откуда следует, что одна из главных частот в системе имеет вид при $m_1=m_3=m$, $L_1=L_2=L$, $k_1=k_2=k_3=k_4=k$

$$\omega_1^2=\frac{2k}{m+L}. \quad (14)$$

Если при определении главных координат виброзащитной системы ориентироваться на структуру, аналогичную той, что показана на рис. 3, то система связей, соответствующая симметричной расстановке, может принять вид в соответствии с рис. 5, откуда можно ввести обозначения, аналогичные (7), (12):

$$a=\left(L_1p^2+k_2\right);$$
$$b=\left(m_1+L_1\right)p^2+k_1+k_2;$$
$$a_1=\left(L_2p^2+k_3\right); \quad (15)$$
$$b_1=\left[\left(m_3+L_3\right)p^2+k_3+k_4\right];$$
$$d=\left(m_2+L_1+L_2\right)p^2+k_2+k_3$$

и получить те же значения для главной частоты ω_1^2, что и из выражения (14).

В виброзащитной системе с двумя степенями свободы структурная схема имеет вид в соответствии с рис. 6. Частотное уравнение для системы (рис.6) имеет вид

$$\Delta=\left[\left(m_1+L_1\right)p^2+k_1+k_2\right]\times$$
$$\times\left[\left(m_2+L_1\right)p^2+k_2+k_3\right]-\left(L_1p^2+k_2\right)^2=0, \quad (16)$$

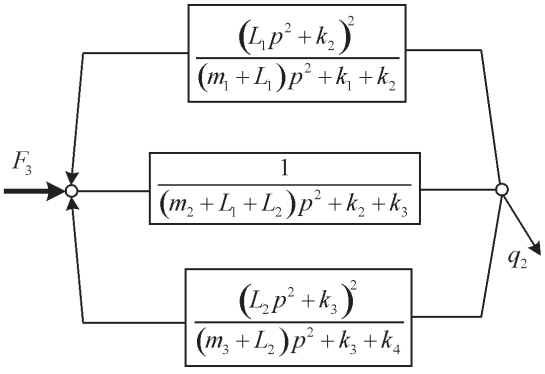


Рис. 5. Структурная схема ВЗС преобразованная к симметричному виду.

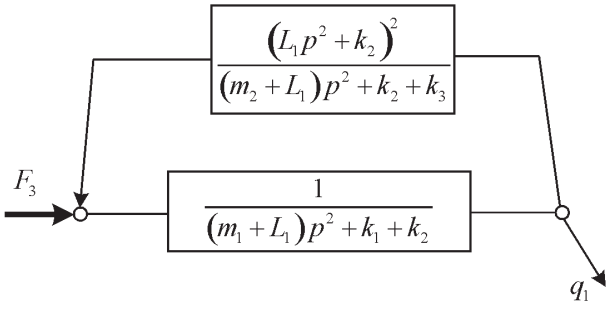


Рис. 6. Преобразованная структурная схема ВЗС с двумя степенями свободы.

откуда могут быть найдены частоты главных колебаний при $m_1 = m_2$, $k_1 = k_2 = k_3$:

$$\omega_1^2 = \frac{k}{m}; \omega_2^2 = \frac{3k}{m+2L}. \quad (17)$$

Сопоставляя структурные схемы ВЗС, представленные на рис.2-6, отметим, что условия симметрии имеет принципиальное значение для определения частот главных координат. Использование структурных схем позволяет выстраивать необходимые передаточные функции и, принимая во внимание особенности форм частотных уравнений в числителе и знаменателе передаточных функций, решать вопросы о взаимном расположении полюсов и нулей. Что касается частотного уравнения числителя (bb_1 - выражение (8)), передаточной функции ВЗС, то его структура теснейшим образом связана с выбором и типа входного воздействия и места приложения последнего

Если предположить, что в качестве обобщенных координат $q_1 ... q_n$ выбраны главные координаты, то уравнениям ВЗС можно придать форму

$$\ddot{q}_s + \sum_{i=1}^{n} b_{sm}\dot{q}_m + k_s^2 q_s = Q_s(t)\left(s=\overline{1,n}\right), \quad (18)$$

где b_{sm} элементы матрицы B, характеризующей диссипативные свойства системы. Уравнения (18) в векторной форме запишутся в виде

$$\left(I_n p^2 + Bp + K\right)\overline{q} = \overline{Q}(t). \quad (19)$$

Здесь I_m - единичная, а K - диагональная матрица.

$$K = diag\left|k_1^2,...,k_n^2\right|, \quad (20)$$

а $k_1,...,k_n$ - главные частоты.

Вводя обратный оператор

$$W(p) = \frac{1}{Ap^2 + Bp + C}, \quad (21)$$

где $Ap^2 + Bp + C$ - матрица, элементы которой являются полиномами от p, найдем , что изображения по Лапласу векторов $\overline{q}(t)$ и $\overline{Q}(t)$ связаны между собой соотношениями

$$\overline{q}(t) = W(p)\overline{Q}(p). \quad (22)$$

Оператор $W(p)$ в данном случае называется матрицей передаточных функций системы (19), а его элементы $w_{sm}(p)\left(s,m=\overline{1,n}\right)$, являются дробно-рациональными функциями p - передаточными функциями этой системы, которые могут быть определены, как показано выше, для конкретных ситуаций. Оператор $w_{sm}(p)$ устанавливает связь между m-й компонентой вектора $\overline{Q}(t)$ и законом изменения s-й обобщенной координаты:

$$w_{sm}(j\omega) = \frac{W_{sm}(p)}{\det\left(Ap^2 + Bp + C\right)}, \quad (23)$$

где $W_{sm}(p)$ - алгебраическое дополнение соответствующего элемента матрицы $Ap^2 + Bp + C$.

Если $B = 0$, тогда

$$W(p) = \left(I_n p^2 + K\right)^{-1} = \\ = diag\left[\left(k_1^2 + p^2\right)^{-1},...,\left(k_n^2 + p^2\right)^{-1}\right], \quad (24)$$

$$W_{AB}(p) = W(p)\cdot l_A \cdot l_B = \sum_{s,m=1}^{n} w_{sm}(p)\cdot l_{As}\cdot l_{Bm} \quad (24')$$

и, следовательно,

$$w_{ss}(p) = \left(k_s^2 + p^2\right),\ w_{sm}(p) = 0\left(s \neq m\right), \quad (25)$$

что позволяет получить передаточную функцию между любыми точками (например, т.т. А и В) в виде

$$\overline{W}_{AB}(p) = \frac{\sum_{s=1}^{n} l_{As} l_{Bs} \prod_{m=1}^{n}\left(k_m^2 + p^2\right)}{\prod_{r=1}^{n}\left(k_r^2 + p^2\right)}, \quad (26)$$

здесь $\prod_s$ -не содержит s-го множителя, так как при отсутствии диссипации отдельные системы независимы между собой, l_{As} и l_{Bs} - компоненты векторов, определяющие перемещения т.т. А и В.

При не равных нулю, но достаточно малых b_{sm}, из (26) получаем

$$\overline{W}_{AB}(p) = \sum_{s,m}^{n} \frac{W_{sm}(p)}{\det\left(I_n p^2 + Bp + K\right)}\cdot l_{As}\cdot B_m. \quad (27)$$

При этом корни уравнения

$$\det\left(I_n p^2 + Bp + K\right) = 0 \quad (28)$$

являются комплексными и попарно сопряженными

$$p_s = \pm\lambda_{sj} - \mu s\left(s=\overline{1,n}\right), \quad (29)$$

а величины μ_s оказываются малыми и положительными, λ_s - мало отличаются от k_s [5].

Подставляя (27) в выражение (6), найдем

$$\overline{W}_{AB}(p) = \\ = \det{}^{-1}\left(I_n p^2 + Bp + K\right)\sum_{\rho=1}^{n} a_\rho \sum_{s,m=1}^{n} W_{sm}(p)\cdot l_{As}\cdot l_{Bm}^{(\rho)}, \quad (30)$$

где $l_{Bm}^{(\rho)}$ - коэффициент m-ой собственной формы в точке B_ρ. Будем полагать, что резонансные характеристики (30) близки к собственными частотами ВЗС. Для обеспечения работоспособности ВЗС необходимо и достаточно, чтобы ее антирезонансные частоты чередова-

лись с резонансными. Тогда система останется устойчивой при любой величине коэффициента K (если не учитывать инерционность звеньев ОС).

Для определения условий, при которых обеспечивается чередование частот, рассмотрим сначала систему без диссипации. Подставим в (6) выражение

$$W_{AB}(p)=\sum_{s=1}^{n} l_{AB} l_{Bs}\left(k_s^2+p^2\right)^{-1} = \frac{\sum_{s=1}^{n} l_{As} l_{Bs} \prod_{m=1}^{n}\left(k_m^2+p^2\right)}{\prod_{r=1}^{n}\left(k_r^2+p^2\right)} \tag{31}$$

и получим:

$$W_{AB}(p)=\left[\prod_{r=1}^{n}\left(k_r^2+p^2\right)\right]^{-1}\times \times\sum_{\rho=1}^{\rho} a_\rho \sum_{s=1}^{n} l_{As} l_{Bs}^{(\rho)} \prod_{m=1}^{n}{}_{s}\left(k_m^2+p^2\right). \tag{32}$$

Антирезонансные частоты γ_i являются корнями уравнения

$$V(j\gamma)=\sum_{\rho=1}^{\rho} a_\rho \sum_{s=1}^{n} l_{As} l_{Bs}^{(\rho)} \prod_{m=1}^{n}{}_{s}\left(k_m^2+\gamma^2\right)= \sum_{s=1}^{n} l_{As} \sum_{\rho=1}^{\rho} a_\rho l_{Bs}^{(\rho)} \prod_{m=1}^{n}{}_{s}\left(k_m^2+\gamma^2\right). \tag{33}$$

Для того, чтобы корни этого уравнения чередовались с собственными частотами достаточно, чтобы вещественны числа $V(jk_\alpha)$ и $V(jk_{\alpha+1})$, где k_α и $k_{\alpha+1}$ - две последовательные собственные частоты, имели противоположные знаки, то есть функция $V(j\omega)$ должна менять знак в каждом из интервалов $(k_\alpha, k_{\alpha+1})$ $\left(\alpha=\overline{1,n-1}\right)$:

$$V(jk_\alpha)=l_{A\alpha}\sum_{\rho=1}^{r} a_\rho l_{B\alpha}^{(\rho)} \prod_{m=1}^{n}{}_{\alpha}\left(k_m^2+k_\alpha^2\right),$$
$$V(jk_{\alpha+1})=l_{A\alpha+1}\sum_{\rho=1}^{r} a_\rho l_{B\alpha+1}^{(\rho)} \prod_{m=1}^{n}{}_{\alpha+1}\left(k_m^2+k_{\alpha+1}^2\right). \tag{34}$$

Из (34) следует, в частности, что произведения

$$\prod_{m=1}^{n}{}_{\alpha}\left(k_m^2+k_\alpha^2\right), \prod_{m=1}^{n}{}_{\alpha}\left(k_m^2+k_\alpha^2\right) \tag{35}$$

имеют противоположные знаки. Таким образом для чередования частот требуется, чтобы коэффициенты

$$l_{A\alpha}\sum_{\rho=1}^{r} a_\rho l_{B\alpha}^{(\rho)},\ l_{A\alpha+1}\sum_{\rho=1}^{r} a_\rho l_{B\alpha+1}^{(\rho)} \tag{36}$$

имели одинаковые знаки. Известно [4], что в одной из точек системы знак коэффициента формы можно выбирать произвольно (при этом отметим, что собственная форма определяется с точностью до постоянного множителя). Пусть $l_{As} >> 0\ \left(s=\overline{1,n}\right)$, тогда условие чередования частот принимает форму

$$\sum_{\rho=1}^{n} a_\rho l_{Bs}^{(\rho)} >> 0\ \left(s=\overline{1,n}\right). \tag{37}$$

Условие (34) сохраняется и для системы со слабой диссипацией и определяет допустимую область значений коэффициентов a_ρ с точностью общего множителя, который можно считать входящим в общий коэффициент усиления K.

Рассмотрим в качестве примера систему на рис. 7. Пусть одна из точек наблюдения совпадает с точкой А, в которой приложено управление, а другая — с точкой В, то есть имеется две точки наблюдения. В соответствии со структурной схемой на рис.7 частотное уравнение системы

$$\Delta=\left[m_1p^2+(b+b_1)p+c+c_1\right] \left[m_2p^2+b_1p+c_1\right]-\left(b_1p+c_1\right)^2=0, \tag{38}$$

может быть приведено к виду

$$k^4+\left(\frac{c}{m_2}+\frac{c+c_1}{m_1}\right)k^2+\frac{c\cdot c_1}{m_1m_2}=0 \tag{39}$$

(в предположении малости b_1 и b), что позволяет найти собственные частоты k_1 и k_2. Коэффициенты l_{As} и l_{Bs} определяются как амплитуды вынужденных колебаний при частотах воздействия k_1 и k_2. Поскольку один из коэффициентов каждой собственной формы может задаваться произвольно

$$l_{A_1}=l_{A_2}=1, \tag{40}$$

то получим

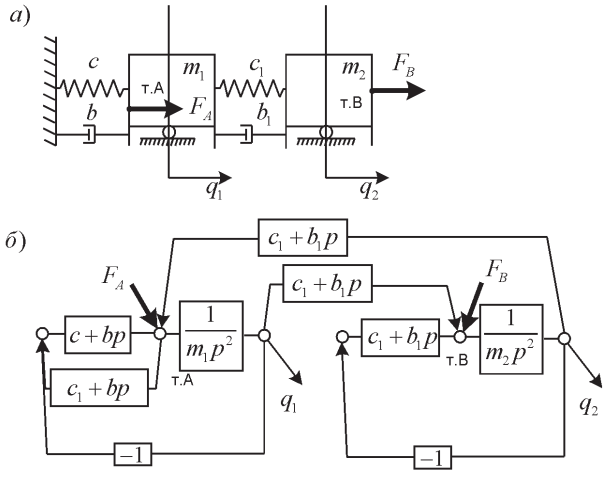


Рис. 7. Расчетная (а) и структурная (б) схемы ВЗС с двумя степенями свободы.

$$l_{B_1}=\frac{W^0_{AB}(jk_1)}{W^0_A(jk_1)},\ l_{B_2}=\frac{W^0_{AB}(jk_2)}{W^0_A(jk_2)}. \qquad (41)$$

Из условий (37), полагая , что B_1 совпадает с А, а B_2 - с В при $a_{\rho_1}=1$, имеем

$$1+a_{\rho_2}\frac{c_1}{c_1+m_2k_1^2}>0,\ 1+a_{\rho_2}\frac{c_1}{c_1+m_2k_2^2}>0. \qquad (42)$$

Учитывая, что $m_2k_1^2\le c_1\le m_2k_2^2$, можно найти допустимую область значений a_{ρ_2}:

$$\frac{c_1-m_2k_1^2}{c_1}<a_{\rho_2}<\frac{m_2k_2^2-c_1}{c_1}. \qquad (43)$$

Используя (6) и подставляя в него

$$W_A(p)=\Delta^{-1}(p)\left(m_2p^2+b_1p+c_1\right),$$
$$W_{AB}(p)=\Delta^{-1}(p)\left(b_1p+c_1\right),$$
$$W_B(p)=\Delta^{-1}(p)\left(m_1p^2+bp+b_1p+c+c_1\right), \qquad (44)$$

получим

$$W_{AB}(j\omega)=\frac{1}{\Delta(j\omega)}\times \qquad (45)$$
$$\times\left(c_1-m_2\omega^2+b_1j\omega+a_{\rho_2}\left(b_1j\omega+c_1\right)\right).$$

Проверка показывает, что с учетом (39) при наименьшем и наибольшем значениях a_{ρ_2}, удовлетворяющих условию (41), антирезонанс наступает соответственно на частотах k_1 и k_2. При промежуточных значениях a_{ρ_2} антирезонанс находится между этими частотами. Отметим, что при приближении антирезонансной частоты к резонансной частоте на амплитудно-частотной характеристике исчезают соответствующей «правая» и «пик», а следовательно появляются возможности увеличения эффективности управления. Пусть

$$a_{\rho_2}=-\frac{c_1-m_2k_1^2}{c_1}, \qquad (46)$$

тогда из (45) следует, что

$$W_{AB}(jk_1)=\frac{1}{\Delta(jk_1)}\times$$
$$\times\left[c_1-m_2k_1^2+b_1jk_1-\frac{c_1-m_2k_1^2}{c_1}(c_1+b_1jk_1)\right]= \qquad (47)$$
$$=\frac{b_1m_2k_1^2}{c_1\left[\begin{matrix}(b+b_1)(c_1-m_2k_1^2)+b_1(c+c_1-m_1k_1^2)+\\+b_1(b+b_1)jk_1\end{matrix}\right]}.$$

Аналогичные результаты могут быть получены при

$$a_{\rho_2}=-\frac{c_1-m_2k_2^2}{c_1}. \qquad (48)$$

Рассмотрим более подробно (32), приняв во внимание, что, если выбирать коэффициенты a_ρ при выполнении условия

$$\sum_{\rho=1}^{r}a_\rho l_B^{(\rho)}=0, \qquad (49)$$

то в (32) обратится в нуль j-е слагаемое. Тогда при $\omega=k_j$ функция не будет обращаться в бесконечность поскольку все слагаемые в числителе будут содержать множитель $\left(k_j^2+p^2\right)$, который сократится с соответствующим сомножителем в знаменателе. Это означает, что при выполнении условия (49), система становится не наблюдаемой по главной координате q_j (или слабо наблюдаемой при диссипации). Естественно, что при этом исчезает один из резонансов и один из антирезонансов. Поскольку имеется $r-1$ независимых параметров a_ρ, то можно выбрать и такой, который обеспечивает выполнения условия

$$\sum_{\rho=1}^{r}a_\rho l_{Bs}^{(\rho)}=0\left(s=\overline{s_1,s_{r-1}}\right). \qquad (50)$$

В ряде случаев такой выбор может оказаться целесообразным, если активное устройство предназначено для управления низко частотными колебаниями. Если при этом ограничиться одной точкой наблюдения, то увеличение коэффициента усиления может привести к неустойчивости и возбуждению колебаний с одной из собственных частот ВЗС. Выполнив условие (50) для $s=\overline{1,r-1}$ можно сделать систему ненаблюдаемой по первым $r-1$ собственным частотам и исключить возможность возбуждения колебаний. Коэффициент усиления при этом можно увеличивать до такого уровня, при котором частота среза приближается к r-ой собственной частоте. Практически коэффициент формы $l_{Bs}^{(0)}$ всегда определяется с некоторой погрешностью, поэтому a_ρ выбирают с расчетом выполнения условия (37) при всех возможных отклонениях коэффициентов форм от номинальных значений.

Аналогичный подход может быть реализован и в тех случаях, когда управление $P(t)$ формируется по скорости от точек B_ρ

$$P=-k\sum_{\rho=1}^{r}\psi_\rho\dot{Z}_\rho. \qquad (51)$$

Введение управления по скорости часто связано с созданием достаточно интенсивной диссипации энергии колебаний, для чего сила $P(f)$ должна быть диссипативной, а мощность силы $P(t)$ должна быть отрицательной при любых колебаниях объекта защиты.

Таким образом управление при нескольких точках наблюдения, если принять во вни-

мание принцип суперпозиции, характерный для линейных ВЗС, позволяет решать более сложные задачи виброзащиты. Последнее связаны с необходимостью выполнения условий движения объекта с ограничениями на несколько параметров динамического состояния при одновременном соблюдении условий устойчивости.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Елисеев С.В. О связи устойчивости и эффективности в системах активного управления колебаниями / С.В. Елисеев, А.П. Хоменко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. -Иркутск, ИрГУПС, 2008. - Спецвыпуск. - С.6-11.
2. Белокобыльский С.В. Приведенные жесткости двумерных систем / С.В. Белокобыльский, С.В. Ситов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. -Иркутск, ИрГУПС, 2007. - № 4(16). - С.6-11.
3. Елисеев С.В. Динамический синтез в обобщенных задачах виброзащиты и виброизоляции технических объектов / С.В. Елисеев, Ю.Н. Резник, А.П. Хоменко, А.А. Засядко: Чит.гос.ун-т, Иркут.гос.ун-т путей сообщения. - Иркутск: Изд-во Иркут. гос.ун-та, 2008. - 523с.
4. Бабаков И.М. Теория колебаний. М. - 1968. - 560с.

Кузнецов Н. К., Перелыгина А. Ю.

УДК 621.01:534

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО СПОСОБА ГАШЕНИЯ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ ТРЕХМАССОВОЙ СИСТЕМЫ

Динамические гасители относятся к одним из наиболее эффективных средств ограничения моногармонических колебаний. При изменении частоты возмущения эффективность их действия резко снижается. С целью увеличения диапазона демпфируемых частот обычно увеличивают коэффициент демпфирования гасителя за счет введения сил вязкого трения. При этом зона работы гасителя несколько расширяется, однако эффективность гашения колебаний снижается. Расширения диапазона демпфируемых частот часто добиваются с помощью настройки параметров динамических гасителей колебаний на частоту возмущающей силы.

В известных работах [1, 2] динамическое гашение колебаний, как правило, осуществляется посредством присоединения к объекту защиты дополнительных устройств в виде либо пассивных элементов (масс, пружин), либо активных, имеющих собственные источники энергии, которые формируют необходимые силовые воздействия на объект. В управляемых машинах, движение исполнительных механизмов которых описываются трехмассовыми расчетными схемами, возможна реализация режимов динамического гашения колебаний путем организации управляемого движения промежуточной массы системы. В настоящей статье рассматривается возможность реализации режима динамического гашения колебаний в трехмассовых системах.

Расчетная схема трехмассовой системы, в которой реализован режим активного динамического гашения колебаний, приведена на рис. 1. На этой схеме приняты следующие обозначения: Q_n — приведенная движущая сила привода; m_r — приведенная масса гасителя; m — приведенная масса исполнительного механизма; m_n — приведенная масса привода; $\Delta q_1, \Delta q_2$ — упругие смещения масс; q. — координата основного движения; c_1 — приведенный коэффициент жесткости. Упругий элемент с коэффициентом жесткости c_2 и демпфер с коэффициентом демпфирования b_2, установленные между исполнительным меха-

низмом и промежуточной массой, отражают упруго-диссипативные свойства реального гасителя колебаний.

Представим управляющее воздействие, формируемое исполнительным механизмом гасителя, в виде активной обратной связи с передаточной функцией $W_{oc}(p)$ и запишем уравнения упругих колебаний исполнительного органа с активным динамическим гасителем

$$m_n \ddot{q}_. - c_1 \Delta q_1 = Q_n; \quad (1)$$

$$m_г \Delta\ddot{q}_1 + c_1 \Delta q_1 = -m_г \Delta\ddot{q}_* + b_2 \Delta\dot{q}_2 + c_2 \Delta q_2 - W_{oc}(p)\Delta q; \quad (2)$$

$$m\Delta\ddot{q}_2 + b_2 \Delta\dot{q}_2 + c_2 \Delta q_2 = -m\ddot{q}_. - m\Delta\ddot{q}_1, \quad (3)$$

где Δq - суммарные упругие колебания исполнительного механизма.

Рассмотрим динамическое гашение колебаний исполнительного механизма в момент позиционирования, когда основной привод движения заторможен. Структурная схема, учитывающая данное обстоятельство и полученная на основании преобразованных по Лапласу уравнений (1) - (3), приведена на рис. 2. Управление движением промежуточной массы может быть организовано по координате упругого отклонения исполнительного механизма Δq_2, и суммарным упругим колебаниям робота $\Delta q = \Delta q_1 + \Delta q_2$. В настоящей статье приводятся алгоритмы управления движением промежуточной массы по упругим колебаниям Δq.

По этой схеме находим изображение упругих колебаний исполнительного органа,

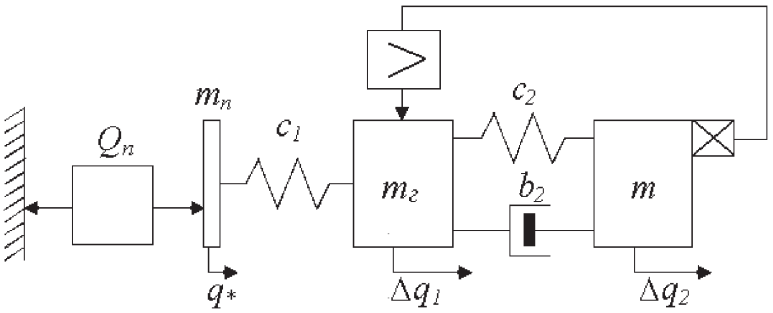


Рис.1. Расчетная схема активного динамического гасителя колебаний

которое при переходе к принятым обозначениям имеет вид

$$\Delta q(p) = \frac{[p^2 + \mu\cdot(\nu^{-1}+1)\cdot p + \omega_0^2\cdot(\nu^{-1}+1) + f^2]\cdot \ddot{q}_.}{p^4 + \mu\cdot(\nu^{-1}+1)\cdot p^3 + \left[\omega_0^2\cdot(\nu^{-1}+1) + f^2\right]\cdot p^2 + f^2\cdot\mu\cdot p + A}, \quad (4)$$

где $\mu = \frac{b_2}{m}$; $f^2 = \frac{c_1}{m_r}$; $\omega_0^2 = \frac{c_2}{m}$; $w_{oc} = \frac{W_{oc}}{m_r}$; $\nu = \frac{m_r}{m}$; $p = d/dt$; $A = f^2\cdot\omega_0^2 + w_{oc}\cdot(\mu\cdot p + \omega_0^2)$.

Используя интегральные квадратичные оценки [3], определим наиболее эффективную структуру цепи управления гасителем при импульсном воздействии тормозного ускорения $\ddot{q}_. = -a\cdot\delta(t)$, где $\delta(t)$ - единичная импульсная функция.

Для отрицательной пропорциональной дополнительной связи с передаточной функцией $w_{oc}(p) = k_D$ на основании уравнения (4) интегральный функционал имеет вид

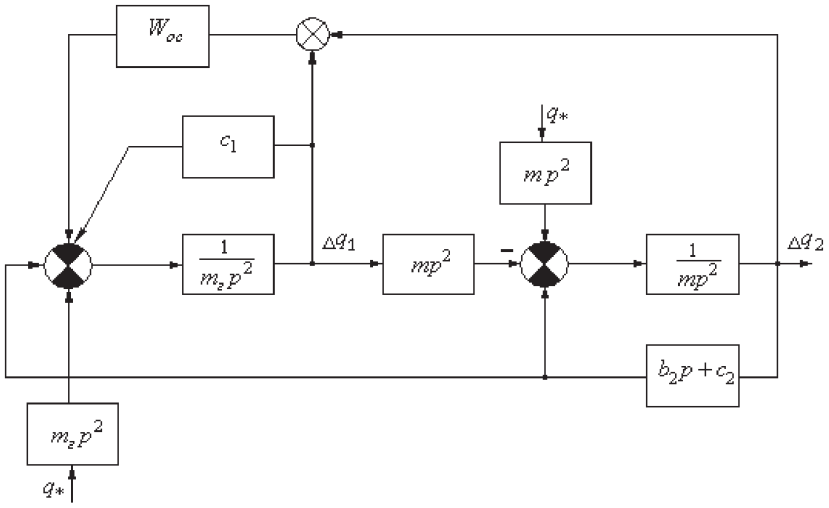


Рис. 2. Структурная схема исполнительного механизма с активным динамическим гасителем

$$J_1 = \frac{a^2\omega_0^2(f^2+k_D)^2}{2\mu\omega_0^2(f^2+k_D)^2\cdot(f^2\nu^{-1}-k_D)} + \\ + \frac{a^2\left\{[S^3\omega_0^2\mu^2 - L\cdot(3\omega_0^2 S+f^2)]\cdot(f^2+k_D)+S\cdot L^3\right\}}{2\mu\omega_0^2(f^2+k_D)^2\cdot(f^2\nu^{-1}-k_D)}, \quad (5)$$

где $S=(\nu^{-1}+1)$, $L=\omega_0^2 S+f^2$.

Анализ устойчивости системы с позиционной обратной связью, согласно критерию Гурвица, показывает, что коэффициент усиления ограничен величиной

$$k_D^{np} = \nu^{-1}\cdot f^2. \quad (6)$$

Квадратичный функционал для отрицательной дифференцирующей обратной связи с передаточной функцией $w_{oc}(p)=k_V p$ определяется следующим выражением

$$J_2 = \frac{a^2(f^2\omega_0^2+S^3\mu^2\omega_0^2-L^2)\cdot(f^2\mu+\omega_0^2 k_V)}{B} + \\ + \frac{a^2[f^2\mu S[\omega_0^2\mu S k_V + L(k_V\mu-2\omega_0^2)]+\mu S L^3]}{B}, \quad (7)$$

где

$$B = 2f^2\omega_0^2\cdot\left\{-(f^2\mu+\omega_0^2 k_V)^2 + \right. \\ \left. +\mu S(f^2+\mu k_V)(f^2\mu+\omega_0^2 k_V)+\mu S^2\omega_0^4 k_V\right\}.$$

Увеличение коэффициента усиления дифференцирующей связи k_V ограничивается условиями устойчивости. Как показывают исследования, предельное значение этого коэффициента имеет вид

$$k_V^{np} = \frac{\mu\cdot[\nu\cdot f^2+\omega_0^2(\nu+1)^2]}{\nu\cdot[\omega_0^2\cdot\nu-\mu^2(\nu+1)]}. \quad (8)$$

Для определения оптимальных значений коэффициентов усиления пропорциональной k_D^{opt} и дифференцирующей k_V^{opt} обратных связей авторами статьи проведены численные исследования, в результате которых было установлено следующее. Коэффициенты усиления рассмотренных выше дополнительных обратных связей зависят от параметров динамического гасителя f и μ. Увеличение коэффициента вязкого трения μ приводит к уменьшению значения оптимального коэффициента k_D^{opt} и увеличению значения коэффициента k_V^{opt}. При увеличении собственной частоты колебаний гасителя f значения коэффициентов усиления пропорциональной и дифференцирующей обратных связей возрастают.

Для положительной связи, пропорциональной ускорению с передаточной функцией $w_{oc}(p)=k_A p^2$ квадратичный функционал будет иметь вид

$$J_3 = \frac{a^2(k_A+S)\cdot(L^3+L^2\omega_0^2 k_A - 2Lf^2\omega_0^2+f^2\omega_0^2\mu^2 S^2)}{2\mu f^6\omega_0^2(k_A+\nu^{-1})} + \\ + \frac{a^2 f^2(f^2\omega_0^2-L^2)}{2\mu f^6\omega_0^2(k_A+\nu^{-1})}. \quad (9)$$

Согласно исследованиям устойчивости системы, предельное значение коэффициента усиления обратной связи по ускорению упругих колебаний следующее

$$k_A^{np} = \frac{f^2\nu+2\omega_0^2(\nu+1)-\sqrt{f^2\nu^2(4\omega_0^2+f^2)}}{2\omega_0^2\nu}. \quad (10)$$

Определим оптимальное значение коэффициента усиления данной дополнительной обратной связи, которое обеспечит минимальную интегральную оценку (9) и, соответственно, минимальное время переходного процесса отклонения исполнительного механизма от положения равновесия. Для этого частную производную функционала J_3 по коэффициенту k_A приравняем нулю и решим относительно последнего полученное выражение

$$k_A^{opt} = \nu^{-1} - \frac{(\nu+1)\cdot\sqrt{\omega_0^4+f^2\mu^2}}{\omega_0^2(\nu+1)+f^2\nu}. \quad (11)$$

Из выражения (11) следует, что при изменениях собственной частоты колебаний гасителя f и коэффициента вязкого трения μ, вызванных изменениями конфигурации динамического гасителя, будут изменяться значения оптимального коэффициента k_A^{opt}. С увеличением частоты собственных колебаний гасителя f и уменьшением коэффициента вязкого трения ($\mu\to 0$) возрастают значения оптимального коэффициента k_A^{opt}.

Реализация режимов динамического гашения колебаний возможна, например, в промышленных роботах, работающих в цилиндрических, сферических и угловых системах координат, таких как УМ-1, «Универсал-5», РМ-01, М20П, путем организации управляемого движения поворотной колонны или стойки, обладающих существенной инерционностью. На примере промышленного робота УМ-1 проведем исследования эффективности динамического гасителя колебаний, предполагая, что в качестве активного сервомеханизма используется электродвигатель постоянного тока. Применение в электроприводах постоянного тока плоских и гладких роторов позволяет уменьшить момент инерции электродвигателей и повысить их быстродействие, что делает возможным использование этих приводов в качестве исполнительных меха-

низмов систем управления колебаниями. Конструктивная схема манипулятора промышленного робота УМ-1 приведена на рис. 3.

Манипулятор представляет собой сборную конструкцию, включающую платформу, шестистепенной механизм, каркас с кожухами, гидрооборудование и электрооборудование. Чугунная платформа 1 служит основанием манипулятора. Шестистепенной механизм является исполнительной частью манипулятора. Он состоит из поворотного стола 3, каретки 6, руки 5, кисти 4, привода продольного перемещения, каретки привода вертикального перемещения, гидроцилиндра и привода тахогенератора вертикального перемещения. Механизм поворота руки состоит из корпуса и двух гидроцилиндров. В подшипниках корпуса установлен поворотный стол 3, на оси которого закреплена звездочка 2, связанная через втулочно-роликовые цепи 9 и тяги с гидроцилиндрами 8. На поворотном столе установлена колонна 7, на которой расположена каретка 6, в роликовых направляющих которой перемещается рука 5.

В качестве дополнительной массы в данном случае выступает вертикальная колонна 7 с кареткой 6, которая приводится в движение с помощью дополнительного двигателя постоянного тока с редуктором (10) и зубчатым колесом, входящим в зацепление с поворотной шестерней (2). Формирование необходимых законов управления гасителем производится посредством системы управления от датчиков обратных связей, установленных на руке робота.

Помимо обычных допущений об отсутствии реакции якоря, вихревых токов и взаимной индуктивности между обмотками якоря и возбуждения при получении уравнений движения примем следующие допущения: магнитная цепь электродвигателя не насыщена, число витков, сечение проводников и условия охлаждения обмоток возбуждения (независимо от характера ее включения) остаются неизменными.

При этих допущениях электродвигатели постоянного тока любого способа возбуждения описываются уравнениями

$$U = R_я i_я + L_я \frac{di_я}{dt} + C_e \omega_Д; \qquad (12)$$

$$M = C_m i_я, \qquad (13)$$

где $R_я$ - сопротивление якоря; $L_я$ - индуктивность якоря; $i_я$ - ток якоря; U - управляющее напряжение в якорной цепи; M- электромагнитный момент; C_m, C_e - конструктивные параметры привода; $\omega_Д$ - угловая скорость вала ненагруженного двигателя [4, 5].

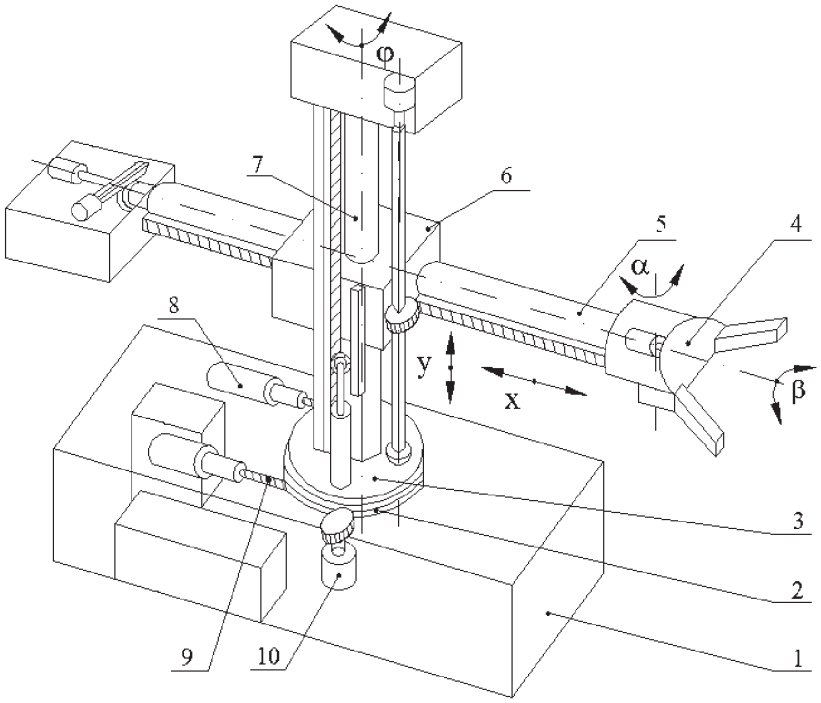


Рис. 3. Кинематическая схема манипулятора: 1 – платформа; 2 – звездочка; 3 – поворотный стол; 4 – кисть; 5 – рука (штанга); 6 – каретка; 7 – колонна; 8 – гидроцилиндр поворота руки; 9 – цепь; 10 – электродвигатель постоянного тока с редуктором

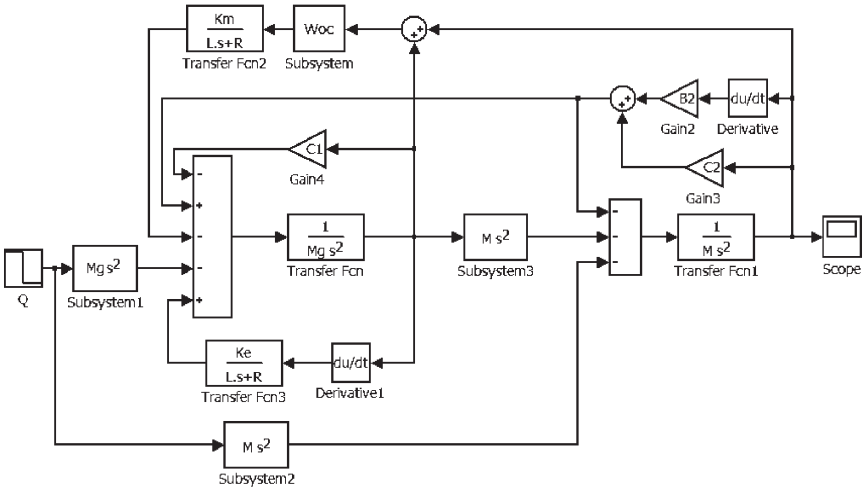


Рис.4. Simulink-модель трехмассовой системы с электромеханическим гасителем колебаний

Преобразуя выражения (12), (13) и приводя затем их к выходному валу редуктора, получим движущий момент выходного вала редуктора

$$M_n = \left(1+\frac{1}{R_я}\frac{dL_я}{dt}\right)^{-1}\frac{C_m u}{R_я}(U - C_e u\Delta\dot{q}_1 - u\Delta q_2), \quad (14)$$

где u - передаточное отношение редуктора; M_n - движущий момент выходного вала редуктора; $\dot{q}_1$ - угловая скорость выходного вала редуктора.

Составим дифференциальные уравнения движения исполнительного механизма с данным динамическим гасителем

$$m_r\Delta\ddot{q}_1 + m_r\Delta\ddot{q}_. + c_1\Delta q_1 - \frac{C_e C_m u^2}{R_я(L_я R_я^{-1}p+1)}\Delta\dot{q}_1 - \quad (15)$$
$$-c_2\Delta q_2 - b_2\Delta\dot{q}_2 = -\frac{C_m u(U-\Delta q_2)}{R_я(L_я R_я^{-1}p+1)},$$

$$m\Delta\ddot{q}_2 + m\Delta\ddot{q}_1 + m\ddot{q}_. + b_2\Delta\dot{q}_2 + c_2\Delta q_2 = 0. \quad (16)$$

Для проверки эффективности работы активного динамического гасителя с электромеханическим приводом на основе уравнений (15) - (16) была построена Simulink-модель, приведенная на рис. 4.

Данная модель включает в себя элементы с передаточными функциями $\frac{K_e p}{L_я p + R_я}$ и $\frac{K_m}{L_я p + R_я}$. Первый из этих элементов отражает свойства электропривода, обусловленные его конструктивным оформлением, а второй — деформирует «идеальную» обратную связь $W_{oc}(p)$, определяя величину компенсирующего воздействия, формируемого электроприводом. В процессе численного моделирования параметры исполнительного механизма были приняты близкими к параметрам руки робота модели УМ-1: $m = 65$кг; $\omega_0 = 20c^{-1}$. При этом динамический гаситель имел следующие параметры: $\nu^{-1} = 0{,}1$; $f = 10c^{-1}$; $\mu = 0{,}2c^{-1}$; $L_я = 5{,}6\cdot10^{-3}\,Гн$; $R_я = 3{,}8Ом$; $C_m = 0{,}023\,Н\cdot м\cdot А^{-1}$; $C_e = 0{,}098B\cdot c\cdot рад^{-1}$. Коэффициенты усиления обратных связей гасителя определялись по выше приведенным выражениям с учетом необходимых запасов устойчивости. Графики свободных колебаний руки, снабженной активным динамическим гасителем с электромеханическим приводом, полученные путем численного моделирования уравнений движения, показаны на рис. 5. Кривая 1 соответствует колебаниям системы при отсутствии динамического гасителя; 2 — при управлении гаси-

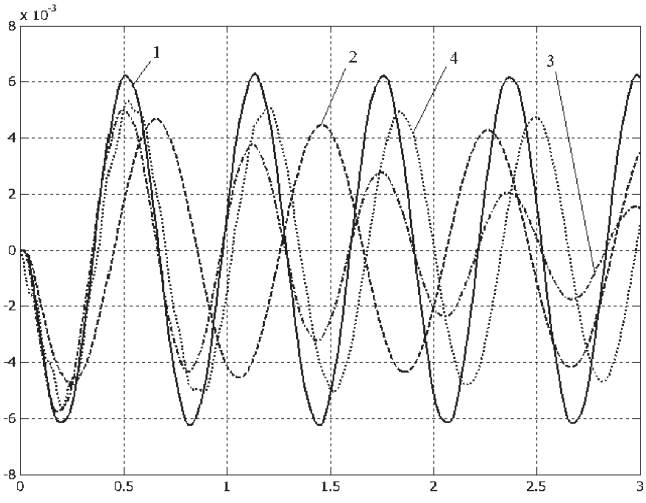


Рис. 5. Графики упругих колебаний системы с гасителем колебаний.

телем по упругим координатам; 3 — при управлении по скорости упругих колебаний; 4 — при управлении по ускорению колебаний.

Анализ графиков показал, что для исследуемых параметров системы наибольшей эффективностью обладает динамический гаситель по скорости упругих колебаний системы. Однако в ходе численного моделирования было установлено, что в зависимости от конфигурации динамического гасителя и его параметров эффективность связей изменяется. Вязкое трение отрицательно сказывается на эффективности пропорциональной обратной связи: чем больше величина μ, тем менее эффективна данная связь. В тоже время увеличение собственной частоты колебаний гасителя f повышает эффективность дополнительной позиционной связи и делает более эффективной обратной связи по ускорению. Таким образом, проведенные исследования подтвердили результаты аналитических расчетов и показали высокую эффективность использования в качестве активного динамического гасителя колебаний промежуточную массу трехмассовой колебательной системы.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Елисеев, С. В. Управление колебаниями роботов / С. В. Елисеев, Н. К. Кузнецов, А. В. Лукьянов. — Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1990. — 320 с.
2. Вибрации в технике : справочник в 6 т. / ред. совет: В. Н. Челомей (пред.) [и др.]. — М. : Машиностроение, 1995. Т. 6 : Защита от вибраций и ударов / под ред. К. В. Фролова. — 1995. — 456 с.
3. Топчеев, Ю. И. Атлас для проектирования систем автоматического регулирования. / Ю. И. Топчеев. — М. : Машиностроение, 1989. — 752 с.
4. Чиликин, М. Г. Теория автоматизированного электропривода / М. Г. Чиликин, В. И. Ключев, А. С. Сандлер. — М. : Энергия, 1979. — 616 с.
5. Кузнецов, Н. К. Теоретические и экспериментальные исследования упругих колебаний электромеханического промышленного робота / Н. К. Кузнецов, В. П. Булятkин, А. В. Лукьянов // Роботы и робототехнические системы : сб. научн. тр. / Иркут. политехн. ин-т. — Иркутск, 1984. — С. 43-53.

Новицкий Е.А., Шишкин З. А., Кузнецов К.А. УДК 66.011

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗЛИФТНОГО РЕАКТОРА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ХЛОРИРОВАНИЯ ЭТИЛЕНА

В настоящее время в России на химических предприятиях наблюдается тенденция к обновлению производственных мощностей на основе современного оборудования. Задача нахождения основных размеров оборудования, определения режимов его функционирования на основе соответствующих расчетов является наиболее сложной и ответственной. От результатов ее решения зависит не только значительная часть расходных статей, но и надежность оборудования, безопасность его эксплуатации.

Синтез 1,2-дихлорэтана (ДХЭ) является одной из стадий производства крупнотоннажного продукта хлорорганического синтеза — поливинилхлорида — сырья для производства различной продукции: трубопроводов, деталей для строительства, транспорта, электротехники, радиоэлектроники и т.д. Наиболее перспективным методом производства ДХЭ остается высокотемпературное хлорирование этилена в газлифтном реакторе, характеризующимся низкими капитальными и эксплуатационными затратами.

Газлифтный реактор синтеза ДХЭ представляет собой аппарат, в котором совмещены несколько процессов: абсорбция хлора реакционной средой — дихлорэтаном, хемосорбция этилена раствором хлора в ДХЭ с выделением значительного количества тепла, и от-

ведение тепла реакции за счет кипения реакционной среды (рис. 1).

Сложность задачи моделирования аппаратов данного типа, определения оптимальных размеров при проектировании новых конструкций аппаратов заключается в необходимости взаимосвязанного решения большого количества частных задач по определению условий протекания заданных процессов.

Одним из основных условий протекания высокоселективного синтеза ДХЭ в газлифтном реакторе является установление необходимого расхода циркуляции реакционной среды в реакторе. При большом расходе рабочей среды время контакта реагентов может быть недостаточным, что приведет к неполной конверсии хлора и снижению селективности процесса за счет протекания побочных реакций в зоне кипения. Малый расход рабочей среды приводит к увеличению температуры в зоне реакции и последующему вскипанию среды в зоне протекания реакции [1].

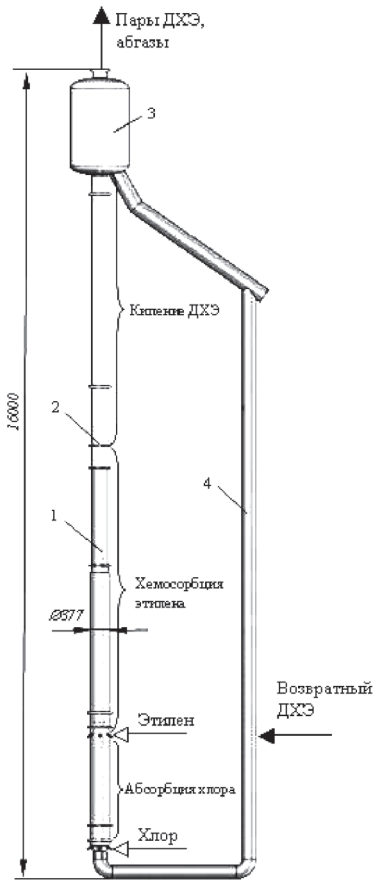


Рис. 1. Газлифтный реактор высокотемпературного хлорирования этилена: 1 – барботажная труба; 2 – гидравлическое сопротивление;3 – сепаратор; 4 – циркуляционная труба

В работе предложена математическая модель гидравлического расчета газлифтного реактора прямого хлорирования этилена. Представлены результаты тестирования модели сопоставлением расчетных данных с данными экспериментов, полученных на опытно-промышленном реакторе.

Сущность предлагаемого метода расчета газлифтного реактора прямого высокотемпературного хлорирования этилена состоит в представлении непрерывных квазистационарных полей определяющих параметров реактора в виде совокупности их дискретных значений в элементарных областях (рис. 2), моделируемых системой эмпирических и аналитических уравнений.

В математической модели элементарной области приняты следующие допущения: поля определяющих параметров в аппарате одномерны; физические характеристики газожидкостного потока внутри элементарной области постоянны; потери тепла в окружающую среду учитываются в процентном отношении от общего количества выделившегося тепла в общем тепловом балансе; тепло- и массообмен между элементарными областями отсутствует, т.е. продольное перемешивание не учитывается.

Перед расчетом элементарных областей задается первоначальный расход циркулирующего ДХЭ G_6 и решением совокупности уравнений, представленных в табл. 1, определяются общие массовый и тепловой балансы реактора.

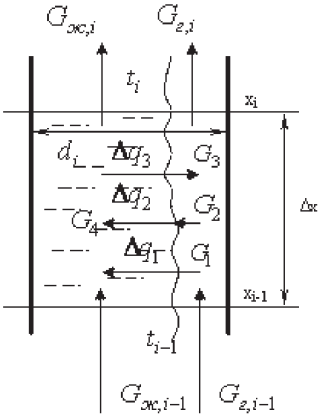


Рис. 2. Структура элементарной области:
Δx – длина элементарной области; d_i – диаметр элементарной области; $G_ж$, $G_г$ - расходы жидкой и газовой фаз; t - температура; G_1, G_2, G_3, G_4 - расходы хлора, этилена, синтезированный и испарившийся ДХЭ; Δq_1, Δq_2, Δq_3 -тепловые эффекты абсорбции, реакции, теплота испарения

Таблица 1

Уравнения расчета материального и теплового балансов реактора.

Параметр, ед. изм.	Формула	
Массовые расходы хлора, этилена и инертных газов (азота и кислорода воздуха) в реактор, кг/с	$G_{n,0} = \frac{Q_n \cdot \rho_n^0}{3600},\ n = 1..3$	
Общая тепловая мощность, выделившаяся в процессе абсорбции хлора и реакции хлорирования этилена, кВт	$q_{A,P} = \frac{G_{1,0}}{M_1} \cdot (\Delta H_A + \Delta H_P)$	
Тепловая мощность, затраченная на нагрев хлора, этилена и инертных газов (воздуха), кВт	$\Delta q_n = G_{n,0} \cdot c_n \cdot (t_B - t_n),\ n = 1..3$	
Массовый расход синтезированного ДХЭ, кг/с	$G_5 = \frac{G_{1,0} \cdot M_{ДХЭ}}{M_1}$	
Массовый расход испарившегося в реакторе ДХЭ, кг/с	$G_7 = \frac{q_{A,P} \cdot (1-\eta) - \sum_{n=1}^{3} \Delta q_n + G_5 \cdot c_{ДХЭ} \cdot (t_B - t_4)}{r + c_{ДХЭ} \cdot (t_B - t_4)}$	
Массовый расход возвратного ДХЭ, кг/с	$G_4 = G_7 - G_5$	
Тепловая мощность, затраченная на нагрев возвратного ДХЭ, кВт	$\Delta q_4 = G_4 \cdot c_{ДХЭ} \cdot (t_B - t_4)$	

Первой элементарной областью при расчете барботажной трубы принимается место ввода хлора. Общее количество элементарных областей составляет $z = H_б / \Delta x$, где $H_б$ - высота барботажной трубы, м.

Математическая модель элементарной области описывается уравнениями, приведенными в табл. 2.

Температура в элементарной области рассчитывается в соответствии с логически выполняемыми условиями протекания процес-

Таблица 2

Уравнения расчета элементарной области реактора.

Параметр, ед. изм.	Формула	
Время протекания процессов от начала вводов хлора и этилена, соответственно, с	$\tau_{1,i} = \tau_{1,(i-1)} + \frac{\Delta x \cdot (1 - \varphi_{г,(i-1)})}{w_{ж,(i-1)}}$	
	Если $x_i \Rightarrow x_2$ то $\tau_2 = \tau_{1,(i-1)}$, иначе $\tau_2 = \tau_{1,i}$	
Массовый расход хлора в газовой фазе, кг/с	$G_{г1,i} = G_{1,0} \cdot e^{-k_1 \cdot \tau_{1,i}}$	
Общий расход хлора в зоне реакции, кг/с	$G_{1,i} = G_{1,0} \cdot e^{-k_2 \cdot (\tau_{1,i} - \tau_2)}$, k_1 и k_2 - коэффициенты пропорциональности [2]	
Массовые расходы хлора в жидкой фазе, кг/с	$G_{ж1,i} = G_{1,0} - G_{г1,i}$	
Расход прореагировавшего хлора, кг/с	$G_{p1,i} = G_{1,0} - G_{1,i}$	
Массовый расход этилена в газовой фазе, кг/с	$G_{г2,i} = G_{2,0} - \frac{G_{p1,i} \cdot M_2}{M_1}$	
Массовый расход синтезированного ДХЭ, кг/с	$G_{5,i} = \frac{G_{p1,i} \cdot M_{ДХЭ}}{M_1}$	

Таблица 2 (продолжение)

Параметр, ед. изм.	Формула	
Тепловая мощность, выделившаяся в процессе абсорбции хлора, кВт:	$\Delta q_{A,i} = \frac{G_{ж1,i} - G_{ж1,(i-1)}}{M_1} \cdot \Delta H_A$	
Тепловая мощность, выделившаяся в процессе хемосорбции этилена, кВт	$\Delta q_{P,i} = \frac{G_{p1,i} - G_{r1,(i-1)}}{M_1} \cdot \Delta H_P$	
Тепловая мощность, затраченная на нагрев хлора и инертных газов, кВт	$\Delta q_{n,i} = \frac{G_{ж1,i} - G_{ж1,(i-1)}}{G_{1,0}} \cdot \Delta q_n$, $n = 1, 3$	
Тепловая мощность, затраченная на нагрев этилена, кВт	$\Delta q_{2,i} = \frac{G_{p1,i} - G_{p1,(i-1)}}{G_{1,0}} \cdot \Delta q_2$	
Массовый расход жидкого ДХЭ, кг/с	$G_{6,i} = G_6 + G_{5,i} - G_{7,(i-1)}$	
Температура на выходе из элементарного участка, °С	Если $i = 0$, то $t_i = \frac{G_6 \cdot c_6 \cdot t_z + G_4 \cdot c_4 \cdot t_4}{G_6 \cdot c_6 + G_4 \cdot c_4}$	(1)
	иначе $t_i = \frac{\Delta q_{A,i} + \Delta q_{P,i} - \sum_{n=1}^{3} \Delta q_{n,i}}{G_{6,i} \cdot c_{6,i}} + t_{(i-1)}$.	(2)
	Если $t_i > t_{КИП}$, то $t_i = t_{КИП}$, где $t_{КИП}$.	(3)
Массовый расход пара ДХЭ, кг/с	Если $t_i > t_{КИП}$, то $G_{7,i} = \frac{G_{6,i} \cdot c_6 \cdot (t_{\max} - t_i)}{r_i}$, иначе $G_{7,i} = 0$	(4)
Приведенная скорость газа, м/с	$w_{r,i} = \frac{4 \cdot \sum_n G_{r,n,i}}{\rho_r \cdot \pi \cdot d_i^2}$, n = 1-3, 7	(5)
Приведенная скорость жидкости, м/с	$w_{ж,i} = \frac{4 \cdot G_{6,i}}{\rho_r \cdot \pi \cdot d_i^2}$	(6)
Объемное газосодержание, доля	$\varphi_{r,i} = \frac{w_{r,i}}{w_{r,i} + w_{ж,i} + \alpha_i \cdot u_{П,i}}$, где $\alpha_i = 1{,}4 \cdot (\rho_{ж,i} / \rho_{r,i})^{1/5} (\Delta\rho / \rho_{ж,i})^5$ - коэффициент; $u_{П,i} = 1{,}5 \cdot (\sigma_{ж,i} g \Delta\rho / \rho_{ж,i}^2)^{0,25}$ - скорость всплытия одиночного пузыря, м/с.	(7)
Движущая сила в элементарной области, Па	$\Delta P_{ДВ,i} = \Delta x \cdot (\rho_{ж,i} - \rho_{r,i}) \cdot \varphi_{r,i} \cdot g$	
Потеря напора двухфазного потока в элементарной области, Па	$\Delta P_{Б,i} = \Delta P_{ТР,i} + \Delta P_{МС,i} + \Delta P_{ИН,i}$	(8)

сов по высоте реактора: подача возвратного ДХЭ; выделение тепла за счет абсорбции и реакции; кипение ДХЭ (1)-(3).

Температура кипения дихлорэтана может быть рассчитана по уравнению Антуана [3], °С:

$$t_{КИП} = \left[\frac{2927{,}17}{\left(16{,}1764 - \ln\left(\frac{760 \cdot P_{i,(j-1)}}{101300} \right) \right)} \right] - 222{,}93.$$

$P_{i,(j-1)}$ - давление в элементарной области из предыдущей итерации расчета или начальное условие при первой итерации, Па.

Теплофизические свойства в уравнениях (1)-(4), теплоемкость и теплота парообразования ДХЭ, определяются по средней температуре в элементарной области $t_{ср,i} = (t_i + t_{(i-1)}) / 2$ итерационно.

По найденной средней температуре определяются плотность, молекулярная вязкость жидкой фазы и газовой смеси.

Для определения объемного газосодержания в элементарной области находятся приведенные скорости газа и жидкости (5)-(6). Объемное газосодержание определяется по уравнению (7) [4].

Потеря напора двухфазного потока в элементарной области состоит из трех составляющих (8): потери напора на трение $\Delta P_{TP,i}$, потери напора на местное сопротивление $\Delta P_{MC,i}$ и изменения кинетической энергии потока от изменения газосодержания, т.е. инерционного напора:

$$\Delta P_{ИН,i} = \frac{\rho_{ж,i} w_{ж,i}^2}{2}\left[\frac{1}{(1-\varphi_{г,i})^2} - \frac{1}{(1-\varphi_{г,(i-1)})^2}\right],$$

где $\varphi_{г(i-1)}$, $\varphi_{г,i}$ - газосодержание в предыдущей и текущей элементарных областях соответственно, доля.

Потери напора на трение и на местных сопротивлениях двухфазного потока рассчитываются по зависимости, предложенной Чизхолмом [5]:

$$\Delta P_{TP,i} / \Delta P_{ж,i} = 1 + (y^2 - 1)\cdot\left[B\cdot x^{(2-0,37)/2}(1-x)^{(2-0,37)/2} + x^{(2-0,37)}\right],$$

где $\Delta P_{ж,i}$ - сопротивление монолитной жидкости, Па; x — расходное массовое газосодержание, доля; $y = \left(\rho_{ж,i}/\rho_{г,i}\right)^{0,5}\left(\mu_{г,i}/\mu_{ж,i}\right)^{0,25/2}$.

Коэффициент B зависит от массовой скорости газожидкостной смеси m [кг/(м^2·с)] и значения параметра y.

Полное давление на предыдущую элементарную область составляет, Па

$$P_{(i-1)} = P_{i,(j-1)} + \Delta P_{Б,i} + \Delta x\cdot(\rho_{ж,i} - \rho_{г,i})\cdot(1-\varphi_{г,i})\cdot g.$$

Расчет представляет собой последовательный многократный расчет полей сопротивления потоку и движущей силы циркуляции до достижения равенства

$$\sum_{i=1}^{z}\Delta P_{ДВ,i} = \sum_{i=1}^{z}\Delta P_{Б,i} + \Delta P_{Ц}\ , \qquad (9)$$

где $\Delta P_{Ц}$ - сопротивление циркуляционной трубы, Па.

Равенство уравнения (9) достигается за счет изменения расхода циркуляционного ДХЭ пропорционально разности движущего напора и сопротивления циркуляционного контура.

Блок-схема расчета представле на на рис. 3.

Тестирование разработанной математической модели реактора проводилось путем сравнения расчетных полей температуры по высоте реактора и расходов циркулирующего ДХЭ с данными экспериментов, проведенных на опытно-промышленном реакторе прямого высокотемпературного хлорирования этилена (рис. 4).

Из диаграмм видно, наибольшее отклонение расчетной температуры от экспериментально полученных значений имеется в областях с прямыми участками максимальных диаметров перед и после местных сопротивлений. Отклонение температур объясняется принятым в математической модели допущением об идеальном вытеснении потока, значительно упрощающим модель. В реальности в этих областях имеет место струйное течение с крупномасштабными вихревыми потоками.

Отклонение расчетного расхода циркулирующего в реакторе ДХЭ от данных экспериментов, определенных по приращению температуры в зоне реакции опытного реактора, составило не более 3%.

Таким образом, рассмотренный подход к моделированию газлифтного реактора высокотемпературного хлорирования этилена позволяет оценить расход циркулирующего ДХЭ, газосодержание и температуру по высоте реактора и оптимизировать его геометрические размеры для создания благоприятных условий протекания процесса.

Условные обозначения: c - теплоемкость, кДж/(кг·К); d - внутренний диаметр элементарной области аппарата, м; G - массовый расход, кг/с; g- ускорение свободного падения, м/с^2; ΔH - тепловой эффект, кДж/кмоль; P - давление, Па; Q — объемный расход, м^3/ч; Δq - тепловая мощность, кВт; r - удельная теплота парообразования ДХЭ, кДж/кг; t - температура, °С; w - приведенная скорость, м/с; τ- время, с; η - потери тепла в окружающую среду, доля; μ - динамический коэффициент вязкости, Па·с; ρ - плотность, кг/м^3; σ - поверхностное натяжение, Н/м; φ - газосодержание, объемная доля.

Индексы: n — индекс потоков; 1 - хлор; 2 - этилен; 3 воздух; 4 - возвратный ДХЭ; 5 - синтезированный ДХЭ; 6 - циркулирующий жидкий ДХЭ; 7 - пар ДХЭ; $г$ - газовая фаза; $ж$ - жидкая фаза; i - порядковый номер элементарной области; j — итерация; $Б$ - барботажная труба; $Ц$ - циркуляционная труба; $ДВ$ - движущая

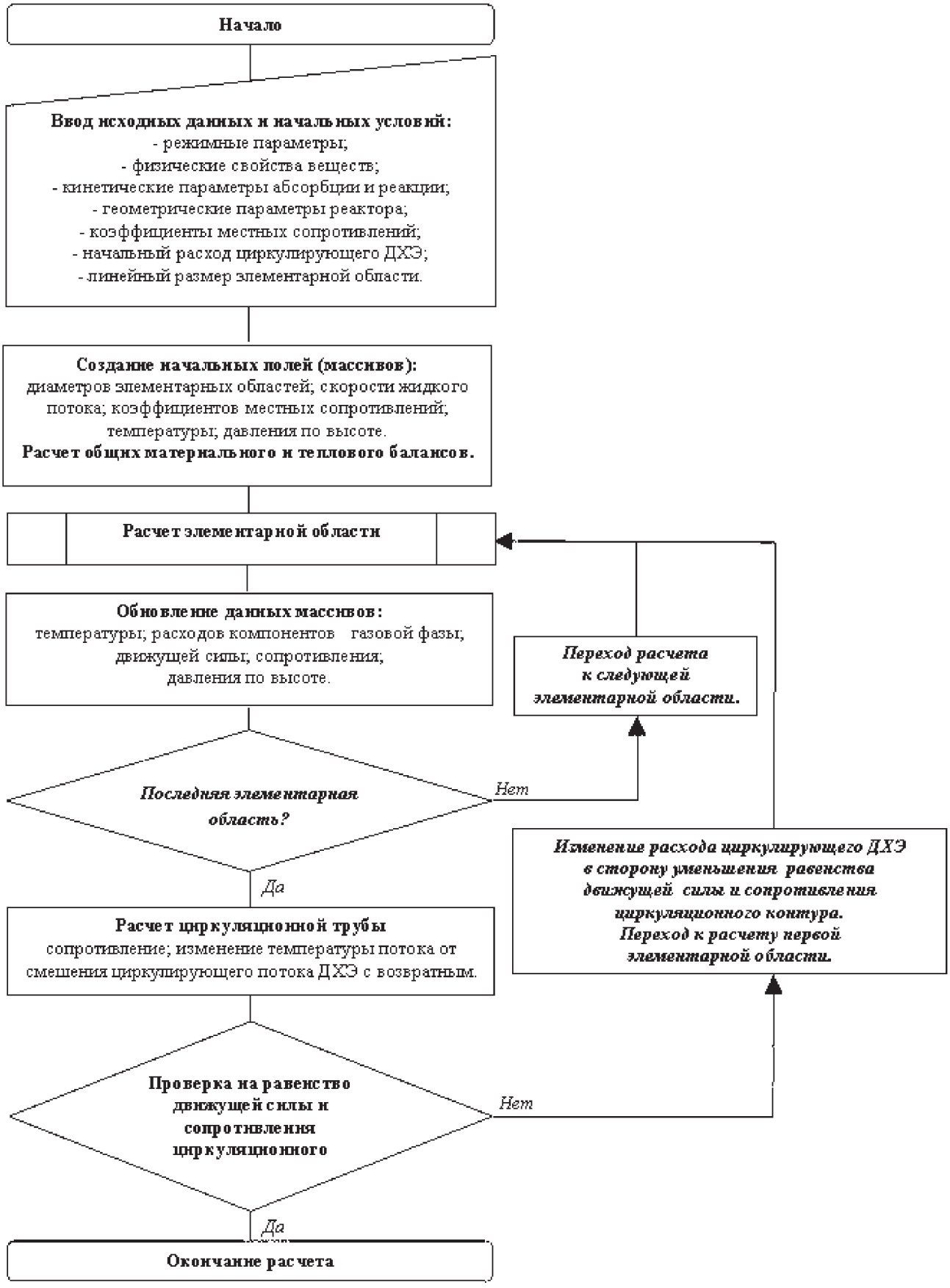


Рис. 3. Блок-схема расчета газлифтного реактора

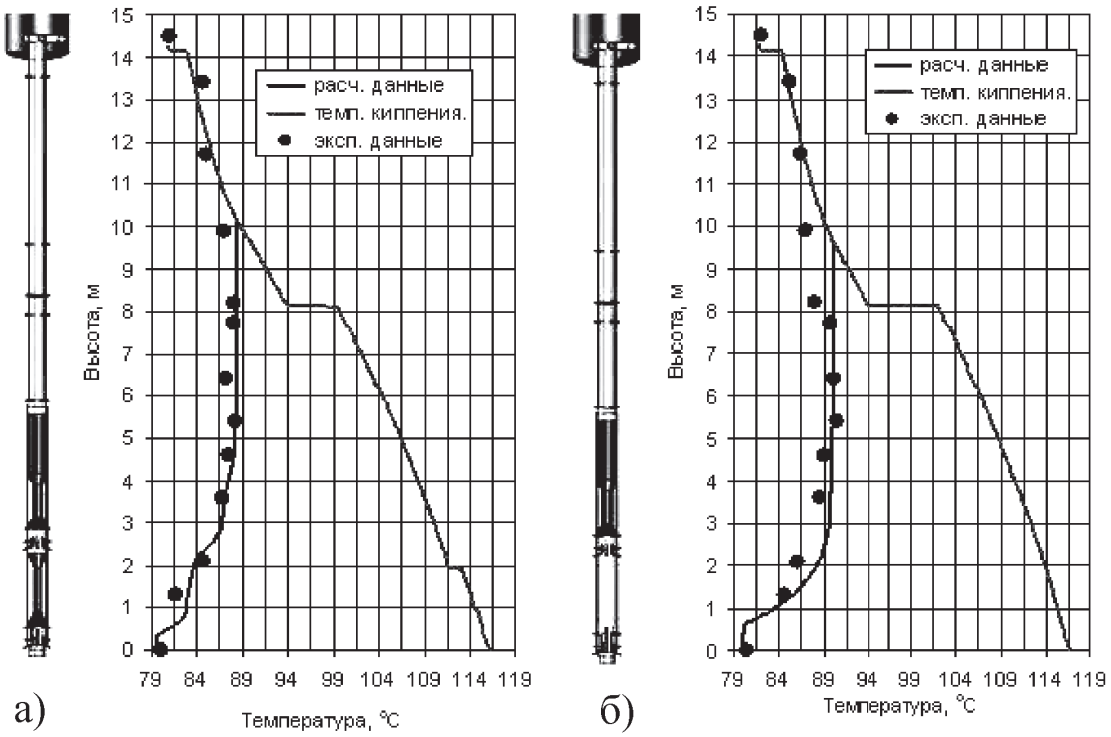


Рис. 4. Поля температур: *а* **- нагрузка по хлору 245 м^3/ч;** *б* **- нагрузка по хлору 315 м^3/ч**

сила; *МС* - местное сопротивление; *ИН* - инерционный напор; *ТР* - трение; *А* - абсорбция; *Р* - реакция; *В* - верх реактора.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Патент Российской Федерации №2162834, МКИ С 07 С 17/02. Способ получения 1,2-дихлорэтана / Опубликован 10.02.2001. Бюл. № 4. - С. 72-74.
2. Новицкий Е.А., Самсонов В.В., Шишкин З. А., Кузнецов К.А. Кинетика жидкофазного хлорирования этилена в реакторах с эжекционным вводом реагентов. Доклады X международная научно-практическая конференция "Химия XXI век: новые технологии, новые продукты" — Кемерово: Кузбасский государственный технический университет и ЗАО Кузбасский выставочный комплекс «ЭкспоКемерово», 2007 — С. 148-150.
3. Ульянов Б.А., Бадеников В.Я., Ликучёв В.Г. Процессы и аппараты химической технологии. Учебное пособие - Ангарск: Издательство АГТА, 2005, - 22 с.
4. Соколов В.Н., Доманский И.В. Газожидкостные реакторы — Л.: Машиностроение, 1976. - 216 с.
5. Ульянов Б.А., Щелкунов Б.И. Процессы и аппараты химической технологии. Гидравлические процессы: Учебное пособие. — Иркутск: Изд-во Иркутского ун-та. 1996. - 220 с.

Кобзов Д.Ю., Кобзов А.Ю., Жмуров В.В. УДК 69.002.51.192:621.225.2

О РАСЧЁТЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДЕРНИЗАЦИИ ГИДРОЦИЛИНДРОВ ДСМ

Известно, что надёжность гидроцилиндров дорожных и строительных машин (ДСМ) по несущей (нагрузочной) способности в большинстве случаев ограничивается прочностью штока [1], вследствие чего условие его безотказного состояния в опасном сечении с координатой x описывается методом непревышения или «несущая способность - нагрузка» [2]

$$\sigma_i(x) \le [\sigma]_i. \qquad (1)$$

Здесь роль нагрузки выполняют текущие эксплуатационные напряжения $\sigma_i(x)$, а несущей способности - допускаемые $[\sigma]_i$. Не секрет также, что разрушение (возникновение пластической деформации) штоков в большинстве случаев происходит по причине необратимого изменения микроструктуры их материала в результате циклического нагружения знакопеременной нагрузкой, то есть вследствие усталостного разрушения. При этом с достаточной степенью достоверности отрицательные напряжения σ_{min} сжатия, возникающие в его опасном сечении, определяются по формуле

$$\sigma_{min}(x) = -\left[\frac{P_i}{F(x)} + \frac{M_Q(x) \pm M_{Ri}(x) + P_i y_T(x) + P_i e_i(x)}{W(x)}\right], \qquad (2)$$

а положительные $\sigma_{max}(x)$ растяжения - из выражения

$$\sigma_{max}(x) = \frac{P_j}{F(x)} - \frac{M_Q(x) \pm M_{Rj}(x) - P_j e_j(x)}{W(x)}, \qquad (3)$$

Здесь [1, 3]: $P_{i,j}$ - продольное толкающее (сжимающее), тянущее (растягивающее) усилие гидроцилиндра; $M_Q(x)$ - изгибающий момент от поперечной (вес гидроцилиндра) нагрузки; $M_{Ri,j}(x)$ - момент трения в опорных подшипниках гидроцилиндра, обусловленный кинематикой гидрофицированного привода машины и действием усилия $P_{i,j}$; $F(x)$ - площадь поперечного сечения штока; $W(x)$ - осевой момент сопротивления сечения штока; $y_T(x)$ - полный прогиб гидроцилиндра в результате его эксплуатационного продольно-поперечного нагружения; $e_{i,j}(x)$ - эксцентриситет приложения в опорах гидроцилиндра продольного сжимающего усилия $P_{i,j}$.

Так как в подавляющем большинстве случаев применения гидроцилиндров ДСМ $P_i > P_j$, понятно, что $|\sigma_{min}(x)| > |\sigma_{max}(x)|$, то есть цикл нагружения штоков является явно асимметричным с отрицательными средними напряжениями $\sigma_m(x)$, равными

$$\sigma_m(x) = \frac{\sigma_{max}(x) + \sigma_{min}(x)}{2}. \qquad (4)$$

Учитывая связь амплитудных напряжений $\sigma_a(x)$, характеризующихся зависимостью

$$\sigma_a = \frac{|\sigma_{max}(x)| + |\sigma_{min}(x)|}{2}, \qquad (5)$$

с пределом σ_{-1} выносливости и напряжениями $\sigma_{min}(x)$ и $\sigma_{max}(x)$, окончательно условие (1) безотказного состояния штока можно представить в виде

$$\sigma_i(x) = \sigma_a(x) + \varphi_s \sigma_m(x) \le [\sigma] = \frac{\sigma_{-1}}{k_{si}}, \qquad (6)$$

где: φ_s - коэффициент чувствительности материала штока к асимметрии; k_{si} - коэффициент запаса прочности. Для случая, когда напряжения $\sigma_a(x) < 0$, коэффициент φ_s следует полагать равным нулю, то есть выражение (6) с учётом формулы (5) запишется несколько проще

$$\frac{|\sigma_{max}(x)| + |\sigma_{min}(x)|}{2} \le \frac{\sigma_{-1}}{k_{si}}. \qquad (7)$$

Анализ зависимостей (2) и (3) показывает, что единственной переменной входящей в них величиной является полный прогиб $y_T(x)$ гидроцилиндра, а это означает, что напряжения сжатия $\sigma_{min}(x) = var$, а напряжения растяжения $\sigma_{max}(x) = const$. То есть, окончательно условие безотказного состояния гидроцилиндра может быть обозначено зависимостью

$$\sigma_i(x) = \left|\sigma_{\min}(x)\right| \le [\sigma]_i = \frac{2\sigma_{-1}}{k_{si}} - \sigma_{\max}(x). \quad (8)$$

Другими словами, в результате внешнего воздействия на гидроцилиндр и внутреннего функционального взаимодействия его элементов текущие эксплуатационные напряжения $\sigma_i(x)$ непостоянны во времени, а непрерывно возрастают, достигая, по мере накопления повреждений, предельных значений. В этом случае эволюция гидроцилиндра по несущей способности может быть проиллюстрирована (Рис. 1) функцией $\sigma_i(x) = f(t)$.

Эксплуатация гидроцилиндра начинается с напряжений $\sigma_1(x)$ и продолжается, как правило, до значения $[\sigma]_1$, за которым наступает параметрический, условный отказ [1]. Дальнейшее его применение сопряжено с риском возникновения полного, часто, явного отказа, возникающего за пределом прочности σ_{-1}, а посему допускаемый ресурс гидроцилиндра по напряжениям целесообразно ограничивать разностью $\{[\sigma]_1 - \sigma_1(x)\}$. Отсюда, в том случае, когда известна некоторая усреднённая скорость $d\sigma_i(x)/dt$ накопления напряжений $\sigma_i(x)$, несложно установить как допускаемый

$$t_{1-2} = \frac{[\sigma]_1 - \sigma_1(x)}{\dfrac{d\sigma_1(x)}{dt}}, \quad (9)$$

так и предельный срок службы гидроцилиндра

$$t_{1-3} = \frac{\sigma_{-1} - \sigma_1(x)}{\dfrac{d\sigma_1(x)}{dt}}. \quad (10)$$

Из всего вышесказанного следует, что модернизация гидроцилиндров в рассматриваемом направлении может иметь целью либо уменьшение исходных напряжений $\sigma_i(x)$ (Рис. 2a), либо увеличение допускаемых $[\sigma]_i$ (Рис. 2b), либо снижение скорости $d\sigma_j(x)/dt$ их накопления. В идеале же, целесообразно применение всех названных мероприятий в комплексе (Рис. 2c).

Причём, если первое и последнее предложения имеют своё конкретное инженерное приложение, то второе зачастую достигается повышением точности оценки коэффициента k_{si} запаса прочности штока гидроцилиндра при прочих известных условиях [5] для принятого уровня достоверности, например [2], по формуле

$$k_{si} = \frac{1}{1-\omega_{-1}^2\Lambda^2} + \sqrt{\left(\frac{1}{1-\omega_{-1}^2\Lambda^2}\right)\left[\left(\frac{1}{1-\omega_{-1}^2\Lambda^2}\right) - \left(1-\omega_a^2\Lambda^2\right)\right]} \quad (11)$$

при обязательном соблюдении условия

$$k_{si} > \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1} - \mu_{-1}\Lambda}. \quad (12)$$

Здесь: ω_{-1}, ω_a - соответственно коэффициенты вариации предела выносливости σ_{-1} и амплитудных напряжений $\sigma_a(x)$; Λ - квантиль нормального распределения; μ_{-1} - среднее квадратическое отклонение предела выносливости σ_{-1}.

Рассмотрим, в качестве примера, наиболее интересный вариант комплексной модернизации гидроцилиндра (Рис. 2, в), сравнивая его с исходным, базовым (Рис.1).

Итак, диапазон работоспособности по напряжениям в этом случае составляет $\{[\sigma]_2 — \sigma_2(x)\}$ Исходя из выражения (2), напряжения $\sigma_i(x)$ связаны с деформацией гидроцилиндра формулой

$$y_T(x) = \frac{y_\alpha(x) + y_\beta(x) + y_Q(x) \pm y_{Ri}(x) + y_S(x) + e_i(x)}{1 - \dfrac{P_i}{P_Э}} = \quad (13)$$

$$= \frac{\sigma_i(x)W(x)}{P_i} - \frac{W(x)}{F(x)} - \frac{M_Q(x) \pm M_{Ri}(x) + P_i e_i(x)}{P_i},$$

где $y_\alpha(x)$ — прогиб гидроцилиндра в результате угловой несоосности его основных элементов: штока и корпуса (гильзы), обусловленной наличием зазоров в его подвижных герметизируемых сопряжениях [8]; $y_\beta(x)$ — прогиб гидроцилиндра из-за возможного наличия у его длинномерных элементов начального технологического искривления, регламентируемого допусками на непрямолинейность изготовления этих элементов [9, 10]; $y_Q(x)$ — прогиб гидроцилиндра вследствие поперечного нагружения силой тяжести его элементов [11]; $y_{Ri}(x)$ — прогиб гидроцилиндра в результате фрикционного взаимодействия элементов опорных подшипников; $y_S(x)$ — динамический прогиб гидроцилиндра, обусловленный режимом торможения рабочего оборудования ДСМ; $P_Э$ — сила Эйлера [17], равная для нашего случая

$$P_Э = \frac{\pi^2 E I_{\min}}{(l_1 + l_2)^2}. \quad (14)$$

Здесь: E — модуль Юнга [17]; I_{min} — момент инерции сечения штока, а $(l_1 + l_2)$ — длина штока с поршнем [1].

Несомненно, все характеристики уравнения (13) за исключением прогиба $y_\alpha(x)$, кото-

рый увеличивается по мере изнашивания поршня и направляющей втулки, одинаковы при прочих равных условиях для обоих рассматриваемых вариантов и неизменны по мере эксплуатации гидроцилиндра.

Другими словами, вышеназванная переменная составляет

$$y_\alpha(x)=\left(1-\frac{P_i}{P_Э}\right)\left[\frac{\sigma_i(x)W(x)}{P_i}-\frac{W(x)}{F(x)}-\frac{M_Q(x)\pm M_{Ri}(x)+P_ie_i(x)}{P_i}\right]-$$
$$-\left[y_\beta(x)+y_Q(x)\pm y_{Ri}(x)+y_s(x)+e_i(x)\right].$$

(15)

Отсюда, диапазон работоспособности гидроцилиндра можно, через прогиб $y_?(x)$, представить разностью $[y_\alpha^{\cdot}(x)-y_\alpha^{\circ}(x)]$ конечного $y_\alpha^{\cdot}(x)$ и начального $y_\alpha^{\circ}(x)$ её значений

$$y_\alpha^{\circ}(x)=\left(1-\frac{P_i}{P_Э}\right)\left[\frac{\sigma_2(x)W(x)}{P_i}-\frac{W(x)}{F(x)}-\frac{M_Q(x)\pm M_{Ri}(x)+P_ie_i(x)}{P_i}\right]-$$
$$-\left[y_\beta(x)+y_Q(x)\pm y_{Ri}(x)+y_s(x)+e_i(x)\right];$$

(16)

$$y_\alpha^{\cdot}(x)=\left(1-\frac{P_i}{P_Э}\right)\left[\frac{[\sigma]_2W(x)}{P_i}-\frac{W(x)}{F(x)}-\frac{M_Q(x)\pm M_{Ri}(x)+P_ie_i(x)}{P_i}\right]-$$
$$-\left[y_\beta(x)+y_Q(x)\pm y_{Ri}(x)+y_s(x)+e_i(x)\right],$$

(17)

соответствующих напряжениям $\sigma_2(x)$ и $[\sigma]_2$.

Из источников [1, 8, 9] известна зависимость

$$y_\alpha(x)=x\sin\alpha_1\approx x\alpha_1, \qquad (18)$$

принимающая следующий вид для нашего примера:

$$y_\alpha^{\circ}(x)=xtg\alpha_1^{\circ}\approx x\alpha_1^{\circ}; \qquad (19)$$

$$y_\alpha^{\cdot}(x)=xtg\alpha_1^{\cdot}\approx x\alpha_1^{\cdot}. \qquad (20)$$

Здесь: x - абсцисса опасного сечения его штока (x = idem для сравниваемых случаев); α_1 - угол между осью штока и осью X, соединяющей центры опор крепления гидроцилиндра в системе координат XOY [1, 8-12, 16].

Установлено [12, 13], что угол α_1 связан с радиальными зазорами Δ_1 и Δ_2 соответственно в сопряжениях «поршень - гильза» и «шток - направляющая втулка» аппроксимирующей функцией

$$\alpha_1=k_\alpha m_1\frac{(\Delta_1+\Delta_2)}{\left[(l_1+l_2)-(l_0+z)\right]^n}. \qquad (21)$$

Выше: k_α и n - коэффициенты приближения [12]; m_1 - конструктивный параметр гидроцилиндра, характеризующий долю угла α_1 в полном угле α, равном $(\alpha_1+\alpha_2)$; 1_0 - геометрическая характеристика гидроцилиндра [1]; z - величина текущего (промежуточного) выдвижения штока, гидроцилиндра.

Тогда, с учётом выше предложенных рассуждений сначала запишем диапазон его работоспособности по деформациям

$$\left[y_\alpha^{\cdot}(x)-y_\alpha^{\circ}(x)\right]=x\left(\alpha_1^{\cdot}-\alpha_1^{\circ}\right)=$$
$$=xk_\alpha m_1\frac{\left(\Delta_1+\Delta_2\right)^{\cdot}-\left(\Delta_1+\Delta_2\right)^{\circ}}{\left[(l_1+l_2)-(l_0+z)\right]^n}= \qquad (22)$$
$$=xk_\alpha m_1\frac{\left(\Delta_Э^{\cdot}-\Delta_Э^{\circ}\right)}{\left[(l_1+l_2)-(l_0+z)\right]^n},$$

а затем окончательно - по зазорам

$$\left(\Delta_Э^{\cdot}-\Delta_Э^{\circ}\right)=\left[y_\alpha^{\cdot}(x)-y_\alpha^{\circ}(x)\right]\frac{\left[(l_1+l_2)-(l_0+z)\right]^n}{xk_\alpha m_1}. \qquad (23)$$

Выше: $\Delta_Э^{\cdot}$ и $\Delta_Э^{\circ}$ - эквивалентные зазоры, приведённые к наименее износостойкому сопряжению гидроцилиндра.

Использование последней записи при известной интенсивности изнашивания элементов сопряжений, в данном случае - интегральной линейной $I_{б,н}$ [7], для конкретных условий эксплуатации гидроцилиндра [14, 15] позволит аналитически представить ресурс $T_{рб,н}$ гидроцилиндра как традиционного (индекс «б»), так и перспективного (индекс «н») исполнений следующим образом

$$T_{рб,н}=\frac{\left(\Delta_Э^{\cdot}-\Delta_Э^{\circ}\right)_{б,н}}{I_{б,н}\left(\frac{z_W}{t_W}\right)}. \qquad (24)$$

В этой записи z_W - рабочее перемещение штока гидроцилиндра в течение периода t_W его эксплуатации. Примечательно, что для сравниваемых объектов должно соблюдаться условие $(z_W/t_W)=idem$. Тогда, как это видно из равенства (24), между известным базовым ресурсом $T_{рб}$ реального гидроцилиндра и искомым $T_{рн}$ перспективного существует соотношение с известным коэффициентом пропорциональности $k_{р1}$

$$\frac{T_{рн}}{T_{рб}}=\frac{\left(\Delta_Э^{\cdot}-\Delta_Э^{\circ}\right)_н}{\left(\Delta_Э^{\cdot}-\Delta_Э^{\circ}\right)_б}\cdot\frac{I_б}{I_н}=k_{р1}\frac{I_б}{I_н}. \qquad (25)$$

Здесь несложно видеть, что коэффициент $k_{р1}>1$.

Из работ [6, 7] известна следующая нелинейная взаимосвязь интенсивности изнашивания I и действующей в сопряжении нагрузки p_a с показателем степени $\alpha=1+\beta t=idem$ и

коэффициентом пропорциональности A = idem для обоих рассматриваемых случаев

$$I = Ap_a^{\alpha} = Ap_a^{1+\beta t}. \quad (26)$$

Учитывая эту зависимость, после несложных преобразований запишем формулу (25) несколько иначе

$$\frac{T_{рн}}{T_{рб}} = k_{p1}\frac{p_{аб}^{\alpha}}{p_{ан}^{\alpha}}. \quad (27)$$

Понятно, нагрузка p_a, характеризующая контактное давление элементов сопряжения, может быть представлена для сравниваемых вариантов в виде

$$p_{ан,б} = \frac{R_{н,б}}{F} \quad (28)$$

где: $R_{н,б}$ - реакции в наименее износостойком сопряжении гидроцилиндра; F - площадь пятна контакта элементов этого сопряжения [18]; F = idem для обоих случаев при прочих равных условиях. Стало быть, далее имеем

$$\frac{T_{рн}}{T_{рб}} = k_{p1}\frac{R_{б}^{\alpha}}{R_{н}^{\alpha}}. \quad (29)$$

В свою очередь, реакции $R_{б,н}$ описываются равенством [1]

$$R_{н,б} = P_i\frac{y_{Тб,н}(x)+e_i(x)}{(l_1+l_2)-(l_0+z)}, \quad (30)$$

в котором абсцисса x является координатой рассматриваемого сопряжения гидроцилиндра.

Отсюда запишем формулу (29) так

$$\frac{T_{рн}}{T_{рб}} = k_{p1}\frac{\left[y_{Тб}(x)+e_i(x)\right]^{\alpha}}{\left[y_{Тн}(x)+e_i(x)\right]^{\alpha}}. \quad (31)$$

Расписав прогиб $y_T(x)$ в соответствие с выражением (13) и выделив в нём переменную $y_\alpha(x)$, перепишем последнее уравнение иначе

$$\frac{T_{рн}}{T_{рб}} = k_{p1}\frac{\left[\dfrac{y_{аб}(x)+Y_T(x)}{1-\dfrac{P_i}{P_Э}}+e_i(x)\right]^{\alpha}}{\left[\dfrac{y_{ан}(x)+Y_T(x)}{1-\dfrac{P_i}{P_Э}}+e_i(x)\right]^{\alpha}}. \quad (32)$$

Здесь, как показано выше, промежуточная константа $Y_T(x)$ составляет

$$Y_T(x) = y_\beta(x)+y_Q(x)\pm y_{Ri}(x)+y_S(x)+e_i(x). \quad (33)$$

Принимая далее во внимание выражения (21) и (22), трансформируем равенство (32) следующим образом

$$\frac{T_{рн}}{T_{рб}} = k_{p1}\frac{\left[\dfrac{xk_\alpha m_1\dfrac{\Delta_{Эб}(t)}{\left[(l_1+l_2)-(l_0+z)\right]^n}+Y_T(x)}{1-\dfrac{P_i}{P_Э}}+e_i(x)\right]^{\alpha}}{\left[\dfrac{xk_\alpha m_1\dfrac{\Delta_{Эн}(t)}{\left[(l_1+l_2)-(l_0+z)\right]^n}+Y_T(x)}{1-\dfrac{P_i}{P_Э}}+e_i(x)\right]^{\alpha}} = k_{p1}k_{p2}. \quad (34)$$

Функция $\Delta_Э(t)$ в нём отражает характер увеличения эквивалентных зазоров $\Delta_{Эб,н}$ по мере эксплуатации гидроцилиндра (Рис.3)

$$\Delta_{Эб,н}(t) = a_{б,н}t^2 + b_{б,н}. \quad (35)$$

Ясно, что коэффициенты $a_{б,н}$ и $b_{б,н}$ определяются из условий:

- при $t = 0$, $\Delta_{Эб,н}(t) = \Delta^{\circ}_{Эб,н}$, $b_{б,н} = \Delta^{\circ}_{Эб,н}$;
- при $t = T_{рб,н}$, $\Delta_{Эб,н}(t) = \Delta^{\cdot}_{Эб,н}$,

$$a_{б,н} = \frac{\left(\Delta^{\cdot}_{Эб,н} - \Delta^{\circ}_{Эб,н}\right)}{T^2_{рб,н}}.$$

Коэффициент k_{p2}, определяемый из условия $T_{рн} = T_{рб}$ при $t = t_1$, после ряда преобразований описывается следующей функцией

$$k_{p1} = \frac{\left[xk_\alpha m_1\dfrac{\Delta^{\cdot}_{Эб}}{\left[(l_1+l_2)-(l_0+z)\right]^n}+Y_T(x)+e_i(x)\left(1-\dfrac{P_i}{P_Э}\right)\right]^{\alpha}}{\left[xk_\alpha m_1\dfrac{\Delta^{\cdot}_{Эн}}{\left[(l_1+l_2)-(l_0+z)\right]^n}+Y_T(x)+e_i(x)\left(1-\dfrac{P_i}{P_Э}\right)\right]^{\alpha}}. \quad (36)$$

Естественно предположить, что ресурс $T_{рн}$ работоспособности перспективного гидроцилиндра больше известного ресурса $T_{рб}$ базового и составляет

$$T_{рн} = T_{рб}k_{p1}k_{p2}^{\alpha}. \quad (37)$$

В заключение, развивая это положение, надо отметить, что экономический эффект $Э_р$ достигается в нашем случае за счёт снижения количества $n_{б,н}$ необходимых ТО и Р в конкретный расчётный период эксплуатации гидроцилиндра

$$Э_р = (n_б - n_н)C_р = \left(\frac{T_Э}{T_{рб}} - \frac{T_Э}{T_{рн}}\right)C_р, \quad (38)$$

где: $C_р$ - стоимость одного ТО и Р гидроцилиндра; $T_Э$ - расчётный период эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Кобзов Д. Ю. Диагностирование гидроцилиндров рабочего оборудования одноковшовых строительных экскаваторов: Дисс. ... к.т.н./ ЛИСИ, Л., 1987.-345 с.
2. Сырицын Т. А. Надёжность гидро- и пневмопривода. -М.: Машиностроение, 1981.-216 с.
3. Мамаев Л. А., Кобзов Д. Ю., Калашников Л. А. и др. Оказание технической помощи по совершенствованию гидроцилиндров рабочего оборудования одноковшовых строительных экскаваторов: Отчёт о НИР; ГР 01900052221, ИН 02900039190/Братск. индустр. ин-т, Братск, 1990.-81 с.
4. Любошиц М. И., Ицкович Г. М. Справочник по сопротивлению материалов. - 2-е изд. испр. и доп.-Минск: Высшая школа, 1969.-464 с.
5. Кобзов Д.Ю. Создание методики исследования нагрузочного режима гидроцилиндров СДМ//Повышение надёжности гидропривода СДМ: Отчёт о НИР; ГР 01910054187, ИН 02920009233/Братск. индустр. ин-т, Братск, 1991. С. 15-20.
6. Зорин В.А. Основы долговечности строительных и дорожных машин.- М.: Машиностроение, 1986.-248 с.
7. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В.С. Основы расчётов на трение и износ.-М., Машиностроение, 1977.-526 с.
8. Кобзов Д.Ю., Решетников Л. Л. Влияние зазоров в сопряжениях гидроцилиндра на величину его полного прогиба. Деп. в ЦНИИТЭстроймаш №49-сд87, Л., 1987.-10 с.
9. Кобзов Д.Ю., Решетников Л. Л. Учёт возможного начального искривления гидроцилиндра при исследовании его напряжённо-деформированного состояния. Деп. в ЦНИИТЭстроймаш №29-сд87, Л.,1987.-8 с.
10. Кобзов Д. Ю., Войтов В. Г. Анализ вариантов, учёта возможного начального искривления длинномерных элементов гидроцилиндров. Деп. в МАШМИР, №47-сд92, 1992.-17 с.
11. Кобзов Д.Ю., Решетников Л. Л. Влияние несоосности элементов гидроцилиндра на его нагрузочную способность. Деп. в ЦНИИТЭстроймаш, №21-сд87, 1987.-25 с.
12. Кобзов Д. Ю., Губанов В, Г., Калинка В. Р. О локализации повреждений направляющих гидроцилиндра. Деп. в МАШМИР №51-сд92,1992.-6 с.
13. Алексеенко П. Д., Кобзов Д.Ю., Губанов В. Г. и др. Способ измерения зазоров. А. с. СССР №1467374.
14. Кобзов Д.Ю., Сергеев А.П. О характеристиках пространственного расположения гидроцилиндров рабочего оборудования одноковшовых строительных экскаваторов//Повышение эффективности машин и вибрационные процессы в строительстве: Сб. тр./Ярослав, политех. ин-т, Ярославль, 1989. С. 95-100.
15. Кобзов Д.Ю., Головатюк В. В. Показатели режима работы гидроцилиндров строительных машин. Деп. в МАШМИР №2-сд94, 1994.-7 с.
16. Кобзов Д.Ю., Решетников Л.Л. Методика поиска предельных значений диагностических параметров нагрузочной способности гидроцилиндров//Повышение эффективности использования машин в строительстве: Сб. тр./ЛИСИ, Л., 1987. С. 118-120.
17. Писаренко Г. С, Яковлев А. П., Матвеев В. В. Справочник по сопротивлению материалов. Отв. ред. Писаренко Г.С- 2-е изд., перераб. и доп.- Киев: «Наукова думка», 1988.-736 с.
18. Schusztes M., Rohrich M. Theoretische untersuchungen zur schadensfrunerkennung on hydraulischen arbeitszylinder//Hebiznege und Fordermittel, Berlin, 1984, November, Nr.24. pp. 332-334.

Засядко А.А., Насников Д.Н.

УДК 532.54:62.752

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ АКТИВНОЙ ВИБРОЗАЩИТНОЙ СИСТЕМЫ

В практических реализациях активных виброзащитных систем электрогидравлические исполнительные механизмы получили наибольшее распространение [1-3] и используются в системах вибрационной защиты операторов транспортных систем, а также в вибрационных технологических машинах. Теоретические исследования электрогидравлических систем основываются на предварительном изучении особенности активной виброзащитной системы, составлении системы дифференциальных уравнений движения, построении передаточных функций, оценке динамических свойств при различных видах обратных связей [4]. Вместе с тем, многие особенности работы виброзащитных систем нуждаются в экспериментальной проверке.

Опытная установка была собрана и проходила экспериментальную проверку на кафедре теоретической механики Иркутского государственного технического университета [4-6].

Принципиальная схема экспериментальной установки активной виброзащитной системы представлена на рис. 1. Объектом защиты является однородный диск массой *M*. Его перемещение, вызванное движением основания системы, компенсируется активным элементом (2), выполненным на основе электрогидравлического сервомеханизма. Входной информацией дополнительной активной связи является перемещение объекта, которое фиксируется датчиком (3) абсолютного перемещения, состоящим из тензоэлементов, запитываемых напряжением постоянного тока, вырабатываемым тензоусилителем (5). При смещении объекта от среднего положения (при котором пластина не нагружена) в металлической балочке, один конец которой закреплен неподвижно, возникают напряжения, с одной стороны, сжимающие, с другой — растягивающие тензоэлементы. За счет разности омического сопротивления тензоэлементов на выходе дифференциальной схемы появляется напряжение, величина которого пропорциональна смещению, объекта, а знак соответствует направлению смещения от нейтрального положения.

Датчик относительного перемещения (4) объекта и основания выполнен аналогично. Коэффициент усиления датчика определяется длиной консоли пластины и коэффициентом передачи тензоусилителя. В качестве устройства формирования закона управления (6) применена аналоговая электронная моделирующая установка (ЭМУ), операционные усилители которой выполняют также роль первого каскада усиления сигналов рассогласования показаний датчиков абсолютного и относительного отклонений. Аналоговая машина позволяет путем коммутирования операционных усилителей набирать необходимый вид корректирующих цепей с нужными параметрами и дает возможность менять не только алгоритм формирования сигнала управления, но и величину коэффициента

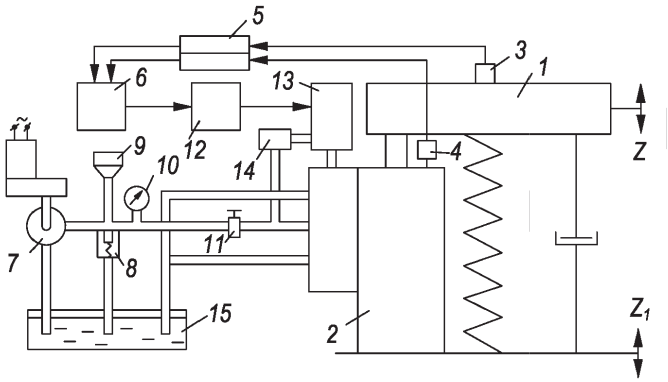


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки электрогидравлической виброзащитной системы.

усиления и постоянные времени цепи обратной активной связи.

Жидкость в гидробаке находится под атмосферным давлением и поступает в гидромагистраль под действием разряжения, создаваемого насосом (7). Параметры регулятора насоса находятся в таком соответствии с параметрами переливного клапана, которое характерно и присуще насосу постоянной производительности. Переливной клапан (8) поддерживает в магистрали давление не ниже 120 атм. Гидровоздушный аккумулятор давления (9) восполняет потери давления в системе и смягчает значительные по величине колебательные и ударные волны гидрожидкости. Совокупность переливного клапана и гидроаккумулятора поддерживает на входе в золотниковый механизм постоянное давление. Тем самым обеспечивается предположение о постоянстве давления питания исполнительного гидродвигателя, которое контролируется манометром (10). При закрытии крана (II) прекращается поступление рабочей жидкости в электрогидравлический сервомеханизм (2). Гидропровод выполнен на основе резинометаллических шлангов, суммарная длина которых составляет 3,4 м [5,6].

Объект массой $M=7$ кг. установлен на упругом элементе жесткостью $k_0 = 7\,\frac{кг}{см}$ при помощи жестких элементов корпус гидроцилиндра через корпус сервомеханизма соединен с возмущающим основанием, а шток его поршня - с объектом зашиты. Работа сервомеханизма [4] как такового основана на электрогидравлическом принципе и описана в работах [1,2]. Сигнал рассогласования, поступающий от устройства формирования закона управлений, принимается электрическим блоком, который представляет собой поляризованное реле. Реле через соответствующие узлы и детали воздействует на гидравлическую часть, которая приводит в движение исполнительный шток, жестко связанный с объектом. Сервомеханизм состоит из корпуса электромагнитного поляризованного реле золотникового механизма с иглой, электромагнитного клапана, исполнительного гидроусилителя и двух редукционных, клапанов. При помощи цапф корпус сервомеханизма крепится к пластине силовой конструкции, передающей активное усилие на основание системы.

Направление движения золотника совпадает с направлением движения иглы. При перемещении золотника средние буртики его прикрывают отверстия в гильзе, соединенные с двумя каналами, в результате чего в одну из полостей исполнительного гидроусилителя подводится жидкость под давлением, а из другой — вытесняется в сливную магистраль. Регулировочные винты позволяют изменять количество жидкости, идущей на слив, обеспечивая тем самым возможность выравнивания скоростей движения исполнительного штока внутрь и наружу. При автоматическом управлении катушки электромагнитного клапана находятся под током, и крышка клапана закрывает соединительные каналы. При выходе из строя автоматики якорь реле под действием пружин возвратится в среднее положение и переместит рычаг с иглой и золотник в нейтральное положение.

В гидросистеме используется рабочая жидкость АМГ-10, её расход при максимальной скорости при Р = 0 не превышает 5,5 л/мин. Крутизна скоростной характеристики составляет 5 $\frac{мм \,/\, сек}{ма}$, а ход исполнительного штока около 40 мм с максимальной скоростью 50 мм/сек при зоне нечувствительности не более 0,5 ма.

Источником кинематического возмущения является электромеханический виброударный стенд. Амплитуда возмущения устанавливается величиной эксцентриситета сменного кулачка стенда. Частота возмущения определяется скоростью вращения кулачка. Для моделирования переходных процессов устанавливается ударный кулачок с резким изменением профиля, при этом свободное движение системы происходит в течение времени одного оборота кулачка. В противном случае при большой скорости возмущающих импульсов необходимо выключать стенд немедленно после, «сброса» стола стенда с кулачка.

Градуировка частоты возмущения произведена на пульте управления виброударным стендом. Диапазон изменения частот составляет от 0,05 Гц до 10 Гц. Суммирующее устройство, воспринимающее сигналы датчиков и выдающее их рассогласование, подаваемое на устройство формирования закона управления и включено после первого каскада усиления — тензометрического усилителя постоянного тока. Для пропорционального закона управления на ЭМУ при помощи операционных усилителей набрана схема (рис. 2.), имеющая коэффициент передачи 100, при

$R_1 = 1$ *Ом*, $R_2 = 0{,}1$ *Ом*. Выходное управляющее напряжение рассогласования поступает на электронный осциллограф.

Для апериодического закона управления при помощи операционных усилителей набирается схема, представленная на рис. 3. В данном случае коэффициент усиления обратной связи имеет вид

$$k_{ос} = \frac{1}{R_2 C}\left(C = 1\ мкФ,\ R_2 = 1\ Ом\right),$$

$$k_{ос} = 10\ или\ k_{ос} = 100\ \left(C = 1\ мкФ, R = 0{,}1\ Ом\right)$$

с коэффициентом передачи

$$k = \frac{k_1}{T},\ где\ T = \frac{1}{k_{ос}} = 0{,}1\ или\ 0{,}01,\ k_1 = \frac{R_1}{R_2} = 10.$$

Движение объекта защиты при замкнутой системе фиксировалось на шлейфовом осциллографе, по сигналам датчика абсолютного перемещения, который подключался к системе после тензоусилителя параллельно. При помощи трехдекадного переключателя на аналоговой моделирующей установке производилось изменение коэффициента добротности системы, т.е. общего коэффициента передачи всех элементов, включенных в дополнительную активную цепь обратной связи. При этом коэффициенты передач всех звеньев системы, исключая ЭМУ, были установлены такой величины, что при переключении трехдекадного преобразователя в крайнее положение ($R_{пр} = 0$), в системе наблюдался автоколебательный режим движения (или потеря устойчивости в виде колебательной границы).

Соответствующие динамические характеристики системы определялись для трех значений добротности при максимальном коэффициенте передачи $k_{эму_1}^{\max} = 100 (R_{пр} = 0)$, $k_{эму_2} = 0{,}7 k_{эму}^{\max}$, $k_{эму_3} = 0{,}35 k_{эму}^{\max}$, а для апериодического закона управления, кроме того, для двух различных постоянных времени $T_1 = 0{,}1$, $T_2 = 0{,}01$, соизмеримых по величине с постоянной времени игольчатого гидроусилителя.

I. Реакции активной виброзащитной системы определялись для гармонического закона возмущающих воздействий при отрицательной обратной связи с пропорциональным и апериодическим законами управления при их различных параметрах. На рис. 4. и рис. 5. приведены амплитудно-частотные характеристики замкнутой системы для пропорционального закона управления. Штриховыми линиями показаны расчетные зависимости.

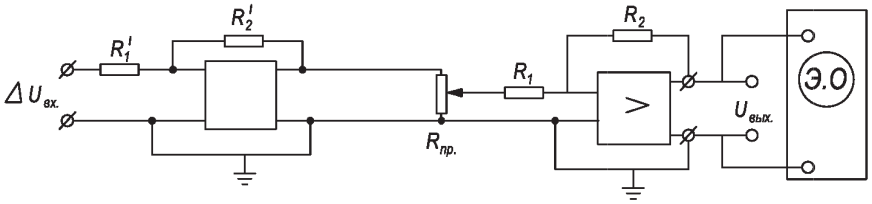


Рис. 2. Схема усиления сигнала для дифференциального закона управления.

Приведенные графики показывают, что по характеру амплитудно-частотных зависимостей активная виброзащитная система на основе следящего гидропривода близко соответствует выбранной расчетной модели. Наибольшее совпадение наблюдается в области низких частот. Резонансные частоты, определенные опытным и расчетным путем, также совпадают (в пределах 2-3%).

При незначительных по величине частотах сдвиг фазы между входной амплитудой возмущения и выходной амплитудой движения объекта близок к 90°. По мере повышения частоты сдвиг фаз изменяется и в пределе стремится к нулю. В области высоких частот пропускание сигналов хуже за счет наличия запаздывания в системе по сравнению с идеальным типовым дифференцирующим звеном. В определенной степени происходит своеобразное запирание активного элемента и воздействие со стороны основания почти «жестко» передает возмущение объекту за счёт закритического демпфирования и очень большой жесткости гидрожидкости в полостях исполнительного устройства.

Характеристики, приведенные для различных коэффициентов добротности систе-

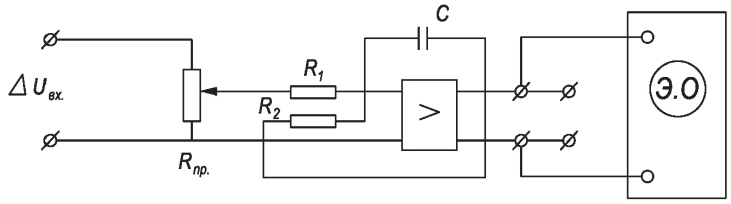


Рис. 3. Схема усиления сигнала для апериодического закона управления.

мы, значительно отличаются. Чем выше коэффициент передачи всех элементов дополнительной обратном связи (или корректирующего устройства), тем до более значительных частот сохраняется сдвиг фаз в 90°. Причем это изменение происходит менее интенсивно при более значительных величинах добротности. При критическом коэффициенте усиления система находится на границе устойчивости. При возмущениях, незначительных по частоте и величине, сохраняется устойчивость движения в несколько большей мере, а далее система впадает в автоколебательный режим, причем со значительной амплитудой движения.

Характеристики, приведенные на рис. 4. а,б, отличаются различными по величине амплитудами возмущающих воздействий. Характеристики указывают на влияние величины амплитуды входного сигнала. По мере приближения амплитуды возмущения к амплитуде автоколебаний системы на границе устойчивости (≈ 0,2 см) энергичнее происходит увеличение коэффициента передачи амплитуд колебаний. Так, в случае (рис. 4. а), $A_{вх} = 0{,}12$ см, например, для $\omega = 8$, сдвиг фаз более 90°, а при $A_{вх} = 0{,}05$ см. сдвиг фаз менее 90°. Зависимость выходных координат системы от величины входных указывает на нелинейность процессов виброизоляции [7].

Экспериментальные исследования активной виброзащитной системы показывают, что при синусоидальных воздействиях на входе — движение объекта защиты близко к синусоидальному, а автоколебания системы вблизи границы устойчивости совершаются примерно по синусоиде. Эти выводы подтверждаются типовыми осциллограммами перемещений объекта, приведенными на рис. 5. На рис. 6. приведены амплитудно-частотные характеристики разомкнутой системы для пропорционального закона управления. Данные зависимости были получены при подаче синусоидальных колебаний от генератора, включаемого в цепь сигналов датчика, вместо усилителя (5) (см.рис. 1). Частотный диапазон пропускания управляющих воздействий возрастает при увеличении коэффициента усиления разомкнутой цепи системы. При этом выходные амплитуды для малых частот также значительно возрастают.

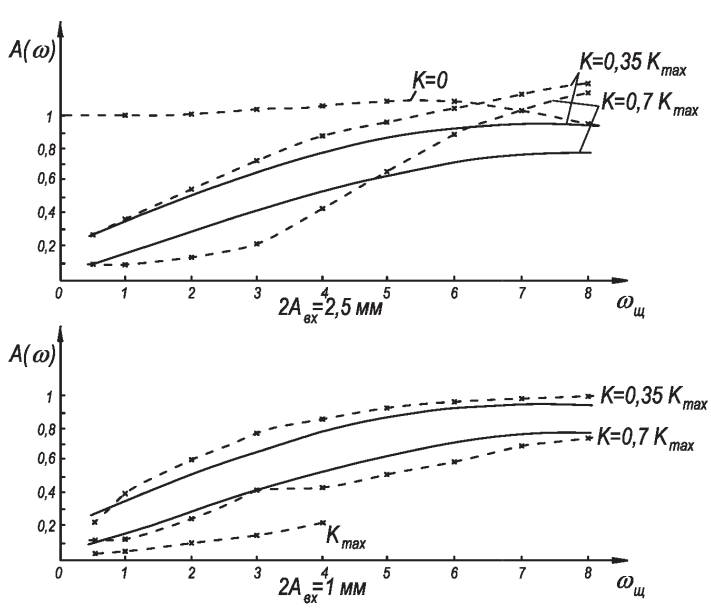


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики замкнутой системы для пропорционального закона управления при разных значениях амплитуды входного воздействия: а) $A_{вх}$ = 1,25 мм; б) $A_{вх}$ = 0,5 мм.

Активная виброзащитная система является нелинейной и динамические характеристики её существенно зависят не только от параметров линейной передаточной функции, но и от нелинейностей, таких как сухое трение в золотнике и силовом поршне, ограничение расхода (проводимости) гидромагистрали или питающего насоса.

Однако влияние упомянутых нелинейностей реализуется по-разному, в зависимости от величины и частоты (скорости) управляющего сигнала. Первый вид нелинейностей проявляется в виде зоны нечувствительности и запаздывания. Так, при очень малых возмущающих амплитудах коэффициент передачи колебании (при малых частотах) меньше, чем для больших возмущающих воздействий, сдвиг фаз ликвидируется значительно энергичнее. Это может быть вызвано тем, что управляющие воздействия становятся соизмеримыми с величиной зоны нечувствительности. Во втором случае - ограничение скорости проявляется при значительных по величине и скорости сигналах управления, которые не могут быть отработаны исполнительным гидромеханизмом. Действительно, при довольно значительных входных возмущениях (>4,0мм) и больших частотах зона эффективной работы активной системы сужается.

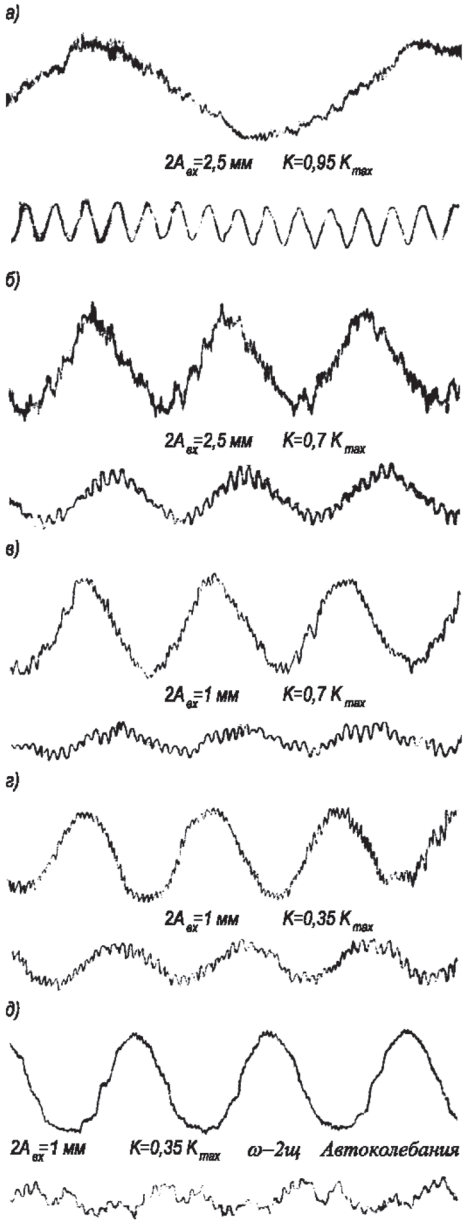


Рис. 5. Осциллограммы установившихся движений объекта защиты при пропорциональном законе управления активной обратной связи при частоте ω = 5 Гц.

При уменьшении возмущений до определенной величины качество виброзащиты повышается, увеличивается значение предельной частоты отработки. Кроме того, при эксперименте наблюдаются нелинейные эффекты, вызванные «насыщением» операционных усилителей аналоговой моделирующей установки при больших управляющих сигналах. Они проявляются также в более быстрой ликвидации сдвига фаз между движением основания и объекта.

Амплитудно-частотные характеристики замкнутой системы для апериодического закона управления при амплитуде возмущающего воздействия 0,05 см и 0,12 см приведены соответственно на рис. 7, а,б при различных постоянных времени Т = 0,1 (кривые а) и Т = 0,01 (кривые б).

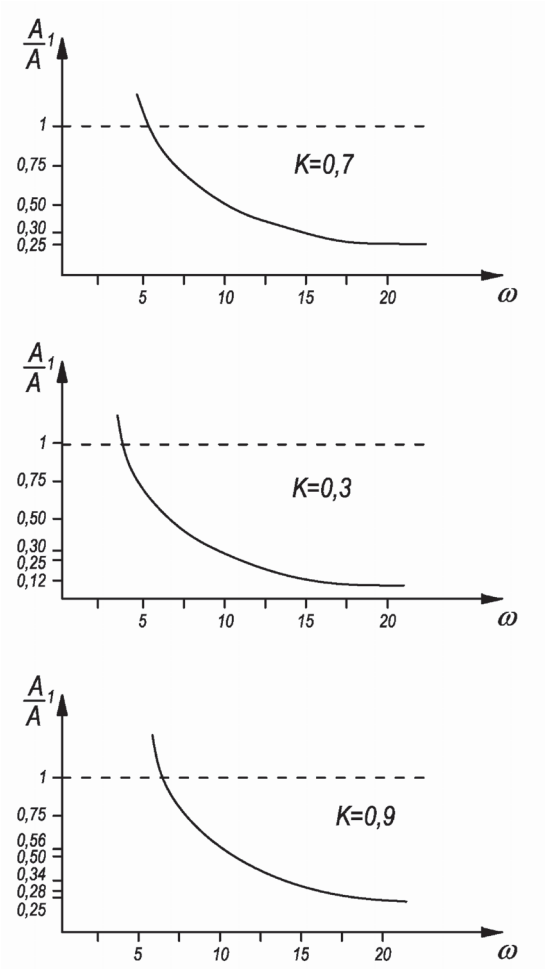


Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики разомкнутой системы управления при прапорциональном управлении и разных коэффициентах усиления *K*.

Сравнив характеристики системы при пропорциональном управлении (рис. 4, а) и апериодическом (рис. 7, а) (при $2A_{вх} = 2{,}5$ мм) управлении, можно сделать вывод, что в целом динамические процессы остались неизменными. Точно также при незначительных по величине частотах сдвиг фазы между входной амплитудой возмущения и выходной близок к 90°. По мере повышения частоты этот сдвиг уменьшается, причем более быстро, по сравнению с пропорциональным законом. Следовательно, влияние увеличения постоянной времени аналогично уменьшению коэффициента добротности для пропорционального закона управления, при прочих равных условиях. Влияние же уменьшения коэффициента

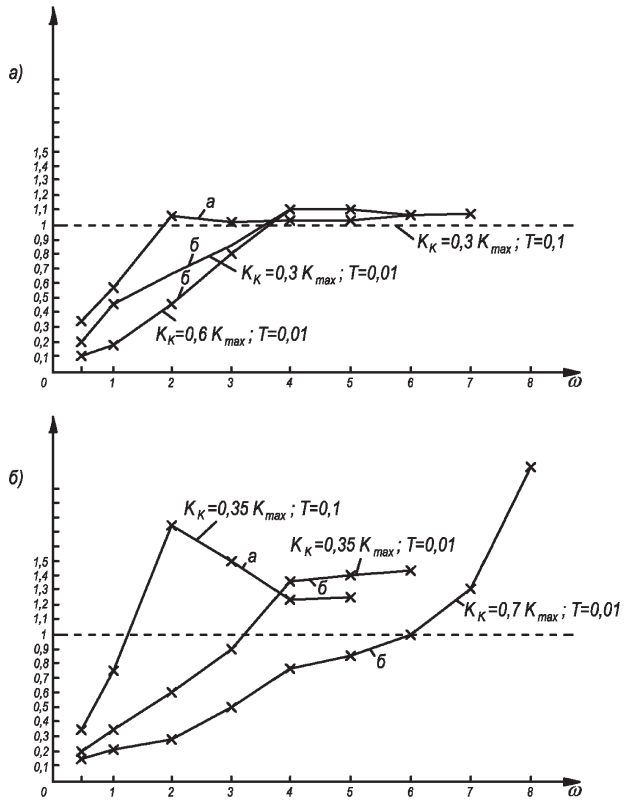


Рис. 7. Экспериментальные АЧХ макета электрогидравлической виброзащитной системы для апериодического закона управления: а) при $2A_{вх} = 2{,}5$ мм, б) $2A_{вх} = 1$ мм

передачи *k* для апериодического управления аналогично увеличению постоянной времени.

При критическом коэффициенте усиления системы, меньшем по величине, в сравнении с пропорциональным, наблюдается колебательная граница устойчивости.

Следовательно, увеличение запаздывания в системе не позволяет по причине потери устойчивости добиваться значительных коэффициентов добротности, а значит и большей эффективности виброзащиты. Характеристики, приведенные на рис. 7, а,б, отличаются величиной входной возмущающей амплитуды.

С увеличением коэффициента добротности (при малых Т) резонансные амплитуды движений объекта по величине возрастают и наблюдаются на больших частотах возмущения. В данном случае модель активной виброзащитной системы в виде реально дифференцирующего звена не соответствует динамике реального устройства.

Если для пропорционального и апериодического законов управления активной виброзащиты для больших по величинам возмущений соответствовала электрическая схема - модель в виде *R - C* цепи (рис. 8, а), то для малых перемещений основания системе соответствует резонансная LCR-цепь (рис. 8, б) с собственной частотой $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$.

Очевидно, причиной этому явлению служит нелинейность ограничения расхода жидкости через золотник при значительных по величине возмущающих амплитудах.

II. Реакция системы на возмущение, действующее в течение короткого промежутка времени (значительного меньшего, чем длительность переходного процесса), позволяет определять важные динамические свойства системы. На рис. 8. приведены типовые осциллограммы на ударные воздействия для пропорционального и апериодического законов управления.

Испытания проводились на ударном электромеханическом стенде. Кулачок со специально профилированной поверхностью, вращаясь плавно, поднимает стол с установленной на нем системой, а затем сбрасывает его на жесткие резиновые подушки. При этом активный элемент сначала отслеживает подъем стола, сохраняя неизменным положение объекта в пространстве, а затем в соответствие с динамическими характеристиками системы отрабатывает импульсное возмущающее воздействие таким образом, чтобы вернуть объект в прежнее исходное положение.

В момент приложения импульсного воздействия, как можно заметить из приведенных графиков, проявляется существенная нелинейность в виде зоны нечувствительности системы. Так, при малой постоянной времени обратной дополнительной связи объект пада-

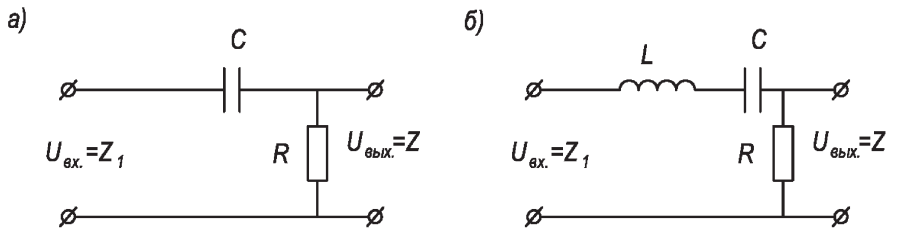


Рис. 8. Схемы для реализации управления для больших (а) и для малых перемещениях основания (б)

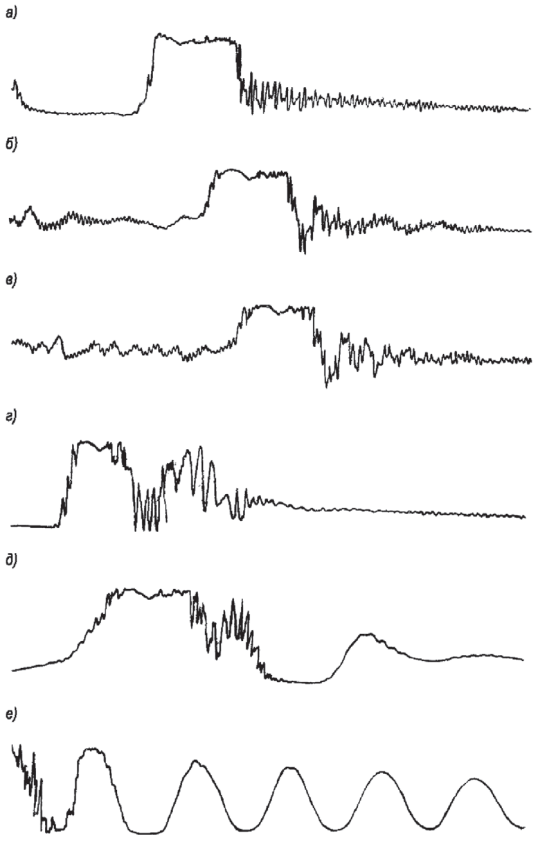


Рис. 9. Осциллограммы движения объекта при ударных воздействиях со стороны основания: а) пропорциональный закон управления $k = 0{,}3$**; б)** $k = 0{,}7$**; в)** $k = 0{,}9$**; г) апериодический закон управления** $k = 0{,}35$, $T = 0{,}02$**; д)** $k = 0{,}35$, $T = 0{,}1$**; е)** $k = 0{,}7$, $T = 0{,}1$**. Затухание вблизи колебательной границы устойчивости**

ет вместе со столом стенда, поскольку исполнительный элемент не успевает отслеживать возмущение из-за зоны нечувствительности. На осциллограмах присутствует высокочастотная составляющая, наложенная на основной тон, присущая тензометрическим датчикам из-за близости собственных колебаний их основания крепления к возмущающим частотам.

Высокочастотные составляющие в некоторой степени определяются также собственными колебаниями подвижных частей электро-гидравлического усилителя и золотника.

Пропорциональный закон позволяет быстрее за счет высококолебательного переходного процесса вывести объект в прежнее положение (рис. 9, *а,б,в*).

При апериодическом законе в большей мере (рис. 9, *г,д*) проявляется инерционность передачи сигналов рассогласования, причем, чем зна-чительнее величина постоянной времени Т, тем большее время необходимо для окончания переходного процесса и тем сильнее начальные выбросы объекта при его сходящихся колебаниях.

При увеличении коэффициента усиления дополнительной обратной связи (рис. 4) качество переходного процесса улучшается.

При критических коэффициентах передачи системы (рис. 9, *е*) наблюдался сходящийся колебательный переходный процесс. Это соответствует небольшому запасу устойчивости: система близка к колебательной границе, при которой она теряет устойчивость.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Чупраков Ю.И. Гидравлические системы защиты человека-оператора от общей вибрации. Москва. Машиностроение, 1987. - 224с.
2. Елисеев С.В. Вопросы методики проектирования активной электрогидравлической системы виброизоляции кресла пилота самолета / С.В. Елисеев, А.Н. Самбарова, В.Д. Шпрах // Механика и процессы управления. Иркутский политехнический институт: сб.ст. Иркутск, 1975. - С.27-41.
3. Баландин О.А. Вибрации вертолетов и борьба с ними / О.А. Баландин, С.В. Елисевв // Теория активных сиброзащитных систем: сб.ст. Иркутский политехнический институт. - Иркутск, 1975. - Вып3. ч1.- С.77-111.
4. Засядко А.А. Электрогидравлические виброзащитные системы / А.А. Засядко // Современные технологии. Ситемный анализ. Моделирование. Иркутск, 2007. - №2(14). - С.16-24.
5. А.С. S40081 СССР, МКИ A1F16F5/100. Двухкаскадное устройство для гашения вибраций / С.В. Елисеев, В.В. Ольков, А.И. Перелыгин, А.А. Засядко. Заявитель Иркутский политехнический институт. №2094461/28. заяв.23.01.75; опубл.25.12.76. Бюл. №47.
6. А.с. №800462 СССР, AI F16F15/06. Способ демпфирования колебаний длинномерных консолей / Н.К. Кузнецов, А.В. Лукьянов, А.А. Засядко. Опубл.30.01.81. Бюл. №1.
7. Засядко А.А. Особенности гидропривода в системах активной вибрационной защиты / Засядко А.А., Насников Д.Н. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - Иркутск. ИрГУПС (Спецвыпуск). - 2008. - С. 18-30.

Данеев А.В., Русанов В.А., Удилов Т.В., Шарпинский Д.Ю. УДК 517.926

К МЕТОДАМ ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ФРОНТА ЛЕСНОГО ПОЖАРА*

Защита лесов от пожаров – это важная эколого-экономическая задача, в рамках которой большое место отводится решению вопросов текущего краткосрочного прогнозирования [1][1] распространения фронта возникшего *локального лесного пожара* (ЛЛП; [2,3]). При этом фактор (см. [4]) изменения режима состояния физической среды в зоне действия ЛЛП обуславливает постановку моделирования динамики контура ЛЛП, как слабоструктурированной динамической системы (*D*-системы), «адаптирующейся» к данным нестационарным режимам на основе структурно-параметрической идентификации нелинейной дифференциальной модели состояния фронта ЛЛП.

Для того чтобы придать предыдущей мотивирующей посылке надлежащую строгость, необходимо дать формальное определение *D*-системы.

Определение 1 [5]. *D-система – это упорядоченная тройка* $\{T, W, \Omega\} =: \Sigma$, *в которой* T – *множество моментов времени,* W – *множество алфавита сигналов,* Ω – *поведение D-системы (семейство процессов* $\omega: T \to W$, *совместимых с динамикой* Σ*).*

Пусть $t_0 < t_1$, $T := [t_0, t_1]$ – отрезок числовой прямой R и пусть

$$\Pi_{ACLL} := \Pi_{ACL} \times L_2(T, R^q) := AC(T, R^n) \times \times L_2(T, R^m) \times L_2(T, R^q),$$

где AC, L_2 – стандартные функциональные пространства, соответственно, абсолютно непрерывных вектор-функций и классов эквивалентности интегрируемых по Бохнеру [6] на T вектор-функций с L_2 – *нормой*. Далее, выделим к рассмотрению непрерывные *D*-системы с алфавитом сигналов R^{n+m} и траекториями из Π_{ACL}, а так же векторно-матричные квазилинейные дифференциальные уравнения вида

$$dx(t)/dt = A(t)x(t) + B(t)u(t) + B^{\#}(t)u^{\#}(x(t)), \quad (t \in T) \tag{1}$$

где $x(\cdot) \in AC(T, R^n)$ – решение Каратеодори (*K*-решение) [6, с. 214], $u(\cdot) \in L_2(T, R^m)$ и $u^{\#}(x(\cdot)) \in L_2(T, R^q)$ – управления, соответственно, *программное* и *позиционное*,

$$(A(\cdot), B(\cdot), B^{\#}(\cdot)) \in L_2(T, L(R^n, R^n)) \times \times L_2(T, L(R^m, R^n)) \times L_2(T, L(R^q, R^n)),$$

а $L(R^k, R^n)(k = n, m, q)$ – пространство с операторной нормой всех матриц, действующих из R^k в R^n. Примем соглашение, что допускается выражение: «*пара* $(x(\cdot), u(\cdot)) \in \Pi_{ACL}$ – *есть K-решение системы (1)*», если $(x(\cdot), u(\cdot), u^{\#}(x(\cdot))) \in \Pi_{ACLL}$ почти всюду удовлетворяет (1) для тройки операторов

$$(A(\cdot), B(\cdot), B^{\#}(\cdot)) \in L_2(T, L(R^n, R^n)) \times \times L_2(T, L(R^m, R^n)) \times L_2(T, L(R^q, R^n)),$$

которую будем называть $(A, B, B^{\#})$ - архитектурой или, равносильно, $(A, B, B^{\#})$ - моделью дифференциальной системы (1).

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 05-01-00623) и Программы фундаментальных исследований № 22 Президиума РАН (проект № 2.5).

[1] Цель краткосрочного прогнозирования: построение оперативных прогнозных карт, характеризующих пожарную обстановку на территории каждого структурного подразделения авиационной и наземной лесоохраны. В настоящее время большой объём информации для решения этой задачи поступает от космических центров дистанционного зондирования; на территории СНГ развёрнуты и функционируют более 15 таких центров [1].

Тезис Л. Льюнга о том, что «множество моделей-кандидатов устанавливается посредством фиксации той группы моделей, в пределах которой мы собираемся искать наиболее подходящую» [7, с. 20], может быть постулирован как определение 2.

Определение 2 [5]. *Непустой фиксированный класс позиционных законов управления* $U_{A,q} := \left\{ u_\alpha : u_\alpha = col\left(u_{\alpha 1}, \ldots, u_{\alpha q} \right) \right\}_{\alpha \in A}$, *A – нумерация законов, такой, что*

$$u^{\#} \in U_{A,q} \Rightarrow u^{\#}\left(x(\cdot) \right) \in L_2\left(T, R^q \right),$$
$$x(\cdot) \in AC\left(T, R^n \right)$$

назовём структурным классификатором и скажем, что поведение $P \subset E \subset \Pi_{ACL}$ *D -системы* $\left\{ T, R^{n+m}, E \right\}$ *согласовано с* $U_{A,q}$ *структурой обыкновенной квазилинейно дифференциальной совместимости (ОКД –* $U_{A,q}$*-совместимости), если существует дифференциальная система (1) с* $u^{\#} \in U_{A,q}$ *такая, что P удовлетворяет классу её K-решений.*

Особенностью математической постановки апостериорного моделирования уравнений дифференциальной динамики фронта ЛЛП в рамках определения 2 является непреложный физический факт – поведение *P*, характеризующее ЛЛП как *D*-систему, представлено одной парой «*траектория – x, управление – u*». Последнее обстоятельство обуславливает постановку задачи по уточнению результатов [2,3] в условиях когда математическая трактовка *P* приводит к *нелинейной D-системе*. Здесь необходимо отметить, что в [5] остался не решённым один из главных методологических вопросов: на основании каких эмпирических «соображений» можно формировать состав позиционных законов (проводить гипотезирование – выдвижение структурных гипотез $u^{\#}$) в структурном классификаторе (согласно определения 2), когда в качестве вектора состояния $x(t)$ модели динамики ЛЛП выступает вектор геометрических характеристик его контура, поддающихся апостериорным наблюдениям на интервале времени *T* за процессом распространения ЛЛП (предполагаемый результат текущего космомониторинга [1]); данный вектор имеет следующие фазовые координаты [4]:

$x_1(t)$ – текущее приращение на интервале *T* площади ЛЛП;

$x_2(t)$ – текущее приращение на интервале *T* длины периметра ЛЛП;

$x_i(t)$ – текущие приращения на интервале *T* удалений от заданной точки из зоны действия ЛЛП до кромки фронта пожара в направлениях выделенных пожароопасных объектов $i\ (i = 3, \ldots, n)$.

К переменным вектора возмущений $u(t)$, влияющих на динамику ЛЛП, отнесены следующие пирофорные и метеорологические факторы в зоне пожара:

$u_1(t)$ – фактор активности тлеющих продуктов пиролиза в контуре ЛЛП;

$u_2(t)$ – скорость ветра в зоне действия ЛЛП;

$u_3(t)$ – количество атмосферных осадков (естественных и искусственных, включая «эффект» распыляемых порошков), выпавших в зоне действия ЛЛП;

$u_j(t)$ – другие факторы воздействия на процесс динамики ЛЛП $(j = 4, \ldots, m)$.

Все перечисленные факторы понуждают рассматривать задачи структурного обоснования математической модели уравнений динамики вектора состояния нестационарного фронта распространения ЛЛП, описываемых в классе квазилинейных дифференциальных систем (1), а так же идентификации её параметров и текущего прогноза распространения контура ЛЛП единым взаимоувязанным комплексом в контексте их программно-алгоритмического представления в интерактивной среде некоторого решателя системных задач (РСЗ).

1. Реализация квазилинейных дифференциальных моделей. Энтропийный подход в гипотезировании структурных законов

Многообразие способов, которыми с помощью РСЗ можно определить структуру уравнений состояния *D*-системы ставит вопрос выбора среди них тех, которые оптимальны с точки зрения некоторого формального критерия, характеризующего определённое структурное качество её динамики. Трудность состоит в том, что на этот вопрос нет однозначного ответа. Выбор той или иной точки зрения зависит не только от природы переменных состояния *D*-системы, но и от целей исследования, от того, каким образом заданы ограничения, являются данные полными или нет, и от других факторов, в частности, связанных с контекстом исследования. И вряд ли может вызвать сомнение то методологическое положение, что для апостериорного моделирова-

ния структуры *D*-системы в среде некоторого РСЗ характерно проведение «креативного» поиска (поиска приемлемой модельной структуры, поиска представительной модели в рамках принятой структуры и т.д.). По существу данный процесс моделирования *D*-системы, является интерактивным, когда прежде, чем сформировать приемлемую модель, несколько вариантов приходится, перебрав, отбросить. И этот процесс не может быть полностью автоматизирован, поскольку решения, принимаемые проектировщиком, всегда будут переплетены как с формальными выкладками и строгими численными расчётами, так и эвристическими предположениями, связанными с контекстом моделирования. Таким образом, в целях достижения достаточной эффективности процесса структурно-параметрической идентификации (СПИ) объекта исследования, необходимо этот процесс осуществлять в диалоге – рис. 1.

Недавние достижения в кибернетике, информатике и, в частности, так называемом искусственном интеллекте вызвали появление новых средств математического моделирования наблюдаемых физических процессов, для которых можно выделить следующие типовые составляющие РСЗ у перспективных объектно-ориентированных интеллектуальных систем для нужд задач СПИ:

а) обработка измерений (фильтрация, ин-

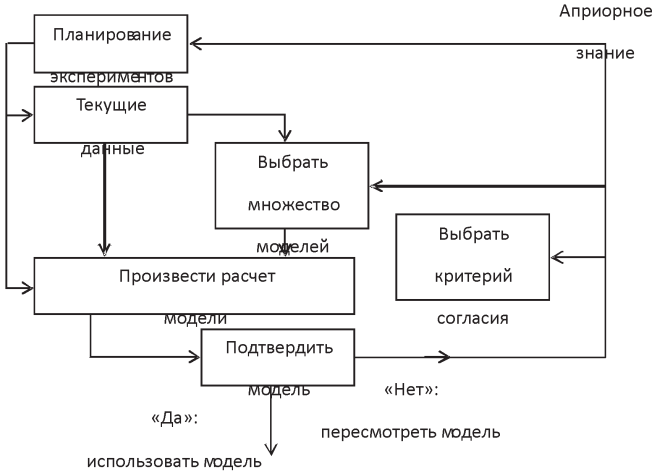


Рис 1. Схема апостериорного моделирования *D*-системы.

терполяция, экстраполяция);

б) непараметрическая идентификация операторного представления модели (расчёт корреляций, спектров, быстрого преобразования Фурье);

в) структурно-параметрическая идентификация дифференциальной модели;

г) отображение свойств модели (имитационное моделирование динамики);

д) процедуры подтверждения модели (анализ прогностических качеств).

В диалоговом процессе решения задач СПИ, может совершаться много интерактивных переходов между программными средствами пунктов *а*)-*д*) и практически необходимо, чтобы вопросы замены и проверки различных дифференциальных модельных структур *D*-систем, решались по возможности математически оптимально и вычислительно просто. Поэтому особый интерес представляют технологии автоматизации (на основе экспертных систем) субъективных компонент, связанных с принятием логических решений в СПИ.

Будучи всегда неточен, результат математического моделирования структуры и параметров дифференциальных уравнений состояния *D*-системы может содержать даже в явной аналитической форме «следы недомоделированной динамики». Например, в них могут оставаться неизвестные члены, именуемые постоянно действующими возмущениями, в отношении которых для исследования могут делаться априорные предположения малости (в среднем, интегрально или в каждый момент времени). Аналогично, понятия адаптивности [8], робастности [9] и другие также используются при учете немоделируемой динамики путём получения недостающей информации о реальной модели *D*-системы на этапе обучения или в режиме реального времени. С другой стороны, экспертные системы, нейронные сети, или методы автоматического гипотезирования и обучения, а также другие технологические средства искусственного интеллекта позволяют более успешно справляться с неполнотой информации [10].

Однако прежде чем создавать алгоритмы для получения «субоптимальных» приближённых апостериорных моделей динамики контура ЛЛП, представляется разумным построить реализацию точных моделей, поскольку для решения задачи приближённого моделирования необходимо знание тонкого строения *D*- системы. Для непрерывных *D*-систем последнее было получено в [5] в аналитической форме *принципа максимума энтропии* (теорема 2 [5]). Коррективом этого принципа (в постановке: $\{(x,u)\}$ – наблюдае-

мый процесс, $x \in AC\left(T, R^n\right)$ – траектория D-системы, $u \in L_2\left(T, R^m\right)$ – программное управление, $U_{A,q}$ – структурный классификатор, Ψ – энтропийный оператор Релея-Ритца (3.1) [5]) выступает теорема 1.

Теорема 1. *ОКД* $-U_{A,q}$*-совместимость динамического процесса* $\left(x(\cdot), u(\cdot)\right)$ *равносильна положению:*

$$\exists u^{\#}(x) \in U_{A,q} : \Psi\left(x, u, u^{\#}(x)\right) \therefore \in L_2(T, R), \quad (2)$$

где

$$\Psi\left(x, u, u^{\#}(x)\right)(t) :=$$

$$:= \begin{cases} \left\| dx/dt \right\|_{R^n} / \left\| \left(x(t)\right), u(t), u^{\#}\left(x(t)\right) \right\|_{R^{n+m+q}}, \\ если u\left(x(t)\right), u(t), u^{\#}\left(x(t)\right) \neq 0; \\ 0, если u\left(x(t)\right), u(t), u^{\#}\left(x(t)\right) = 0 \in R^{n+m+q} \end{cases} \quad (3)$$

(доказательство очевидно в силу теоремы 2 [5] и соотношений (3.2) [5]).

Ясно, что, если компоненты вектор-функций $x(\cdot)$, $u(\cdot)$ и закона $u^{\#}\left(x(\cdot)\right)$ представлены достаточно простой комбинацией некоторых элементарных функций от t, то алгоритм проверки условия $\Psi\left(x, u, u^{\#}(x)\right) \in L_2(T, R)$ можно реализовать с помощью специально организованной (согласно формулы (3)) процедуры символьных вычислений [11]. При этом в случае положительного решения (для ответа на вопрос: имеет ли место условие (2)[5], возникает задача построения «оптимального» (эта «оптимальность», как понятие естественно требует формального уточнения [12]) функционально-параметрического представления $\left(A, B, B^{\#}\right)$-модели, реализующей в классе систем (1) динамический процесс $\left(x(\cdot), u(\cdot)\right)$, поскольку данная модель *всегда* (!) не является единственной. Если предположить, что такая оптимальная $\left(A, B, B^{\#}\right)$-модель существует, то для её «конкретизации» (вычисления) остаётся воспользоваться хорошо разработанной алгоритмической технологией спектрально-параметрической идентификации [13].

Итак, допустим, что ЛЛП как наблюдаемый динамический процесс $\left(x(\cdot), u(\cdot)\right)$ с законом $u^{\#}(x) \in U_{A,q}$ обладает свойством *ОКД* $-U_{A,q}$ -совместимости (теорема 1).

Теорема 2. *Для процесса* $\left(x(t), u(t), u^{\#}\left(x(t)\right)\right)$, $t \in T$ *реализующая его* $\left(A, B, B^{\#}\right)$*-модель*

$$\left(A(t), B(t), B^{\#}(t)\right) = \left(\left[a_{ij}(t)\right], \left[b_{ij}(t)\right], \left[b_{ij}^{\#}(t)\right]\right),$$ *и удовлетворяющая условию оптимальности её нормы вида:*

$$\min \left(\begin{array}{l} \Sigma_{1 \le i \le n} \Sigma_{1 \le j \le n} \int_T a_{ij}^2(t) dt + \Sigma_{1 \le i \le n} \Sigma_{1 \le j \le n} \times \\ \times \int_T b_{ij}^2(t) dt + \Sigma_{1 \le i \le n} \Sigma_{1 \le j \le n} \int_T b_{ij}^{\#^2}(t) dt \end{array} \right)^{1/2},$$

существует, при этом она единственна и имеет реализацию:

$$\left[A(t), B(t), B^{\#}(t)\right] = \omega_d(t) \left[\omega(t)\right]^{\star},$$

где $\omega(t) := col\left(x(t), u(t), u^{\#}\left(x(t)\right)\right)$,

$$\omega_d(t) := \left(< \omega(t), \omega(t) >_{R^{n+m+q}} \right)^{-1},$$

$$col\left(dx_1(t)/dt, \ldots, dx_n(t)/dt\right)$$

$< \cdot, \cdot >_{R^{n+m+q}}$ $\cdot$ *– скалярное произведение в* R^{n+m+q}, * *– операция транспонирования (доказательство* – модификация теоремы 10 [14]).

Теперь обратим свой интерес к точному моделированию *стационарных* моделей (1) (т.е.

$$\left(A, B, B^{\#}\right) \in L_2\left(T, L\left(R^n, R^n\right)\right) \times$$

$$\times L_2\left(T, L\left(R^m, R^n\right)\right) \times L_2\left(T, L\left(R^q, R^n\right)\right)$$

в силу их совершенно очевидной значимости[2]). С этой целью введём в рассмотрение следующие вспомогательные конструкции: $f(t) := t \mapsto col\left(\int_{Tt} \omega(\tau) d\tau\right)$, $T_t := \left[t_0, t\right] \subset T$, где $\omega(t)$ – вектор-функция из теоремы 2 и пусть Δ, $\Delta_i \left(1 \le i \le n\right)$ – определители Грама [15, с. 213], где Δ – определитель для системы функций $\left\{f_j \mid 1 \le j \le n+m+q\right\}$, где $col\left(f_j\right)_{1 \le j \le n+m+q} = f$ и Δ_i – для системы $\left\{x_i - x_i\left(t_0\right), f_j \mid 1 \le j \le n+m+q\right\}$, где $col\left(x_i\right)_{1 \le i \le n+m+q} = x$.

Теорема 3. *ОКД* $-\left\{u^{\#}(x)\right\}$ *-совместимость процесса* $\left(x(\cdot), u(\cdot)\right)$, *реализуемого единственной стационарной* $\left(A, B, B^{\#}\right)$*-моделью, равносильна следующему условию:*

[2] Бесспорная важность в задачах математического моделирования роли стационарных моделей определяется их инвариантностью к текущему времени, что, несомненно, ставит этот класс моделей в особое положение в решении задач прогнозирования исследуемых динамических процессов.

$\Delta_i = 0, i = 1,\ldots,n, \Delta \neq 0$ *(доказательство* – компиляция теорем 2 [2] и 1 [5]).

Конечно, от теорем 1-3 не следует ждать слишком многого в том случае, если структурный классификатор $U_{A,q}$ слабо приспособлен (годен) к предметной области моделируемых физических явлений (в нашем случае к динамике геометрии ЛЛП). Поэтому ниже будет намечена одна из достаточно общих методологий, которая может лежать в основе формальных процедур эмпирического моделирования структурных гипотез для состава классификатора $U_{A,q}$, предназначенного для моделирования стационарных динамических объектов (1).

Первый шаг в этом направлении состоит в том, что стационарную дифференциальную систему (1) приведём к следующему эквивалентному виду:

$$dx(t)/dt = Ax(t) + Bu(t) + \sum_{1 \le j \le q} u_j^{\#}(x(t)) b_j^{\#}, \quad (4)$$

где $b_j^{\#}$ – вектор-столбцы матрицы $B^{\#} \in L\left(R^q, R^n\right)$ и $u_j^{\#}(x)$ – компоненты позиционного закона (структурной гипотезы) $u^{\#}(x)$, $t \in T$. Далее, введём в рассмотрение закон программного управления $u^{\star}(t) := col\left(u(t), 1\right)$ и матрицы $B_k \in L\left(R^{m+1}, R^n\right), 1 \le k \le q+1$, определяемые соотношениями:

$B_1 := [B, 0]$, где *0* – нулевой вектор столбец в R^n;

$B_k := \left[0, b_{k-1}^{\#}\right]$, $2 \le k \le q+1$, где *0* – нулевая матрица в $L\left(R^m, R^n\right)$.

В такой трактовке система (4) преобразуется к линейной системе вида:

$$dx(t)/dt = Ax(t) + B^{\star}(t)u^{\star}(t),$$

где $B^{\star}(t) = B_1 + \sum_{2 \le k \le q+1} u_{k-1}^{\#}(x(t)) B_k$.

Таким образом, по существу можно получить модифицированную функционально-алгебраическую структуру (2) [2].

В такой математической постановке, а так же, воспользовавшись аналитическим результатом теоремы 1 и теоремы 3 [16], получаем следующее необходимое условие для синтеза (гипотезирования) структурной гипотезы $u^{\#}(x)$.

Теорема 4. *Пусть* $\Psi^{\star}$ *и* $\Psi_i{}^{\star}$ *– операторы Релея-Ритца вида:*

$$\Psi^{*}\left(x, u^{*}\right)(t) :=$$

$$:= \begin{cases} \left\| dx(t)/dt \right\|_{R^n} / \left\| \left(x(t)\right), u^{*}(t) \right\|_{R^{n+m+1}}, \\ \left(x(t)\right), u(t) \neq 0 \in R^{n+m}; \\ 0, \left(x(t)\right), u(t) = 0 \in R^{n+m+1}, \end{cases}$$

$$\Psi_i{}^{*}\left(x, u^{*}\right)(t) :=$$

$$:= \begin{cases} \left\| dx_i(t)/dt \right\| / \left\| \left(x(t)\right), u^{*}(t) \right\|_{R^{n+m+1}}, \\ \left(x(t)\right), u(t) \neq 0 \in R^{n+m}; \\ 0, \left(x(t)\right), u(t) = 0 \in R^{n+m}, \end{cases}$$

Тогда для ОКД – $\left\{u^{\#}(x)\right\}$ *-совместимости апостериорного динамического процесса* $\left(x(\cdot), u^{\star}(\cdot)\right)$ *в классе стационарных дифференциальных систем (4) необходимо, выполнение следующих функциональных неравенств:*

$$\begin{aligned} &\Psi^{\star}\left(\left(x, u^{\star}\right)\right) \le_L c_{1,0} + \sum_{2 \le k \le q+1} c_{k,0} \left| u_{k-1}^{\#} \right|, \\ &\Psi_1{}^{\star}\left(\left(x, u^{\star}\right)\right) \le_L c_{1,1} + \sum_{2 \le k \le q+1} c_{k,1} \left| u_{k-1}^{\#} \right|, \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ &\Psi_n{}^{\star}\left(\left(x, u^{\star}\right)\right) \le_L c_{1,n} + \sum_{2 \le k \le q+1} c_{k,n} \left| u_{k-1}^{\#} \right|, \end{aligned} \quad (5)$$

для некоторых чисел $c_{k,i} \ge 0, 1 \le k \le q+1, 0 \le i \le n$; здесь $\le_L$ – квазиупорядочение в пространстве вещественных измеримых функций на *T*, такое, что $\varphi_1 \le_L \varphi_2$, когда $\varphi_1(t) \le \varphi_2(t)$ почти всюду в *T*.

В итоге теорема 4 позволяет сформулировать следующей *эвристический**) подход при выдвижении структурных гипотез в процессе апостериорного моделирования динамических объектов (4): *поиск законов* $u^{\#}(x)$ *может осуществляться на основе соотношений (5), из которых в некоторых (возможно одном) отношение квазиупорядочения* $\le_L$ *заменено на отношение равенства* $=$.

Очевидно, что предложенный эвристический подход хорошо «коррелирует» с парадигмой *приближённого* моделирования. При этом надо отметить, что, поскольку в устройстве операторов $\Psi^{\star}$ и $\Psi_i{}^{\star}$ векторные нормы $\|\cdot\|_{R^n}$ и $\|\cdot\|_{R^{n+m+1}}$ допускают произвольную аналитическую форму, то на практике процесс принятия решений для функциональных неравенств (5) может (и должен) проводиться при различном представлении этих норм [17, с. 180].

В качестве иллюстрации данной методики гипотезирования структурных законов в моделировании уравнений динамики класса (4) рассмотрим конструкцию примера 2 [5] (попутно раскроем «секрет технологии» в принятие решений при выборе в данном примере структурного классификатора ($U_{1,1} = \left\{ x^{1/2} \right\}$).

Пример. Пусть $T = [0,1]$, $n = m = 1$, $x(t) = t^2$, $u(t) = 0$. В такой постановке операторы Релея-Ритца Ψ^*, Ψ_i^* (теорема 4) совпадают. Далее, в качестве нормы $\|\cdot\|_{R^{n+m+1}}$, $n = m = 1$, возьмём $\max(|y_i| 1 \le i \le 3)$, $col(y_1, y_2, y_3) \in R^3$. Тогда (в силу (5)) соотношение $\Psi^*((x, u^*)) = c_{1,0} + \sum_{2 \le k \le q+1} c_{k,0} |u^{\#}_{k-1}|$, $c_k \ge 0$, $1 \le k \le q+1$ при $q = 1$ равносильно $2t = \alpha + \beta |u^{\#}(x(t))|$, $\alpha, \beta \ge 0$. Ясно, что с $\alpha = 0$, $\beta = 2$ будет иметь место $x^{1/2}(t) = t = u^{\#}(x)$, откуда получаем гипотезу на структурный закон $u^{\#}(x) \equiv x^{1/2}$. (Обоснование $ОКД - \left\{ x^{1/2} \right\}$-совместимости процесса (x, u) см. в примере 2 [5]).

2. Гипотезирование структурных законов на основе процесса ортогонализации Грама-Шмидта с применением метода дифференциальной аппроксимации

Если кратко выстроить «хронологическую канву» в цепи последовательности «алгоритмических шагов» принимаемых РСЗ решений (см. рис. 1) предлагаемого ниже процесса гипотезирования структурных гипотез в классе стационарных $(A, B, B^{\#})$ - моделей (1) (и, в частности, при разработке дифференциальных краткопрогностических моделей развития контура локального лесного пожара), то, по существу, эту условную последовательность методологически можно разделить на два процедурно независимых этапа:

– выявление вектор-функции $h(\cdot)$ в разложении $dx(\cdot)/dt = \varphi(\cdot) + h(\cdot)$, «отвечающей» за нарушение гипотезы линейности системы (1) (Этап I);

– синтез позиционного закона $u^{\#}(x(\cdot))$ на основе апостериорной информации о траектории $x(\cdot)$ и построенной на Этапе I вектор-функции $h(\cdot)$ (Этап II).

Этап I. Поскольку характеризацией структуры линейности системы (1) для пары $(x(\cdot), u(\cdot))$ является положение, когда

$dx_i(\cdot)/dt \in Span\{x_i(\cdot), u_j(\cdot): i = 1,\dots,n; j = 1,\dots,m\}$, $\forall_i = 1,\dots,n$,

то в разложении $dx(\cdot)/dt = \varphi(\cdot) + h(\cdot)$ (если гипотеза линейности для $(x(\cdot), u(\cdot))$ нарушена) вполне естественно считать, что компоненты $h_i(\cdot)$, $i = 1,\dots,n$ и $\varphi_i(\cdot)$, $i = 1,\dots,n$, соответственно вектор-функций $h(\cdot)$ и $\varphi(\cdot)$, удовлетворяют следующему геометрическому условию

$dx_i(\cdot)/dt \notin Span\{x_i(\cdot), u_j(\cdot): i = 1,\dots,n; j = 1,\dots,m\} \Rightarrow$

$\Rightarrow h_i(\cdot) \perp Span\{x_i(\cdot), u_j(\cdot): i = 1,\dots,n; j = 1,\dots,m\}$,

$\varphi_i(\cdot) \perp Span\{x_i(\cdot), u_j(\cdot): i = 1,\dots,n; j = 1,\dots,m\}$;

здесь $\perp$ – отношение ортогональности в пространстве $L_2(T, R)$ [18, с. 121].

Такая математическая постановка приводит к очевидному заключению, что для нахождения вектор-функции $h(\cdot)$ можно обратиться к хорошо известному процессу ортогонализации Грама-Шмидта [18, с. 130], который можно осуществить в два алгоритмических шага.

Первый шаг:

$$y_1 = x_1, \qquad z_1 = y_1 < y_1, y_1 >^{-1/2} y_1,$$

$$y_2 = x_2 - \langle x_2, z_1 \rangle z_1, \qquad z_2 = y_2 < y_2, y_2 >^{-1/2} y_2,$$

$$\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots$$

$$y_n = x_n - \sum_{j=1,\dots,n-1} \langle x_n, z_j \rangle z_j \qquad z_n = y_n < y_n, y_n >^{-1/2} y_n,$$

$$y_{n+1} = u_1 - \sum_{j=1,\dots,n-1} \langle u_1, z_j \rangle z_j$$

$$z_{n+1} = y_{n+1} < y_{n+1}, y_{n+1} >^{-1/2} y_{n+1},$$

$$y_{n+2} = u_2 - \sum_{j=1,\dots,n-1} \langle u_2, z_j \rangle z_j$$

$$z_{n+2} = y_{n+2} < y_{n+2}, y_{n+2} >^{-1/2} y_{n+2},$$

$$\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots$$

$$y_{n+m} = u_m - \sum_{j=1,\dots,n-1} \langle u_m, z_j \rangle z_j$$

$$z_{n+m} = y_{n+m} < y_{n+m}, y_{n+m} >^{-1/2} y_{n+m},$$

где символ $\langle , \rangle$ означает «интегральную» операцию скалярного произведения в гильбертовом пространстве $L_2(T, R)$, при этом предполагается, что, если имеет место $y_i = 0$, то соответственно принимаем $z_j = 0$.

По индукции легко установить, что каждая функция $z_i(\cdot)$, $i = 1,\dots,n+m$ является линейной комбинацией функций из $Span\{x_i(\cdot), u_j(\cdot): i = 1,\dots,n; j = 1,\dots,m\}$ и, обратно, каждый вектор из $Span\{x_i(\cdot), u_j(\cdot): i = 1,\dots,n; j = 1,\dots,m\}$ есть линейная комбинация векторов $z_i(\cdot)$, $i = 1,\dots,n+m$. Поэтому линейные подпространства, натянутые на системы функциональных векторов $\{x_i(\cdot), u_j(\cdot): i = 1,\dots,n; j = 1,\dots,m\}$ и $\{z_i(\cdot), i = 1,\dots,n; j = 1,\dots,m\}$, очевидно, совпадают.

Второй шаг:

$$\varphi_1 = \sum_{j=1,\dots,n+m} \langle dx_1 / dt, z_j \rangle z_j,$$

.....

$$\varphi_n = \sum_{j=1,\dots,n+m} \langle dx_n / dt, z_j \rangle z_j,$$

что приводит к

$$\begin{aligned} h_1 &= dx_1 / dt - \sum_{j=1,\dots,n+m} \langle dx_1 / dt, z_j \rangle z_j \\ &\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ h_n &= dx_n / dt - \sum_{j=1,\dots,n+m} \langle dx_n / dt, z_j \rangle z_j \end{aligned} \qquad (6)$$

Этап II. Поскольку изменения переменных вектора состояния $x(t)$ носят кусочно-монотонный характер (в частности, переменные состояния контура ЛЛП, очевидно, монотонны на всём интервале времени T), то для синтеза позиционного закона $u^{\#}(x(t))$ естественно использовать методы монотонной аппроксимации [19, с. 212]; и, таким образом, далее остаётся только вычислить параметры матричной $(A,B,B^{\#})$-модели в дифференциальной динамики исследуемого объекта в классе стационарных систем типа (1).

Пусть $r \in R^k$, $k = n^2 + nm + nq$ — вектор оцениваемых параметров стационарной дифференциальной модели (1) (т.е. элементов матриц $A \in L(R^n, R^n)$, $B \in L(R^n, R^n)$, $B^{\#} \in L(R^q, R^n)$). Для идентификации вектора r по *a posteriori* предъявленной функциональной паре «*траектория, управление*» -

$$((x(\cdot), u(\cdot))) \in AC(T, R^n) \times L_2(T, R^m)$$

рассмотрим, так называемый, метод дифференциальной аппроксимации, векторно-матричное описание которого имеется, например, в [20] (в [20, с. 392] замечено, что этот метод можно рассматривать как прямое обобщение корреляционных алгоритмов). Суть данного метода параметрической идентификации системы дифференциальных уравнений состояния моделируемого динамического объекта составляет следующая математическая задача:

$$\min_r \Phi(r),$$

$$\Phi(r) := $$

$$:= \int_T \left\| dx(t)/dt - Ax(t) - Bu(t) - B^{\#} u^{\#}(x(t)) \right\|_{R^{n^2}} dt$$

, $\|\cdot\|_{R^n}$ - евклидова норма в R^n.

Необходимое условие минимума, а именно – $grad_r \Phi(r) = 0 \in R^k$ ($grad_r$ – градиент по r), будет иметь вид матричного равенства

$$2\int_T grad_r \begin{pmatrix} [dx(t)/dt]^{\star} \\ {}^{\star}[Ax(t) + Bu(t) + B^{\#} u^{\#}(x(t))] \end{pmatrix} dt =$$

$$= \int_T grad_r \begin{pmatrix} [(Ax(t) + Bu(t) + B^{\#} u^{\#}(x(t)))]^{\star} \\ {}^{\star}[Ax(t) + Bu(t) + B^{\#} u^{\#}(x(t))] \end{pmatrix} dt.$$

Опуская рутинные промежуточные вычисления относительно параметрического вектора r, обеспечивающего выполнение $\min_r \Phi(r)$, приходим (в силу последнего равенства) к следующему матричному соотношению

$$\begin{aligned} &[A, B, B^{\#}] = \\ &= \int_T col(dx(t)/dt)[col(x(t), u(t), u^{\#}(t))]^{\star} dt \times \\ &\times \begin{bmatrix} \int_t col(x(t), u(t), u^{\#}(t)) \times \\ \times [col(x(t), u(t), u^{\#}(t))]^{\star} dt \end{bmatrix}^{-1}, \end{aligned} \qquad (7)$$

этот метод идентификации параметров дифференциальной системы по существу известен [20, с. 392] как «*метод производных*».

Заключение

Приближённое моделирование заключается в следовании принципу, что искомая оптимальная модель является просто самой точной моделью в пределах заданного допустимого уровня сложности[3]), или наименее сложной моделью, которая аппроксимирует наблюдаемые данные с точностью до заданного допустимого несогласования. Как отмечено в п. 1, в этой парадигме математического моделирования *D*-системы сначала должна рассматриваться проблема точного представления модели уравнений ее динамики, поскольку для продвижения в вопросе ее приближённого апостериорного построения совершенно необходимо обладать хорошим пониманием теории точного моделирования и подходящим математическим словарём, делающим эту теорию полезной. Поэтому, первой задачей было уточнение (материал п. 1) развитого в [5] «точного языка $(A,B,B^{\#})$-моделей»

[3] Идея формализации рассмотрений сложности модели в теории идентификации систем исследовалась в [21]. Соображение, что алгоритмы идентификации имеют (обязательно) интерпретацию на языке оптимальной аппроксимации, является основным и с точки зрения, выдвинутой Л. Льюнгом [7].

для его привлечения к вопросам аппроксимации уравнений динамики исследуемой *D*-системы в варианте, когда наблюдается одна пара вектор-функций (x,u) (характерный случай в апостериорном моделировании динамики ЛЛП). Итогом этого уточнения стало выдвижение специального эвристического подхода, основанного на интерактивном поиске необходимых условий энтропийного синтеза (5) для гипотез структуры уравнений динамики *D*-системы. Другой предложенный подход (материал п. 2) это по существу аналитическая модификация метода дифференциальной аппроксимации (алгоритм (7)) с применением процедуры ортогонализации Грама-Шмидта (алгоритм (6)) для синтеза нелинейных позиционных законов в процессе гипотезирования сложной структуры дифференциальных уравнений для вектора состояния слабоструктурированной апостериорно заданной *D*-системы.

Все теоретические результаты, полученные в пп. 1, 2, носят конструктивный характер и доведены до численных алгоритмов и сопровождающих их программ; структурное описание этой программно-алгоритмической среды (обеспечивающей схему принятия решений согласно рис. 1) с анализом имитационного моделирования ЛЛП – предмет рассмотрений второй части работы.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. *Абушенко Н.А., Алтынцев Д.А., Антонов В.Н., и др.* Спутниковый мониторинг лесных пожаров в России. Итоги. Проблемы. Перспективы. – Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 2003. – 135 с.
2. *Файзрахманов Г.П., Данеев А.В., Русанов В.А.* Построение динамической модели лесного пожара на основе апостериорной информации // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2005. – № 1. – С. 72-76.
3. *Русанов В.А., Данеев А.В., Шарпинский Д.Ю., Файзрахманов Г.П.* Апостериорное моделирование динамики распространения лесного пожара на основе данных космомониторинга // Труды SICPRO'06 (ISBN 5-201-14984-7). V Международная конференция «Идентификация систем и задачи управления». Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. Москва. 2006. – С. 1486-1494.
4. *Удилов Т.В., Шарпинский Д.Ю.* Обсуждение апостериорной дифференциальной модели распространения лесного пожара // Вестник Восточно-Сибирского института МВД России. 2007. – № 4 – С. 66-73
5. *Данеев А.В., Русанов В.А., Шарпинский Д.Ю.* Принцип максимума энтропии в структурной идентификации динамических систем: аналитический подход // Известия вузов. Математика. 2005. – № 11. – С. 16-24.
6. *Варга Дж.* Оптимальное управление дифференциальными и функциональными уравнениями. – М.: Наука, 1977. – 624 с.
7. *Льюнг Л.* Идентификация систем. Теория для пользователя. – М.: Наука, 1991. – 432 с.
8. *Андерсон Б., Битмид Р., Джонсон К. и др.* Устойчивость адаптивных систем. – М.: Мир, 1989. – 264 с.
9. *Поляк Б.Т., Щербаков П.С.* Робастная устойчивость и управление. – М.: Наука, 2002. – 304 с.
10. *Васильев С.Н., Жерлов А.К., Федосов Е.А., Федунов Б.Е.* Интеллектное управление динамическими системами. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2000. – 352 с.
11. *Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л.* Элементы математического моделирования в программных средах MATLAB и SCILAB. – СПб: Наука, 2001. – 286 с.
12. *Данеев А.В., Русанов В.А.* К проблеме построения сильных дифференциальных моделей управления с минимальной операторной нормой. I // Кибернетика и системный анализ. 2004. – № 1. – С. 144-153.
13. *Данеев А.В., Русанов В.А.* О спектрально-векторной идентификации линейной непрерывной нестационарной конечномерной системы управления // Известия вузов. Приборостроение. 2001. – Т. 44. – № 8. – С. 25-32.
14. *Русанов В.А., Лакеев А.В., Данеев А.В., Куменко А.Е.* Функциональный анализ сильных дифференциальных моделей и их представление рядами Фурье // Труды SICPRO'05. IV Международная конференция «Идентификация систем и задачи управления». Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. Москва. 2005. – С. 429-446.
15. *Гантмахер Ф. Р.* Теория матриц. – М.: Наука, 1988. – 552 с.

16. *Данеев А.В., Русанов В.А., Шарпинский Д.Ю.* Нестационарная реализация Калмана-Месаровича в конструкциях оператора Релея-Ритца // Кибернетика и системный анализ. – 2007. – № 1. – С. 82-90.
17. *Ланкастер П.* Теория матриц. – М.: Наука, 1982. – 270 с.
18. *Иосида К.* Функциональный анализ. – М.: Мир, 1967. – 624 с.
19. *Иванов В.В.* Методы вычислений на ЭВМ: Справочное пособие. – Киев: Наукова думка, 1986. – 584 с.
20. *Эйкхофф П.* Основы идентификации систем управления. – М.: Мир, 1975. – 688 с.
21. *Caines P.E.* On the scientific method and the foundations of system identification. – In: Modelling, Identification and Robust Control (*Byrnes C.I., Lindquist A., eds.*) – North Holland, Amsterdam. 1986. – P. 563-580.

Измайлов В.В., Наумов А.Е.

УДК 311.216:004.42

ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИВНЫХ СТАТИСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В современной технике особую важность приобрели вопросы надежности различного рода ответственных устройств. Перерыв в работе ответственного устройства может привести не только к ухудшению качества производимой продукции или к полному прекращению производственного процесса, но и к весьма серьезным авариям, выходящим за локальные рамки предприятия. В данной статье рассматривается применение адаптивных моделей для решения задачи прогнозирования остаточного ресурса электроконтактных соединений, применяемых на энергетических и промышленных предприятиях. Особенностью данной группы устройств является высокая надежность, ответственность функций и значительная цена последствий отказа.

Традиционные методы контроля состояния электроконтактных соединений основываются на концепции разрушения как критического события; в действительности разрушение является процессом, непрерывно развивающимся во времени, а его протекание зависит от множества факторов, которые можно учесть на основе диагностических моделей. Наиболее эффективным как с технической, так и с экономической точек зрения является периодический мониторинг определяющего параметра электроконтактного соединения с последующим прогнозом изменения этого параметра с целью предсказания момента наступления предельного состояния.

В математической статистике имеется мощный аппарат прогнозирования на основе анализа временных рядов [1, 2]. Статистические модели описывают явления, в которых присутствуют случайные факторы, не позволяющие объяснить явление в чисто детерминистских терминах.

В качестве определяющего диагностического параметра, на основании которого делается вывод о работоспособности или отказе электроконтактного соединения, выбрана температура, точнее превышение температуры наиболее нагретой точки контактного соединения над температурой окружающей среды ΔT.

Исходные данные для прогнозирования были получены с использованием современных методик термографического обследования объектов электроэнергетики Тверской области. Результатом этих мероприятий явля-

ются отчеты по измерениям с точками максимальных перегревов. В результате экспериментов определены зависимости температуры наиболее нагретой точки контактного соединения от времени, представляющие собой типичные временные ряды.

Методика построения модели ARIMA по временному ряду. Как показано в работе [3], поведение контактного соединения может быть описано на основе статистической (вероятностной) модели по методу анализа временных рядов Бокса-Дженкинса или модели ARIMA (АРПСС в русской транскрипции).

Экспериментальные значения температуры T контакт-деталей в зависимости от времени t представляют собой временные ряды T(t), образованные значениями температуры в отдельные моменты времени.

Модель ARIMA зависит от ряда параметров и обычно обозначается как ARIMA(p, d, q). Параметр p определяет порядок авторегрессионной составляющей, d — порядок разности (интегрирования), q — порядок скользящего среднего. Общий подход, предложенный Боксом и Дженкинсом, можно представить в виде нескольких этапов.

1. *Идентификация модели* ARIMA(p, d, q), т.е. определение величины параметров (сначала d, а потом p и q). Значение параметра d равно количеству последовательно взятых разностей, при котором исходный ряд преобразовывается в стационарный. Значения параметров p и q оценивают по поведению автокорреляционной функции (АКФ) и частной АКФ (ЧАКФ) стационарного ряда по установленным критериям [3].

2. *Оценка параметров* p и q модели. Из нескольких приемлемых значений p и q выбирают такие, которые соответствуют адекватной модели. Модель считается адекватной, если оценки значений p и q отличаются друг от друга незначительно, а также стандартные ошибки их оценки не высоки.

3. *Диагностическая проверка* модели. Проводится сравнение прогноза, построенного по наблюдаемому ряду, с вновь поступившими опытными данными. Модель хорошо согласуется с экспериментальными данными, если остатки (разности наблюдаемых и предсказанных значений) не коррелированны и нормально распределены, т.е на графиках АКФ и ЧАКФ остатков нет резко выделяющихся значений.

Таким образом, для исследованных электроконтактных соединений можно выбрать оптимальное сочетание параметров *d*, *p* и *q*. Выбранная модель используется для прогнозирования превышения температуры соединения над температурой окружающей среды.

Прогнозирование температуры контакта с помощью модели ARIMA. Пример прогнозирования зависимости превышения температуры замкнутого контактного соединения от времени приведён на рис. 1. Для прогнозирования используются результаты мониторинга температуры в течение так называемого периода оценивания. Прогноз делается вперед на некоторый интервал времени, следующий за последним термографированием. Этот интервал времени называется периодом упреждения. На рис. 1 представлены результаты прогнозирования на основе модели ARIMA(2,2,2).

Существенным фактором, влияющим на качество прогноза, является выбор периода оценивания. Пример варьирования длительности этого периода при измерении превышения температуры болтового соединения в сравнении с экспериментальными результатами приведен на рисунке. Приведены также доверительные интервалы прогнозирования при 90 % доверительной вероятности.

Как видно, все экспериментальные значения попадают в доверительные интервалы прогнозирования, что свидетельствует о достоверности прогноза. Величина доверительного интервала и, следовательно, погрешность прогнозирования возрастает с увеличением длительности периода упреждения при заданном периоде оценивания, и уменьшается с ростом периода оценивания при заданном периоде упреждения.

Экспериментальная проверка показывает достоверность получаемых результатов, что позволяет применять данную методику прогнозирования на практике. Частота замеров температуры при этом может быть не более

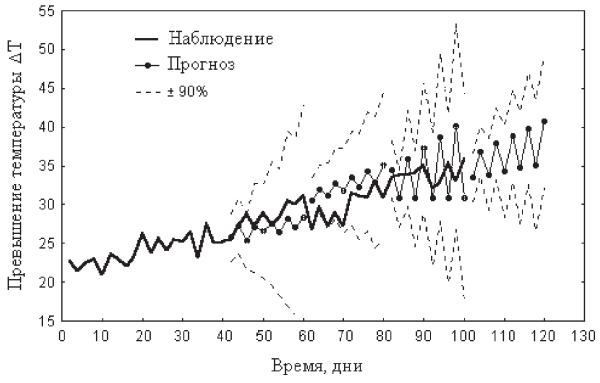


Рис. 1. Прогнозирование превышения температуры электроконтактного соединения

одного раза в месяц, т.к. экономическая эффективность этого мероприятия напрямую зависит от частоты проведения замеров.

Таким образом, мы можем предсказать поведение данного контактного соединения на определённый период вперед, имея в своём распоряжении его «историю», составленную из результатов измерений его определяющего параметра (в данном случае — превышение температуры). Однако эта процедура требует достаточно большого количества времени, а также умения пользоваться программными пакетами, предоставляющими функцию анализа временных рядов.

Данная задача может решаться в автоматическом режиме, с применением современных программных средств и способов визуализации данных. В настоящее время авторами сертифицирован программный продукт, который позволяет получать и обрабатывать данные замеров, полученные из различных источников, и выдавать результаты расчёта во внешнее аналитическое приложение, которое реализует прогнозирование временного ряда на основе модели ARIMA, получать из неё результаты и сформировать готовый отчёт для конечного пользователя. Приложение написано на языке C++ и MFC. В отдельном блоке программы реализована процедура считывания данных из HTML-форм, расположенных на удалённых рабочих местах, что позволяет получать исходные данные практически с любого объекта, на котором ведётся мониторинг. Это могут быть дальние электрические подстанции, на которых не установлен расчетный пакет или которые не располагают квалифицированным персоналом для анализа результатов измерений. Т.о., сам процесс анализа может быть запущен (инициирован) пользовательским приложением (в т.ч. удалённо, по сети Internet), которое будет при этом выступать в качестве "тонкого клиента". Это открывает возможность работы с одним расчётным центром для нескольких рабочих мест, имеющих свои архивы наблюдений. Для передачи, а также хранения результатов использована возможность работы с универсальным форматом базы данных, совместимым с MS "Access", который позволит хранить большие объёмы информации по «истории» сразу всех обследованных контактных соединений энергопредприятия, а также импортировать данные из большинства распространённых электронных источников, таких как Access, Excel, CSV, и т.д.

Основными преимуществами приведённой методики и её программной реализации являются:

— применение метода неразрушающего контроля для ответственного оборудования, находящегося в эксплуатации;

— возможность импорта измеренных значений из большинства распространённых форматов данных, используемых при обследованиях;

— совместимость расчетного модуля с различными способами сбора данных результатов измерений, независимость от способа получения данных и независимость от вида ресурсного параметра — им могут быть регулярные замеры сопротивления, температуры, падения напряжения;

— способность системы хранить весь объём собираемой информации по нескольким объектам в течение всего срока наблюдения (несколько лет);

— возможность предоставлять ретроспективный анализ данных за какой-либо определяемый пользователем промежуток времени;

— рассчитывать ошибку в предсказании остаточного ресурса контактного соединения;

— производить самокоррекцию по мере получения новых данных.

В работе показано, что прогнозирование остаточного ресурса разборных электроконтактных соединений возможно по результатам периодического мониторинга ресурсного параметра соединения в процессе его эксплуатации. Разработанная система не требует большого объема статистической информации и позволяет прогнозировать остаточный ресурс конкретного соединения с учетом особенностей его эксплуатации, при этом сравнение прогноза с экспериментальными данными дает хорошие результаты.

Разработанная методика и её программная реализация позволяет обоснованно назначать сроки очередного профилактического обследования, ремонта или замены электроконтактного соединения.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. // М.: Мир, 1974.
2. Измайлов В.В., Наумов А.Е. Автоматизированная система прогнозирования остаточного ресурса электроконтак-

тных соединений // Программные продукты и системы, №2, 2008. - С. 72-78.
3. StatSoft, Inc. (1999). // Электронный учебник по статистике http://www.statsoft.ru/home/textbook/
4. Измайлов В.В., Новоселова М.В., Наумов А.Е. Применение статистических методов для прогнозирования остаточного ресурса электроконтактных соединений // Электротехника №1, 2008. С. 51-57.

Огар П.М., Максимова О.В., Тарасов В.А. УДК 621.81:621.891

ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ПЛОЩАДЬ КОНТАКТА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ С УПРУГИМ СЛОИСТЫМ ПОЛУПРОСТРАНСТВОМ

В связи с широким применением различных покрытий и модифицированных слоев для повышения эксплуатационных характеристик соединений деталей машин актуальным является вопрос о влиянии толщины покрытия на относительную площадь контакта сопряжений деталей машин.

Рассмотрим слоистое упругое полупространство, которое состоит из покрытия толщиной δ_1 с упругими характеристиками μ_1 и E_1 и основного материала с упругими характеристиками μ_0 и E_0. Точное решение задачи определения напряжений и деформаций при осесимметричном нагружении приведено в [1], однако оно трудоемко для инженерных расчетов. В работе [2] для этой цели предложено использовать теорию Герца и двухточечную аппроксимацию Паде для крайних значений толщины покрытия $\delta_1 = 0$ и $\delta_1 = \infty$. Авторами работы [3] на основании жесткостной модели разработана инженерная методика определения упругой характеристики θ_{01} в зависимости от толщины покрытия

$$\theta_{01} = \theta_1 F_1, \qquad (1)$$

где:

$$F_1 = \frac{1}{K_1(0)}\left[\frac{\left(K_1(0) - K_1(\bar{\delta}_1)\right)^2}{K_{01}(0) - K_{01}(\bar{\delta}_1)} + K_1(\bar{\delta}_1)\frac{K_0(\bar{\delta}_1)}{K_{01}(\bar{\delta}_1)}\frac{\theta_0}{\theta_i}\right]; \qquad (2)$$

$$\theta_i = \frac{1-\mu_i^2}{E_i}; \quad \bar{\delta}_1 = \frac{\delta_1}{a}; \quad K_i(\bar{\delta}_1) = K_i(\bar{\delta}_1, \mu_i);$$

$$K_i(\bar{z}, \mu_i) = arcctg\bar{z} - \frac{\mu_i}{1-\mu_i}\bar{z}(1 - \bar{z}arcctg\bar{z}); \qquad (3)$$

$\bar{z} = z/a$ - относительная координата; a- радиус площадки нагружения полупространства герцевской нагрузкой (при $a = a_r$ - радиус площадки контакта при внедрении сферического индентора).

Так как значения функции $K(\bar{\delta}_1, \mu_i)$ для $\mu_i = 0{,}3..0{,}5$ изменяются незначительно, то с погрешностью менее 1% можно принять

$$\mu_{01} = \mu_1 - \frac{\mu_1 - \mu_0}{\left|1 - \theta_0/\theta_1\right|}F_1. \qquad (4)$$

Для случая контакта гладкой жесткой сферы со слоистым полупространством сближение тел определяется выражением

$$\omega_{01} = \omega_1 \cdot F_1^{\frac{2}{3}}, \qquad (5a)$$

для радиуса контакта и максимального давления имеем

$$a_{01} = a_1 F_1^{\frac{1}{3}}, \qquad p_{01} = p_0 F_1^{-\frac{2}{3}}. \qquad (5б)$$

При контактировании шероховатой поверхности с упругим слоистым полупространством для отдельной неровности параметр $\bar{\delta}_{1i}$ можно представить в виде

$$\bar{\delta}_{1i} = \frac{\delta_1}{a_r} = \frac{\delta_1}{a_c}\cdot\frac{a_c}{a_r} = \gamma \cdot \eta_i^{-0.5},$$

где $\gamma = \dfrac{\delta_1}{a_c}$ - относительная толщина покрытия;

$\eta_i = \dfrac{a_r^2}{a_c^2}$ - относительная площадь контакта для отдельной неровности; a_c - радиус площадки приходящийся на одну неровность.

Таким образом, для каждой контактирующей неровности согласно выражению (1) имеем

$$\theta_{01i}(\gamma,\eta_i)=\theta_1 F_{1i}(\gamma,\eta_i), \quad (6)$$

где $F_{1i}(\gamma_1\eta_i)$ определяется выражением (2) с учетом (4).

Зависимости $F_{1i}(\gamma,\eta_i)$ и $\mu_{01}(\gamma,\eta_i)$, определенные в среде Mathcad для $E_0=201ГПа$, $\mu_0=0{,}3$ (сталь) и $E_1=2{,}39ГПа$, $\mu_1=0{,}38$ (фторопласт Ф4), представлены на рис.1.

Как следует из рис. 1*а* при изменении относительной толщины покрытия γ в пределах 0,05...0,5 и относительной площади контакта η_i в пределах 0...0,8 величина параметра $F_{1i}(\gamma,\eta_i)$ может изменится на порядок. В соответствии с принятым допущением (4) величина $\mu_{01}(\gamma,\eta_i)$ для этих же пределов γ η_i изменяется в пределах 0,3...0,38 (рис.1*б*).

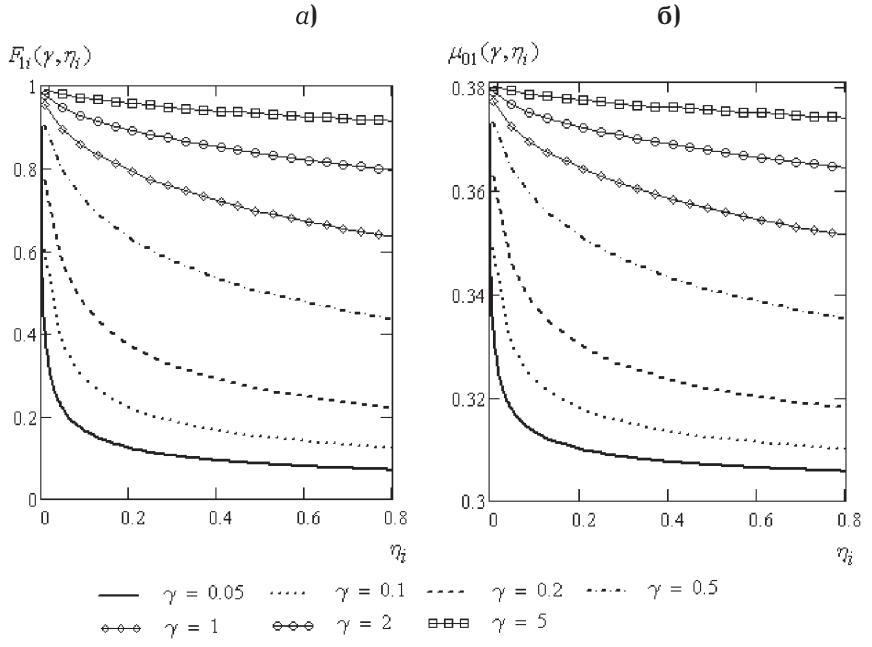


Рис.1. Зависимости параметров $F_{1i}(\gamma,\eta_i)$ - (*а*), и $\mu_{01}(\gamma,\eta_i)$- (*б*) относительной площади контакта отдельной неровности при разных значе-

При использовании дискретной модели шероховатости распределения микронеровностей по высоте должно определяться исходя из опорной кривой профиля. Если опорную кривую профиля описывать отношением неполной бета-функции, то плотность распределения неровностей по высоте описывается выражением [4,5]

$$\varphi'_n(u)=\frac{u^{\alpha-2}(1-u)^{\beta-2}\left[(\alpha-1)(1-u)-(\beta-1)u\right]}{\varepsilon_s^{\alpha-1}(1-\varepsilon_s)^{\beta-1}}, \quad (7)$$

где $\alpha=\left(\frac{R_p}{R_q}\right)^2\left(\frac{R_{\max}-R_p}{R_{\max}}\right)-\frac{R_p}{R_{\max}}$,

$$\beta=\alpha\left(\frac{R_{\max}}{R_q}-1\right),\ \varepsilon_s=\frac{\alpha-1}{\alpha+\beta-2},$$

R_p, R_q,$R_{\max}$ - параметры шероховатости по стандарту ISO 4281/1-1997.

Приведем вначале выражения, необходимые для определения зависимости относительной площади контакта η_{1i} от безразмерного силового упругогеометрического параметра при контактировании жесткой шероховатой поверхности с упругим полупространством из материала покрытия.

Относительная площадь контакта η_{1i} для отдельной неровности с учетом влияния остальных неровностей при нагружении шероховатой поверхности контурным давлением q_c равна

$$\eta_{1i}(\varepsilon,u)=\frac{\varepsilon-u}{2\omega}-F_q\left[(1+0{,}5F_q)\left(1-\sqrt{1-\frac{\varepsilon-u}{2\omega(1+0{,}5F_q)^2}}\right)\right], \quad (8)$$

где ε - параметр, определяющий относительную высоту неровности, для которой контакт происходит в точке касания; F_q- безразмерный силовой упругогеометрический параметр

$$F_q=\frac{q_c\theta_1 a_c}{\omega R_{\max}}. \quad (9)$$

Контурное давление q_{ci}, приходящееся на отдельную неровность, с учетом влияния остальных неровностей определяется выражением

$$q_{ci}(\varepsilon,u)=\frac{8\eta_{1i}^{1,5}(\varepsilon,u)\omega R_{\max}}{3\pi\theta_1 a_c}+q_c\psi_\eta(\varepsilon,u),$$

где

$$\psi_\eta(\varepsilon,u)=\frac{2}{\pi}\left[\arcsin\eta_{1i}^{0,5}(\varepsilon,u)-\sqrt{\eta_{1i}(\varepsilon,u)(1-\eta_{1i}(\varepsilon,u))}\right]. \quad (10)$$

Суммируя нагрузку по всем контактирующим неровностям, получим

$$q_c(\varepsilon)=\frac{8\omega R_{\max}}{3\pi\theta_1 a_c}\cdot\frac{\int_0^{\min(\varepsilon,\varepsilon_s)}\eta_{1i}^{1,5}(\varepsilon,u)\varphi'_n(u)du}{1-\int_0^{\min(\varepsilon,\varepsilon_s)}\psi_\eta(\varepsilon,u)\varphi'_n(u)du}$$

или с учетом выражения (9) в безразмерном виде -

$$F_q(\varepsilon)=\frac{8}{3\pi}\cdot\frac{\int_0^{\min(\varepsilon,\varepsilon_s)}\eta_{1i}^{1,5}(\varepsilon,u)\varphi'_n(u)du}{1-\int_0^{\min(\varepsilon,\varepsilon_s)}\varphi_n(\varepsilon,u)\varphi'_n(u)du}. \qquad (11)$$

Относительная площадь контакта для шероховатой поверхности определяется из

$$\eta_1(\varepsilon)=\int_0^{\min(\varepsilon,\varepsilon_s)}\eta_{1i}(\varepsilon,u)\varphi'_n(u)du. \qquad (12)$$

При заданном ε выражения (7), (8), (10), (11) и (12) представляют собой замкнутую систему трансцендентных уравнений, позволяющих определить зависимость относительной площадиη_1 контакта от комплексного параметра F_q.

При контактировании жесткой шероховатой поверхности со слоистым пространством следует учитывать, что согласно выражениям (5*б*), (6) и (8) имеем

$$\eta_i(\varepsilon,u)=\eta_{1i}(\varepsilon,u)\cdot F_{1i}^{\frac{2}{3}}(\gamma,\varepsilon,u), \qquad (13a)$$

$$\theta_{01i}(\gamma,\varepsilon,u)=\theta_1\cdot F_{1i}(\gamma,\varepsilon,u). \qquad (13б)$$

Тогда аналогично выражениям (11) и (12) с учетом (10) получим

$$F_q(\gamma,\varepsilon)=\frac{8}{3\pi}\cdot\frac{\int_0^{\min(\varepsilon,\varepsilon_s)}\eta_{1i}^{1,5}(\varepsilon,u)\varphi'_n(u)du}{1-\int_0^{\min(\varepsilon,\varepsilon_s)}\varphi_\eta(\gamma,\varepsilon,u)\varphi'_n(u)du}, \qquad (14)$$

где

$$\varphi_\eta(\gamma,\varepsilon,u)=\frac{2}{\pi}\left[\arcsin\left(\eta_{1i}^{0,5}(\varepsilon,u)\cdot F_{1i}^{\frac{1}{3}}(\gamma,\varepsilon,u)\right)-\sqrt{\eta_{1i}(\varepsilon,u)F_{1i}^{\frac{2}{3}}(\gamma,\varepsilon,u)\cdot\left(1-\eta_{1i}(\varepsilon,u)F_{1i}^{\frac{2}{3}}(\gamma,\varepsilon,u)\right)}\right]; \qquad (15)$$

$$\eta(\gamma,\varepsilon)=\int_0^{\min(\varepsilon,\varepsilon_s)}\eta_{1i}(\varepsilon,u)\cdot F_{1i}^{\frac{2}{3}}(\gamma,\varepsilon,u)\,\varphi'_n(u)du. \qquad (16)$$

Для заданных значений γ и ε выражения (14), (15), (16) совместно с (7) и (8) представляют собой замкнутую систему трансцендентных уравнений позволяющих определить зависимость относительной площади контакта η от комплексного параметра F_q. Для указанных выше материалов на рис. 2 приведены зависимости $\eta(\gamma,F_q)$, определенные в среде Mathcad.

Как следует из рис. 2 существенное влияние на относительную площадь контакта оказывает относительная толщина покрытия γ, при изменении которой в пределах 0.05...5 относительная площадь контакта при одинаковых значениях параметра F_q возрастает в 1,5...5 раз. Таким образом, при прочих равных условиях контактирования представляется возможность управлять триботехническими характеристиками (коэффициентом трения, интенсивностью изнашивания) сопряжений деталей машин толщиной покрытия.

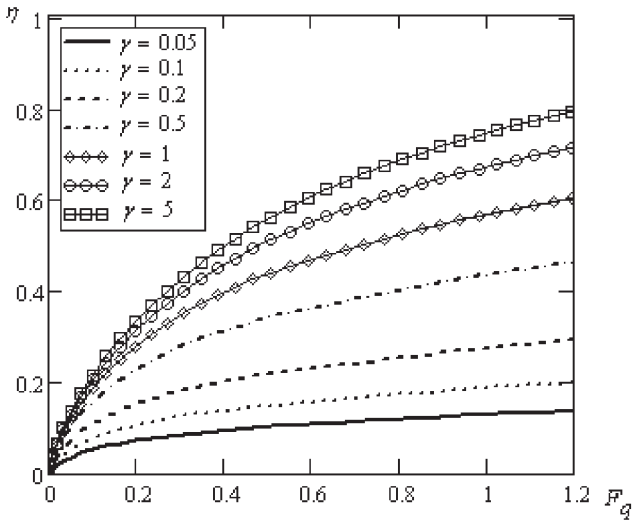


Рис. 2. Зависимость относительной площади контакта η от комплексного параметра F_q при разных значениях относительной толщины покрытия γ

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Макушкин А.П. Полимеры в узлах трения и уплотнениях при низких температурах / А.П. Макушкин. — М.: Машиностроение, 1993. — 228 с.
2. Воронин Н.А. Применение теории упругого контакта Герца к расчету напряженно-деформированного состояния слоистого упругого тела // Трение и износ.-1993. - Т.14, №5, С. 250-258.
3. Огар П.М., Максимова О.В., Автушко А.Н., Устюжанин Е.В. К расчету напряженно-деформированного состояния слоистого упругого тела// Труды БрГУ.Т.2.-Братск: БрГУ,-2006.С.297-302.
4. Огар П.М., Шеремета Р.Н., Лханаг Д. Герметичность металлополимерных стыков уплотнительных шероховатых поверхностей. — Братск: Изд-во БрГУ, 2006. — 159 с.
5. Огар П.М., Горохов Д.Б. Контактирование шероховатых поверхностей: фрактальный подход. — Братск: ГОУ ВПО "БрГУ", 200. — 171 с.

Резник Ю.Н., Шумилова Л.В.

УДК 622.342

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИОГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗОЛОТА ИЗ УПОРНЫХ РУД

Стремительные темпы процессов урбанизации привели к образованию множества новых мегаполисов с мощной инфраструктурой, что вызвало резкое возрастание антропогенной нагрузки на окружающую среду. Накопление огромного количества отходов жизнедеятельности человека уже сегодня является причиной деградации биосферы и создает прямую угрозу здоровью и жизни людей. В современных условиях на каждого жителя планеты ежегодно добывается около 20 т сырья, которое с использованием 800 т свежей воды, 2500 Вт мощности перерабатывается в готовую продукцию. Выход конечных продуктов составляет 2% от массы сырья. Все остальное - техногенные отходы.

К настоящему времени на территории России накоплено около 80 млрд.т. твердых отходов различного типа, из них 22 % составляют вскрышные породы и другие отходы горнорудной промышленности.

Взаимоотношения человека и среды обитания сейчас обострились. Возникла проблема, которая по сути своей выражает противоречие между необходимостью постоянного увеличения изъятия природного вещества со всеми вытекающими последствиями и насущной потребностью улучшения условий жизни, что немыслимо без сохранения благоприятных условий среды. Сейчас чрезвычайно актуально создание таких технологических процессов, которые бы способствовали предотвращению образования отходов или использовали отходы в качестве вторичных сырьевых, были бы экологически безопасны.

Как микробиологи, так и геологи давно осознали тот факт, что микроорганизмы играют важную роль в концентрировании и распределении химических элементов в литосфере. Это особенно справедливо для многих металлов, которые, являясь существенными компонентами сложных биологических реакций, необходимы для поддержания метаболизма у большинства микроорганизмов. Химические элементы непосредственно включаются во внутриклеточные биохимические реакции, вследствие этого микроорганизмы могут их накапливать или выделять в концентрированном виде. Железо и сера являют собой характерный пример химических элементов, которые могут, как окисляться, так и восстанавливаться различными микроорганизмами, являясь источником энергии. Способность микроорганизмов принимать участие в круговороте металлов и положена в основу нового направления биогеотехнологии металлов.

В последние годы произошло значительное истощение запасов сложных и простых в переработке руд цветных металлов. Нарастает необходимость вовлечения в промышленную эксплуатацию комплексных, упорных, бедных, забалансовых руд, отходов горно-обогатительного производства.

При этом традиционные технологии оказываются мало эффективными и экономически нецелесообразными. Именно биотехнологические методы переработки обеспечивают высокий уровень технико-экономических показателей, не обезображивают поверхность земли, не отравляют воздух и не загрязняют водоемы сточными водами. Применение биологических методов интенсифицирует процессы переработки минерального сырья и удешевляет их.

Сульфатвосстанавливающие бактерии в анаэробных условиях восстанавливают сульфаты, сульфиты, тиосульфата, иногда серу.

В процессе разрушения горных пород участвуют также некоторые гетеротрофные

микроорганизмы, использующие в качестве источника энергии органические вещества и выделяющие в качестве метаболитов органические кислоты. Так, силикатные породы разрушаются представителями рода Bacillus, Aspergillus, Pencillin и др.

Процесс выщелачивания осуществляется, как правило, с участием, бактериальной ассоциации микроорганизмов, выделенной из того же месторождения, что и минералы, которые должны быть переработаны. С помощью непрерывного культивирования можно получить штаммы, адаптированные к разным металлам, железу, меди, кобальту, урану, хрому, мышьяку и др.

Процесс бактериального выщелачивания является сложным, многофакторным. Практически невозможно разделить те реакции, которые непосредственно ускоряются бактериями и те, которые протекают просто как химические. Тем не менее, в литературе часто употребляют термины "прямые" и "непрямые" методы бактериального окисления металлов. Эти понятия относятся к растворению сульфидных пород непосредственно бактериями и с помощью железа III, образовавшегося при бактериальном окислении железа (II).

Самым распространенным сульфидным минералом является пирит — FeS_2. Он присутствует как сопутствующий минерал практически во всех промышленных сульфидных отложениях.

Бактериальное окисление является сложным процессом, включающим: адсорбцию микроорганизмов на поверхности минерала и горной породы; деструкцию кристаллической решетки; транспорт в клетку минеральных элементов; внутриклеточное окисление.

Механизм бактериального выщелачивания окончательно не установлен. Считается, что Thiobacillus ferrooxidans окисляют сульфидные минералы до водорастворимых сульфатов прямым и косвенным путем.

Согласно одному из распространенных предположений (косвенный путь), роль бактерий сводиться к биокаталитическому ускорению реакций, протекающих достаточно медленно в обычных условиях. Биокаталитическое ускорение достигается в результате окисления бактериями сульфита закиси железа до сульфата окиси после того, как $FeSO_4$ образуется в результате химического окисления сульфидов железа.

Биокаталитическое ускорение достигается при окислении бактериями сульфита закиси железа до сульфата окиси после того, как $FeSO_4$ образуется в результате химического окисления сульфидов железа:

$$2FeS_2 + 7O_2 + 2H_2O = 2FeSO_4 + 2H_2SO_4,$$

$$4FeSO_4 + 2H_2SO_4 + O_2 \overset{\text{Th.fer.}}{=} 2Fe_2(SO_4)_3 + 2H_2O.$$

Образующийся в результате жизнедеятельности бактерий сульфат окиси железа взаимодействует с сульфидными минералами:

$$FeS_2 + 7Fe_2(SO_4)_3 + 8H_2O = 15FeSO_4 + 8H_2SO_4,$$

$$FeS_2 + Fe_2(S0_4)_3 = 3FeSO_4 + 2S,$$

$$Cu_2S + 2Fe_2(SO_4)_3 = 2CuSO_4 + 4FeSO_4 + S,$$

$$CuFeS_2 + 2Fe_2(SO_4)_3 = CuSO_4 + 5FeSO_4 + 2S.$$

Сера окисляется в присутствии бактерий до серной кислоты:

$$S + 1\tfrac{1}{2}SO_2 + \overset{\text{Th.fer.}}{H_2O} = H_2SO_4.$$

Биохимическое выщелачивание осуществляется с использованием культуры Thiobacillus ferrooxidans и проводится при следующих условиях: pH = 2,5-3,5; окислительно-восстановительный потенциал (Eh) — от 400-750 мВ; аэрация бактериальных растворов — 1-3 $м^3$ на 1 $м^3$ бактериального раствора в час; концентрация активных бактерий в выщелачивающем растворе не менее 10^5-10^6 кл/мл.

На основании электронно-микроскопических исследований высказана гипотеза прямого механизма окисления серы и сульфидных минералов тионовыми бактериями; Согласно этой гипотезе сера и сульфидные минералы окисляются в месте контакта бактерий с минеральной поверхностью с помощью мембранных структур, причем важную роль в этом контакте играют вещества слизистого капсулоподобного слоя.

Суть прямого механизма заключается в окислении серы и сульфидных минералов в результате электронных процессов, протекающих в ферментных системах растущих клеток, которые сопровождаются синтезом макроэргических фосфатов. Энергия макроэргических фосфатов используется для ассимиляции углекислоты и синтеза клеточного материала.

Подтверждением прямого механизма окисления являются результаты исследований бактериального выщелачивания сульфидных минералов, на основании которых выявлена четкая связь извлечения металла от концентрации клеток, адсорбированных на минеральной поверхности частиц.

При принятии решения об использовании бактерий в технологиях выщелачивания определя-

ющей является оценка благоприятности перерабатываемых сульфидных руд для биохимического выщелачивания.

При бактериальном выщелачивании к характеристикам перерабатываемых объектов, существенно влияющим на жизнедеятельность бактерии, относятся размеры объекта, его проницаемость, текстура и структура горных пород.

Важными характеристиками для технологии являются крупность рудного материала, вещественный, химический, минералогический состав руд и вмещающих горных пород, массовая доля и распределение пирита и т. п.

С точки зрения минералогического состава благоприятным для биохимического выщелачивания (БВ) является наличие минералов, склонных к биоокислению и являющихся источником питательных веществ для бактерий. Среди характеристик твердой фазы существенное значение имеют крупность и форма рудных частиц, размеры пор, размеры и строение минеральных зерен. Чем больше поверхность контакта бактериального раствора реагента с рудными минералами, тем активней протекает процесс биохимического окисления. Благоприятными факторами в этом случае являются также характеристики руды как, тонкая вкрапленность минеральных зерен, склонность породной матрицы разрушаться под действием реагентов, пористость, трещиноватость. Неблагоприятными для биохимического выщелачивания являются сплошные массивные руды.

При организации бактериального выщелачивания сульфидных руд в промышленных масштабах основной задачей является создание и поддержания необходимых условий, обеспечивающих жизнедеятельность и размножение бактерий. Высокая скорость биохимического выщелачивания достигается при концентрации активных бактерий в выщелачивающем растворе не менее 10^5 - 10^6 клеток на 1 мл. пульпы.

Принципиальная возможность использования гетеротрофных бактерий для выщелачивания самородного золота из руд была показана И. Паре в начале 60-х годов XX столетия.

В процессах биохимического выщелачивания сульфидных руд участвуют автотрофные бактерии, способные окислять серу, тиосульфат, а также двухвалентное железо. К таким бактериям относятся тионовые бактерии: Thiobacillus ferrooxidans, Thiobacillus thiooxidans, Thiobacillus thioparus, Thiobacillus thiocyanooxidans и т.д., а также такие культуры, как: Ferrooxidans sulfooxidans, Ferrooxidans ferrooxidans и др.

В процессах биохимического окисления сульфидных руд основная роль принадлежит бактериям Thiobacillus ferrooxidans. Эти бактерии окисляют практически все известные сульфидные минералы, используя выделяющуюся при этом энергию для построения клеточной структуры, ассимиляция углерода и других жизненно важных функций.

В следующие годы в ходе многочисленных исследований микрофлоры рудничных вод и пород золоторудных месторождений была выделена группа золоторастворяющих бактерий, к наиболее активным из которых относится Bac. Megatherium 20, Bac. Megatherium 30, Bac. Megathericus niger 12, Ps. Ucufaciens 9.

Исследование механизма бактериального выщелачивания золота гетеротрофными микроорганизмами показало, что растворение золота может протекать в результате непосредственного окисления его бактериями, но, в основном осуществляется под действием аминокислот, образующихся в результате их жизнедеятельности (метаболизма).

Продукты метаболизма гетеротрофных бактерий, представляют собой смесь аминокислот. Растворы аминокислот (продукты метаболизма) получают при культивировании бактерий на лептонной (смесь продуктов неполного гидролиза белков), мелассной (отходы свеклосахарного производства) и других органо-минеральных смесях. Наиболее благоприятным источником азота для синтеза золоторастворяющих кислот являются мочевина и двузамещенный фосфат аммония, а лучшими источниками углерода - глюкоза и меласса. Культивирование в оптимальных условиях позволяет получать растворы с концентрацией аминокислот 12 - 14,5 г/л.

При взаимодействии золота с аминокислотами образуется водорастворимое комплексное соединение. Связь золота в аминокислотном комплексе осуществляется за счет электрического притяжения иона AiT ионизированной в щелочной среде карбоксильной группой и донорно-акцепторным взаимодействием его с атомом азота аминогруппы. Наиболее прочные комплексы золото образует с аспарагином и гистидином.

В присутствии продуктов метаболизма гетеротрофных бактерий скорость бактериального выщелачивания значительно возрастает. Концентрация золота при выщелачивании в течение месяца в аминокислотных растворах достигает до 0,5 - 0,7 мг/л.

В результате воздействия различных мутагенных факторов (этиленамин, УФ - облучение) получены активные мутанты, значительно превосходящие природные штаммы гетерофных бактерий по золоторастворяющей способности. Скорость растворения золота продуктами метаболизма таких бактерий в 5 - 10 раз выше, чем «ди-

ких» штаммов (до 4,5 - 7,5 мг/л за месяц). Введение окислителя в биологический раствор существенно повышает растворимость золота.

Скорость извлечения металла при промышленном выщелачивании руд и отвалов зависит от многих факторов: активности культуры микроорганизмов; качество руды и степени ее дисперсности; скорости фильтрации выщелачивающего раствора; аэрации.

В конце 60-х годов были начаты исследования и испытания по кучному бактериальному выщелачиванию золота из бедного рудного сырья. Компания Carlin Yold Mining применяет на руднике Carlin кучное выщелачивание золота. Руда с содержанием металла 2 г/т дробится до -18,6 мм, сваливается на асфальтовую площадку и обрабатывается выщелачивающим раствором в течение 8 дней, затем руда промывается и убирается погрузчиком в хвостохранилище. На руднике имеется 4 площадки, на каждой размещается 1400 т руды. В период с апреля по октябрь ежемесячно перерабатывается около 10000 т руды с извлечением золота 70% [1].

В холодное время работы приостанавливаются. В настоящее время в США кучным выщелачиваем, перерабатываются руды более 100 месторождений, и обеспечивается более трети объема добычи золота.

Учитывая экстенсивность процесса БВ и связанные с этим значительные энергетические затраты. Принято считать, что объектами применения данной технологии должны являться зологосодержащие концентраты или богатые руды с относительно высоким содержанием упорного (неизвлёкаемого цианированием) золота. Однако при определенных условиях биогидрометаллургическая технология может оказаться полезной и при переработке бедного золоторудного сырья, включая низкосортные руды, рудные отвалы и лежалые хвосты цианирования. В данном случае имеются в виду энергосберегающие варианты кюветного и кучного (полигонного) БВ.

Последний вариант (полигонное БВ) предпочтителен при доизвлечении золота из лежалых хвостов цианирования упорных золотосодержащих руд, заскладированных в отработанных хвостохранилищах.

В качестве примера можно сослаться на описанный в зарубежной печати [2]опыт переработки лежалых хвостов одной из золотоизвлекательных фабрик ЮАР, содержащих золото (до 0,5 г/т) и уран (0,25 % U_3O_8). Слежавшиеся за время хранения шламовые отвалы подвергают рыхлению с помощью дискового плуга на глубину примерно 30 см, что позволяет, превратить их в гранулированную массу, через которую относительно легко проникают вода, воздух и бактерии. Предварительно шламами, содержащими до 4,5 % пирита, орошают разбавленным раствором H_2SO_4 при расходе кислоты 1.5 кг на I т шлама с целью их подкисления до pH 2-3, что благоприятствует развитию бактерий и стабилизирует структуру рыхлых гранул. Внесение бактерий в разрыхленный шлам рекомендуется производить путем орошения ею бактериальным раствором или же смешиванием первичного шлама с ранее окисленным (поверхностным) сдоем шлама (3-4 см) в соотношении 10:1. Подготовленный шлам собирают в кучи, орошают водой до влажности около 15 % и выдерживают 60 сут. для обеспечения необходимой полноты окисления минералов. Затем его выщелачивают водой с целью извлечения урана. Остаток шлама после нейтрализации отправляют для извлечения золота. Описанным способом извлекается до 86-88 % урана и 60 % золота.

Применительно к упорным золотосодержащим рудам технология кучного бактериального выщелачивания (КБВ) предполагает в качестве осязательной подготовительной операции тонкое измельчение руды и ее агломерацию (окомкование. брикетирование) с использованием специальных связующих материалов и с одновременной пропиткой гранул (брикетов) бактериальными растворами.

Согласно патенту [3], пиритную или арсенопиритную руду с тонковкрапленным золотом измельчают, пропитывают раствором, содержащим соответствующие бактерии (доля раствора составляет 4-12 % от массы руды), брикетируют и укладывают в кучи высотой 180 см. После этого осуществляют выщелачивание руды кислыми растворами (pH менее 2.5) в течение 200 и более суток с принудительной рециркуляцией растворов. В другом американском патенте [4] предложен способ КБВ сульфидных глинистых руд (в том числе - золотосодержащих), при котором руда подвергается предварительной агломерации с использованием в качестве связующего - водного раствора акриламидного полимера с молекулярной массой более 500 тыс. (смесь акриламида с N-сульфоалкил-акриламидом). Раствор содержит более 1 г/л Fe^{3+} и имеет pH менее 3.

По способу, описанному в [5], частицы измельченной золотосодержащей руды агломерируют в комочки с помощью кислого раствора водорастворимого полимера ($1.3<pH<2,5$), содержащего серуокисляюшие бактерии. Агломерированную руду укладывают в кучу и подвергают бактериальному выщелачиванию в течение 30-210 сут.

Первым промышленным предприятием, применившим технологию БВ - цианирование, является рудник Фэйвью. В течение длитель-

ного времени (начиная с 1955 г.) переработка упорных золотосодержащих концентратов на руднике осуществлялась с использованием технологии окислительный обжиг - цианирование, обеспечивающей извлечение золота из концентратов на уровне 90 %.

По разработкам фирмы "Дженкор" построена и в 1994 г. введена в эксплуатацию фабрика по переработке сульфидных золотосодержащих концентратов методом биоокисления с последующим цианированием на крупнейшем золотодобывающем предприятии Ганы - Ашанти (рудник Обуоси, 3 линии BIOX с 3-мя параллельно работающими реакторами вместимостью по 900 м^3).

В 1990 г. в США, штат Невада, компаниями "Ю.С.Голд Корпорейшн" и "Хоумсток Майнинг" на новой фабрике Тонкий Спрингс осуществлено первое в стране промышленное внедрение биогидрометаллургической технологии извлечения золота из упорных сульфидных руд с исходным содержанием золота 3,9 г/т. Технология включает бактериальное вскрытие измельченной руды в чанах-реакторах из нержавеющей стали диаметром 16 и высотой 13 м с использованием бактерий T.f. Последующее извлечение золота из продуктов БВ производится методом сорбционного выщелачивания в присутствии активированного угля. Производительность фабрики по руде составляет 1500 т в сутки, извлечение золота из руды 90 %, годовая добыча металла 1,5 т [6].

В этом же году технология биоокисления сульфидов внедрена на другой американской фабрике Остин. Производительность фабрики по руде 900 т в сутки. Содержание золота в руде 6,9 г/т. Биоокислению подвергается золотосодержащий флотационный концентрат (90-170 г Au на 1 т). Выщелачивание производится с использованием нескольких культур бактерий. Продолжительность обработки 120 ч. Пульпа БВ подвергается нейтрализации известью и цианированию по методу "CIL". Извлечение золота в гидрометаллургическом цикле составляет 90 % (на 20 % выше, чем при прямом цианировании концентратов).

В Канаде компаниями "Джайент Бей" и "Джайент Иеллоунайф" на фабрике Салмита в 1987 г. создана опытно-промышленная установка БВ производительностью 10 т/сут руды, предназначенная для демонстрации возможностей биогидрометаллургической технологии извлечения золота из упорных руд и отработки отдельных элементов указанной технологии. На руде с исходным содержанием серы 0,95 %, мышьяка 0,75 % и золота 21 г/т достигнуто извлечение металла 95,6 %, что примерно на 30 % превышает извлечение при прямом цианировании руды.

В Австралии технология БВ - цианирование впервые применена на фабрике Хэрбур Лайте, перерабатывающей методом флотации упорные пирит - арсенопиритовые руды с дисперсным золотом.

Учитывая вышесказанное, ведущими фирмами мира ведутся работы по расширению областей применения технологии БВ - планирование, в том числе - и к неокисленным сульфидным золотосодержащим рудам с низким содержанием металла. Так, например, компания "Ньюмонт Голд" (США) осуществила прирост запасов золота к концу 2004 г. на 55 т за счет вовлечения в переработку по схеме БВ - цианирование забалансовых и некондиционных руд. Определенные перспективы в этом плане связаны с освоением технологии кучного BIOX.[7]

Фирма "Лонро" (Великобритания) активно участвует в разработке проекта создания совместного предприятия по переработке биогидрометаллургическим методом упорных руд одного из крупных золоторудных месторождений Узбекистана с использованием технологии "Дженкор".

В России работы в области кучного бактериального выщелачивания золотосодержащих руд проводятся с начала 70-х годов. Были выполнены значительные объемы экспериментальных исследований и доказано технологическая и технико-экономическая эффективность промышленного освоения кучного выщелачивания на ряде предприятий регионов страны.

Впервые работы в области био-и геотехнологии золота в СССР были начаты в институте «Иргиредмет» в начале 70-х годов по инициативе и под руководством А.С. Черняка. В последующее время это новое направление получило дальнейшее развитие в ряде НИИ и ВУЗов страны под руководством его учеников.

На основе разработанных Иргиредметом (с участием ИНМИ РАН и ЦНИГРИ) технологических регламентов и с учетом имеющегося мирового опыта осуществлено проектирование и строительство первой в Российской Федерации фабрики ВЮХ для переработки золотосодержащих концентратов, выделяемых из коренных руд Олимпиадинского месторождения.

Основные результаты исследований Иргиредмета по биогидрометаллургическому

вскрытию и выщелачиванию упорных золотосодержащих минералов, концентратов и руд, выполнены институтом в рамках проекта «Биогеотехнология золота и серебра» государственной научно-технической программы «Новейшие методы биоинженерии» в период 1988-1993 г.г. Биохимическое вскрытие золотосодержащих сульфидов (пирит, арсенопирит и др.) с использованием автотрофных серу- и железоокисляющих бактерий типа Thibacillus ferrooxidans (Th. ferr.) в настоящее время рассматривается в качестве одного из наиболее эффективных способов подготовки упорных золотых руд и концентратов к последующей гидрометаллургической переработке цианированием. Эффективность данного процесса подтверждена опытом работы некоторых предприятий ЮАР, США, Бразилии и других стран. Безусловный интерес технология бактериальное выщелачивание — цианирование представляет и для отечественной золотодобывающей промышленности в связи с большим объемом переработки упорного золоторудного сырья. В этом выполненные в Иргиредмете работы по проблеме биогидрометаллургического извлечения золота и серебра из упорных руд имеют определенное научное и практическое значение. В проведении указанных исследований, кроме авторов статьи, принимали участие специалисты Иргиредмета: Лодейщиков В.В. Горбунов П.Д.,Дементьев В.Е., Дементьева Н.А., Дружина Г.Я., Малышева А.С., Парадина Л.Ф., Синакевич А.А., Смагунов В.Н., Смагунов Н.В., Строганов Г.А., Фурсова И.Л., Хлебников Б.И., Храмченко С.И., Шкетова Л.Е. и др.

Ученые изучили поведение мономинеральных фракций золотосодержащих сульфидов в условиях бактериального выщелачивания. Выявлен ряд окисляемости сульфидов: пирротин (наиболее легко окисляемый сульфид), далее — арсенопирит, антимонит, пирит, сфалерит, халькопирит, галенит. Методами фазового (химического), минералогического, рентгеноструктурного и микрорентгеноспектрального анализа установлено, что продукты бактериального вскрытия характеризуются, как правило, сложным вещественным составом. Наличие в них значительного количества вторичных соединений железа, мышьяка, сурьмы, а также элементарной серы и недоокислившихся сульфидов затрудняет протекание микробиологического выщелачивания и последующего цианирования продуктов БВ. показано, что некоторые из образующихся соединений обладают заметной сорбционной активностью по отношению к цианистым комплексам золота и серебра и способностью поглощать кислород и свободный цианид из растворов. Доказано, что продуктам бактериального вскрытия сульфидов присущи признаки обеих форм химической депрессии золота и серебра в цианистом процессе, что обуславливает необходимость соблюдений специальных режимов цианирования и применения дополнительных операций подготовки золотосодержащих остатков БВ к последующему выщелачиванию.

Опыт работы первых предприятий, применивших технологию БВ - цианирование, а также результаты многочисленных технологических испытаний и экономических расчетов позволили в значительной степени преодолеть имевшее место ранее некоторое недоверие к этой технологии.

На основании анализа технико-экономических показателей и опыта работы предприятий, применяющих бактериальное выщелачивание, а также результаты экспериментальных исследований, большинство зарубежных и отечественных экспертов в последние годы склоняются к мнению, что биогидрометаллургическая технология в перспективе может занять ведущее место среди возможных методов металлургической переработки упорного сульфидного золоторудного сырья.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Меритуков М.А., Орлов А.М. Металлургия благородных металлов. Зарубежный опыт.- М: Металлургия, 1991. - 416 с.
2. Livesey-Goldblatt E. Bacterial leaching of Gold, uranium, pyrite tearing compacted mine tailing slimes // Fundam. and Appl., Biohydromet. Proc. 6 Int. Symp Biohydromet. (21-24 Aug., Vancouver, 1985).- Amsterdam e. a., 1986.- P.89-96.
3. Пат. 5246486 США, МКИ[5] С 22 В 11/00. Biooxidation process for recovery of gold from heaps of law-grade sulfidic and carbonaceous sulfidic ore materials /1. A. Brier1ey, D.L. Hi11; Newmont Gold Co.; Newmont Mining Corp. .- № 78521; Заявл.18.10.92; Опубл. 21.9.93; НКИ 75/743.
4. Пат. 5196052 С.Ч11А. МКИ[5] С 01 G5/00. Bacterial-assisted heap leaching of ores /A.E.Gross. C.J.S. Gomer; Nalco Chemical Co.- № 901508; Заявл. 19.06.92: Опубл. 23.03.93;НКИ75/712.

5. Пат. 5332559 США, МКИ[5] С 22 В 11/00. Biooxidation process for recovery of metal values from sulphur-containing ore materials / J.A.Briertey, D.L. Hil1; Newmont Gold Co.; Newmonl Mining Corp..- №894059; Заявл. 3.6.92; Опубл. 26.7.94; НКИ 423/27.
6. Bacterial Oxidation at Tonkin Springs // Mining J.- 1990.- 314. № 8068.- P.335, 337, First commercial bioleaching plant in US preparates for start up // Mining Eng. 1989.-41,№5.-P.281.
7. Bio-leach breakthrough announced // Eng. and Mining J.- 1994.-195, № 5.- P. 13., Newmont proves its gold bugs // Mining Mag..- 1994.-170, J. - 4.- P.I 89.

Мельниченко О.В., Цыбульский В.С., Чикиркин О.В. УДК 656.224

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В КОНТАКТНОЙ СЕТИ С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ ОТКАЗОВ ЭЛЕКТРОННОГО И СИЛОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОВОЗА

Применение тиристорных выпрямителей в статических преобразователях электровозов однофазно-переменного тока в России и за рубежом дало возможность производить управление коллекторными тяговыми двигателями путем плавной регулировки напряжения на них. Это осуществляется изменением моментов отпирания соответствующих плеч выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП) электровоза в пределах периода питающего напряжения. Однако, эксплуатация таких электровозов наряду с достоинствами силовых схем тиристорных преобразователей выявила и ряд их недостатков по сравнению с электровозами, оборудованными неуправляемыми полупроводниковыми диодами. Вопросы надёжности работы технических средств электровозов всегда были актуальными, и им уделялось большое внимание в многочисленных научных исследованиях [1].

Для российских железных дорог разработаны стратегические направления научно-технического развития ОАО «Российские железные дороги» на период до 2015 года («Белая книга» ОАО «РЖД») № 964 от 31 августа 2007 года. Приоритетными задачами стали разработка и внедрение, более совершенных технологий, направленные на повышения надёжности работы электрооборудования тягового подвижного состава.

В этой стратегии вопрос повышения качества электроэнергии в системе электроснабжения занимает первое место, так как напрямую от качества электрической энергии зависит эксплуатационный ресурс технических средств всего железнодорожного хозяйства. В связи с возрастающим грузооборотом и пассажирооборотом магистральных железных дорог переменного тока, к качеству электрической энергии предъявляются все более жесткие требования. Это связано с установленной системой сертификации качества электроэнергии как направления, влияющего на технический ресурс технических средств народного хозяйства согласно ГОСТ-13109-97.

Искажение синусоидальной формы напряжения в контактной сети оказывает влияние, как на эксплуатационные характеристики электровозов, так и на систему тягового электроснабжения. Так, высшие гармоники напряжения, генерируемые электровозом, приводят к появлению добавочных потерь в обмотках вспомогательных машин электровоза, что снижает их эксплуатационный ресурс.

В силовом трансформаторе гармоники напряжения вызывают увеличение потерь на гистерезис, то есть потерь, связанных с вихревыми токами в стали и потерь в обмотках, а также повышает затраты электроэнергии на тягу поездов [1]. Влияние несинусоидальности напряжения на индукционные и электронные приборы учета электроэнергии, потребляемой электровозом, приводит к увеличению погрешности результатов измерений этих приборов. Гармоники нарушают надёжность работы устройств защиты и ухудшают их эксплуатационные характеристики. При этом наиболее распространенными являются ложные срабатывания, которые наиболее вероятны в работе систем защиты, основанных на измерении сопротивлений. На рис. 1 показаны основные устройства, подверженные негативному влиянию тяговой сети переменного тока. Низкое качество электроэнергии приводит к сокращению срока службы изоляции электрических машин и аппаратов, к низкой надёжности работы СЦБ, АЛСН, к сбоям в работе систем управления преобразователями электровоза, релейной защиты, автоматики, телемеханики, связи и вычислительной техники.

По данным ОАО «РЖД» ущерб отказа технических средств от невыполнения требований ГОСТ 13109-97 составил порядка 1,2 млрд. рублей по сети железных дорог. Это определяет актуальность и экономическую значимость данной проблемы.

Согласно штатному алгоритму работы системы управления, современных электровозов переменного тока коммутация во всех выпрямительно-инверторных преобразователей происходит одновременно. В момент начала коммутации часть обмоток тягового трансформатора каждой секции электровозов начинает работать в режиме короткого замыкания. Одновременное начало коммутации всех преобразователей обусловливает резкое уменьшение напряжения на токоприемнике. Однако мгновенного уменьшения напряжения не происходит, так как вследствие наличия в тяговой сети распределенных индуктивностей и емкости возникают свободные колебания напряжения (первый закон коммутации). Любая контактная сеть представляет собой замкнутый колебательный контур (RLC — цепи) (рис.2).

Представленная схема состоит из каскадно-соединенных Т-образных симметричных четырехполюсников, которые в свою очередь моделируют погонные параметры системы (индуктивность контактной сети, активное сопротивление, распределенная емкость относительно земли и сопротивление, обусловленное током утечки с проводов линии и изоляторов).

Физическая сущность искажения синусоидальности переменного напряжения заключается в возникновении режима короткого замыкания цепи переменного тока (обмоток трансформатора) в интервалы коммутации токов тиристоров выпрямителя, в результате которого на этих интервалах происходит провал в кривой синусоидального напряжения (рис. 3). Эти провалы искажают форму кривой напряжения и приводят к возникновению высших гармонических составляющих, наибольшими из которых являются нечётные 3, 5, 7, 9, 11 и 13-я и т.д. гармоники, которые значительно влияют на надёжность работы технических средств.

В процессе протекания коммутаций γ_1 и γ_2 электромагнитная энергия, накопленная в индуктивности обмоток трансформатора, передается в контактную сеть. В результате происходит колебательный процесс между индуктивностью задействованных в большом и

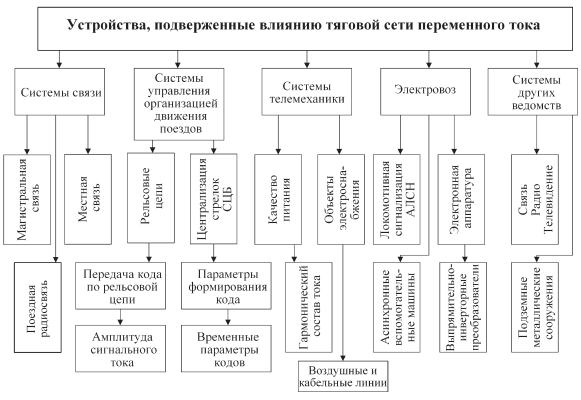


Рис. 1. Влияние качества электрической энергии на надёжность и ресурс работы железнодорожных устройств и других объектов

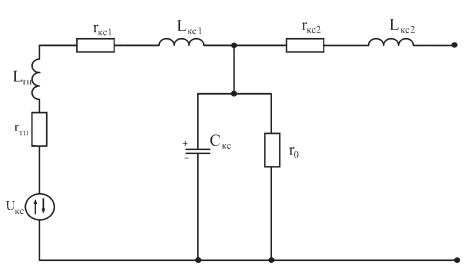


Рис. 2. Схема замещения тяговой подстанции и контактной сети с её распределёнными параметрами

малом контурах коммутации секциях трансформатора электровоза и распределенной емкостью контактной сети. Частота коммутационных и послекоммутационных колебаний напряжения и их амплитуда зависят в основном от расстояния между тяговыми подстанциями и от способа питания межподстанционной зоны (одностороннее или двустороннее).

Работа электровоза в типовом и предлагаемом режиме была смоделирована при помощи программы OrCad 9.2. Модель электровоза являет собой приближенную к реальным условиям схему. Работа схемы электровоза в реальном и моделированном варианте была проанализирована и погрешность ошибки составила 8%. Таким образом, полученные результаты вычислений при работе электронной модели можно считать достоверными.

Анализируя данным образом работу электровоза, на четвертой зоне регулирования, в особо неблагоприятных условиях (при работе электровоза в вынужденных режимах системы электроснабжения) получена следующая диаграмма напряжения контактной сети (рис. 4).

Одним из средств повышения надёжности электрооборудования в эксплуатации и уменьшения амплитуды, коммутационных и послекоммутационных, колебаний предлагается разработанный способ управления ВИП, использующий алгоритм одновременной коммутации токов тиристоров с применением диодного плеча, включенного параллельно цепи выпрямленного тока.

Этот алгоритм управления состоит в том, что подача нерегулируемых импульсов управления с фазой α_0 осуществляется одновременно в каждом полупериоде напряжения не только на тиристоры плеч, участвующих в создании данной зоны, но и плеч, которые участвовали в работе предыдущих зон, кроме первой.

Это разбивает большой контур протекания тока коммутации, образованный плечами VS1 и VS7, на несколько малых. Диодное плечо, включенное параллельно цепи выпрямленного тока служит для разряда энергии, накопленной в тяговых двигателях и сглаживающем реакторе при смене полярности питающего напряжения без отдачи ее во внешнюю сеть и полезно используемой в тяговых двигателях. Оно также является средством, которое способствует созданию нормальных потенциальных условий на анодах тиристоров, необходи-

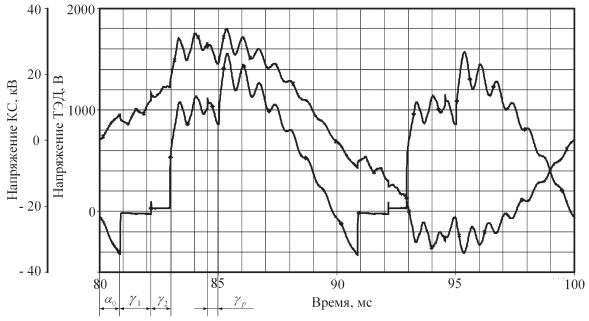


Рис. 3. Электромагнитные процессы напряжения в контактной сети и выпрямленного напряжения тягового двигателя при работе электровоза в режиме тяги (при типовом способе управления)

мых для надежного работы плеч ВИП электровоза в эксплуатации при малых углах α_0 (рис. 5).

В качестве сравнения на рис. 6 показаны гармонические составы напряжения на токоприемнике электровоза для рассматриваемых алгоритмов управления ВИП со 2-й по 40-ю гармонику.

Из гистограммы видно снижение амплитуд нечетных гармоник во всем рассматриваемом диапазоне частот, что определяется снижением коммутационных и послекоммутационных колебаний напряжения. Особенно эффективным является снижение гармоник в диапазоне с 9 по 29. Работа представленного алгоритма совместно разработана учеными Иркутского и Дальневосточного университетов путей сообщения [2, 3].

Однако, используя данный алгоритм управления, задачу улучшения качества напряжения в контактной сети удалось решить только при протекании основной коммутации тока тиристоров плеч ВИП. При фазовом регулировании на каждой зоне (дополнительной коммутации при управлении импульсами α_p) свободные колебания остались без изменения и могут в амплитуде достигать напряжения пи-

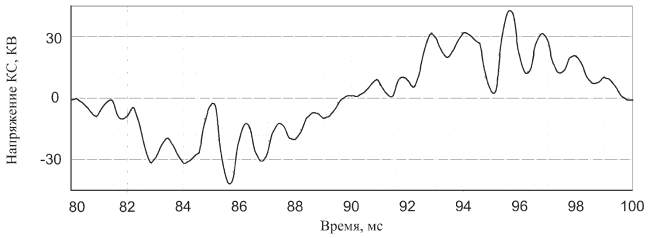


Рис. 4. Диаграмма напряжения в контактной сети, при часовом режиме работы ТЭД на 3,5 (α_p = 90) зоне регулирования напряжения ВИП

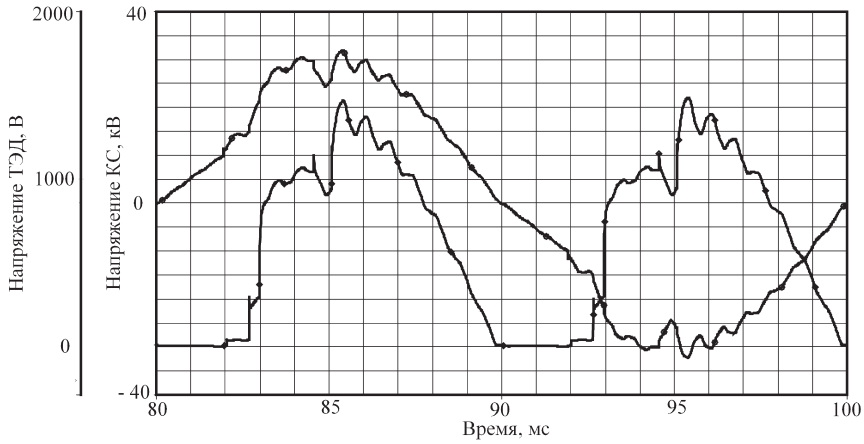


Рис. 5. Электромагнитные процессы напряжения в контактной сети и выпрямленного напряжения тягового двигателя электровоза при способе управления с включением разрядного диода

тающей сети, особенно при $\alpha_р = 90$ эл. град.

Указанный недостаток ставит задачу дополнительного улучшения формы кривой напряжения контактной сети при работе электровозов с тиристорными преобразователями при фазовом регулировании напряжения во всех четырёх зонах управления (импульсами с фазой $\alpha_р$) на тяговых электрических двигателях это можно достичь за счет применения разнофазного управления (РФУ) ВИП, предложенного сотрудниками ВНИИЖТа [4, 5].

Идея способа разнофазного управления заключается в разнесении во времени начал, а также окончаний коммутации различных групп преобразователей, что позволяет уменьшить скачок принуждённого напряжения при включении и выключении каждой группы преобразователей и амплитуду свободных колебаний напряжения на токоприёмнике, что повышает устойчивость работы аппаратуры управления электровоза, а также всех систем железнодорожной автоматики и телемеханики, уменьшает помехи в линиях связи.

Но на практике способ разнофазного управления не получил широкого применения, так как разнофазность управления достигается постоянным увеличением угла открытия тиристоров преобразователя α_0 и $\alpha_р$ на 8-9 эл. град., а это в свою очередь значительно сказывается на снижения внешних характеристик преобразователя, а, следовательно, и на снижение коэффициента мощности электровоза 0,817 против 0,84. Мощность электровоза в часовом и продолжительном режиме несколько ниже, чем при типовом способе управления, происходит и некоторое снижение скорости электровоза. К тому же постоянство сдвига угла на 8-9 эл. град. не даёт полного эффекта снижения высокочастотных колебаний напряжения контактной сети из-за изменения индуктивности и ёмкости тяговой сети, что может приводить к периодическому нарушению работоспособности электровоза.

В идеальном случае величина задержки импульсов должна равняться полупериоду собственных колебаний напряжения в тяговой сети. Вследствие различия параметров тяговой сети и меняющегося удаления электровоза от шин тяговых подстанций частота свободных колебаний напряжения на токоприемнике электровоза изменяется. В связи с этим происходит только частичное гашение свободных колебаний напряжения. Таким образом, для наиболее эффективного уменьшения искажений в форме кривой питающего напряжения было бы желательно введение регу-

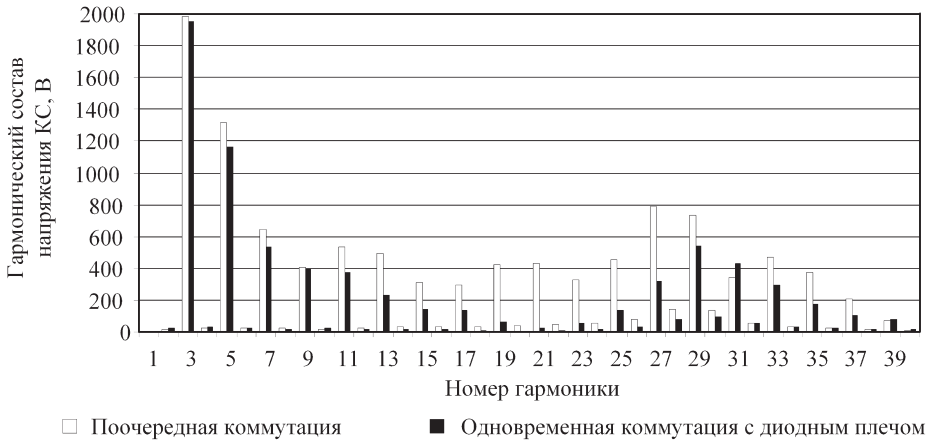


Рис. 6. Гармонические составляющие напряжения на токоприемнике электровоза для рассматриваемых алгоритмов управления ВИП со 2-й по 40-ю гармонику

лируемой задержки именно на полупериод свободного колебания с учётом изменяющихся распределённых параметров контактной сети.

В связи с этим, авторами предлагается использовать одновременную коммутацию с шунтировкой цепи выпрямленного тока электровоза разрядным диодным плечом с разработкой адаптивной системы разнофазного управления по углу α_p. Предлагается производить задержку управления плечами преобразователя, равной полупериоду собственных колебаний напряжения тяговой сети. Это позволит ещё более повысить коэффициент мощности электровоза до 0,88 против 0,84. Собственные колебания напряжения тяговой сети планируется выявлять через спектральный анализ, который позволяет охарактеризовать частотный состав измеряемого сигнала. Преобразование Фурье является математической основой, связывающий временной сигнал с его представлением в частотной области. Преобразования Фурье непрерывного во времени сигнала идентифицируют частоты и амплитуды тех комплексных синусоид (экспонент), на которые разлагаются некоторые произвольные колебания и определяются по формуле

$$\{X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)exp(-j2\pi ft)dt \equiv F\{x(t)\}. \quad (1)$$

Спектральный анализ напряжения контактной сети предполагается производить на базе контроллеров DSP (digital signal processor), обеспечивающих быстрое преобразование Фурье (БПФ).

Напряжение контактной сети через датчик напряжения типа LV-100 поступает на вход блока согласования датчика напряжения с DSP. Последний, по заданному алгоритму осуществляет спектральный анализ гармонических колебаний питающей сети, выделяет гармонику с наибольшей амплитудой и производит расчет изменения угла запаздывания включения плеч ВИП импульсами с фазой α_p. По сигналам БУВИП (блока управления ВИП) происходит чередование и распределение импульсов управления по ВИПам и их плечам.

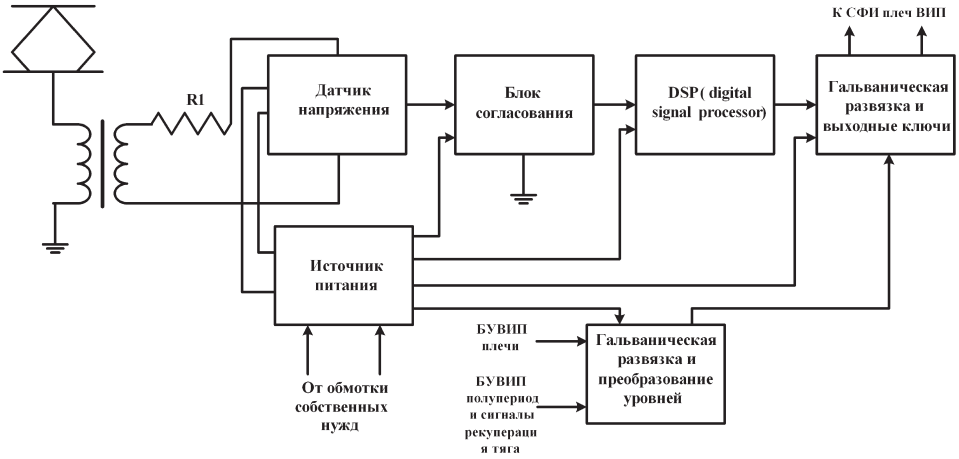


Рис. 7. Структурная схема реализации разнофазного управления плеч ВИП

Структурная схема реализации РФУ, представлена на рис. 7.

Созданная адаптивная система разнофазного управления ВИП электровоза по мнению авторов, позволит независимо от места расположения электровоза на фидерной зоне (изменения параметров контактной сети) максимально выполнять функцию значительного снижения гармоник, соответствующих частотам этих колебаний, и снизить коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения, то есть повысить качество электрической энергии в контактной сети. Для того, чтобы внешняя характеристика ВИП секций электровоза была одинаковой, предлагается чередовать отклонения регулируемого угла для каждой секции, в разные полупериоды (рис. 8).

При использовании представленных выше способов, можно ожидать существенного снижения колебаний и искажений напряжения в контактной сети. На рис. 8 показаны диаграммы напряжения на ТЭД при предлагаемом способе управления и в контактной сети (рис. 9).

Проведены расчет внешней характеристики преобразователя, для различных режимов управления.

1. Типовой вариант регулирования напряжения предполагает

$$U_{d0} = \frac{1}{\pi}\left(\begin{array}{l} -U_{m4}\int_{0}^{\alpha_0}\sin\varphi d\varphi + U_{m3}\int_{\alpha_3+\gamma''}^{\alpha_P+\gamma_P}\sin\varphi d\varphi + \\ +U_{m4}\int_{\alpha_P+\gamma_P}^{\pi}\sin\varphi d\varphi \end{array}\right), \quad (2)$$

где U_{m3} и U_{m4} — соответственно амплитуда напряжения, приложенного со стороны вторичной обмотки тягового трансформатора на 3-ей и 4-ой зонах регулирования;

$\alpha_0, \alpha_3, \alpha_p$ — значение соответственно нулевого, задержанного и регулируемого импульса управления;

γ'', γ_p — соответственно длительность коммутации при подаче задержанного и регулируемого импульсов.

В номинальном режиме существуют потери, выражающиеся в падении напряжения в силовой цепи (ΔU), поэтому:

$$U_{dн} = U_{d0} - \Delta U = U_{d0} - \lambda \frac{2}{\pi} \cdot X_T I_{dн} - \quad (3)$$
$$-(\xi R_T + R_d) \cdot I_{dн} - \Delta U_B,$$

где λ — коэффициент, учитывающий влияние пульсаций;

ξ — отношение амплитудного значения напряжения на вторичной обмотке тягового трансформатора к значению данного напряжения последующей зоны;

X_T, R_T — соответственно индуктивное и активное сопротивления трансформатора;

ΔU_B — падение напряжения в преобразовательной установке;

R_d — активное сопротивление обмоток двигателя.

2. Вариант с разнофазным управлением по секциям, предложенный сотрудниками ВНИИЖТ, предполагает -

$$U_{d0} = \frac{1}{\pi}\left(-U_{m4} \int_{0}^{\alpha_0 + \alpha_{0РФУ}} \sin\varphi d\varphi + U_{m3} \int_{\alpha_3 + \alpha_{3РФУ} + \gamma''}^{\alpha_P + \alpha_{pРФУ} + \gamma_P} \sin\varphi d\varphi + \right.$$
$$\left. + U_{m4} \int_{\alpha_P + \alpha_{pРФУ} + \gamma_P}^{\pi} \sin\varphi d\varphi \right), \quad (4)$$

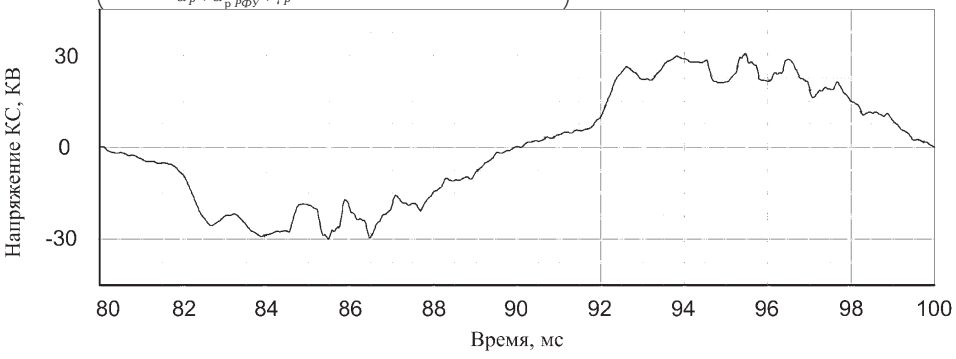


Рис. 9. Диаграмма напряжения в контактной сети при использовании предлагаемых алгоритмов работы ВИП

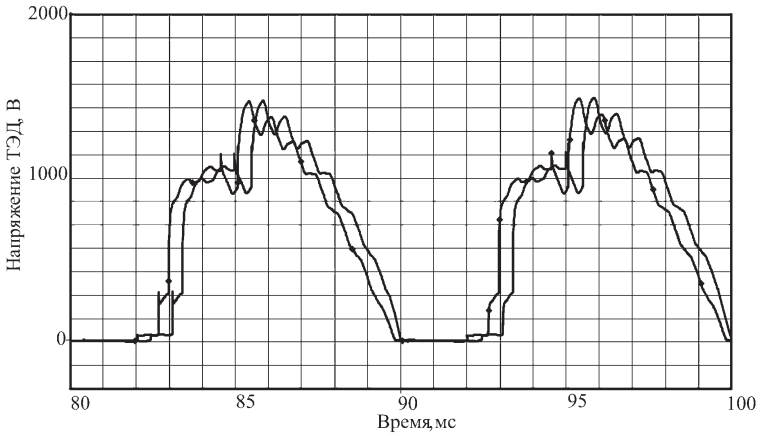


Рис. 8. Диаграмма напряжения на тяговых электрических двигателях разных секций при использовании предлагаемых алгоритмов работы ВИП

где $\alpha_{0РФУ}, \alpha_{3РФУ}, \alpha_{pРФУ}$ — соответственно углы сдвига импульсов для нулевого, задержанного и регулируемого импульсов.

3. По варианту с включением в цепь выпрямленного тока разрядного диода имеем

$$U_{d0} = \frac{1}{\pi}\left(U_{m3} \int_{\gamma}^{\alpha_P + \gamma_P} \sin\varphi d\varphi + U_{m4} \int_{\alpha_P + \gamma_P}^{\pi} \sin\varphi d\varphi \right), \quad (5)$$

где γ — угол, характеризующий сдвиг подачи отпирающего импульса.

4. При варианте с разнофазным управлением по секциям, а также с включением в выпрямленную цепь разрядного диода найдем -

$$U_{d0} = \frac{1}{\pi}\left(U_{m3} \int_{\gamma}^{\alpha_P + \alpha_{pРФУ} + \gamma_P} \sin\varphi d\varphi + U_{m4} \int_{\alpha_P + \alpha_{pРФУ} + \gamma_P}^{\pi} \sin\varphi d\varphi \right), \quad (6)$$

Напряжение в номинальном режиме, для трех последних вариантов, рассчитывается аналогично первому варианту по формуле (3).

На рис. 10 представлена сравнительная внешняя характеристика преобразователя для трех вариантов управления.

При работе электровоза, предлагаемый вариант управления является наиболее приемлемым. Так как в этом случае, несмотря на снижение внешней характеристики (незначительно в сравнении с характеристикой при третьем варианте), существенно улучшаются условия работы электровоза

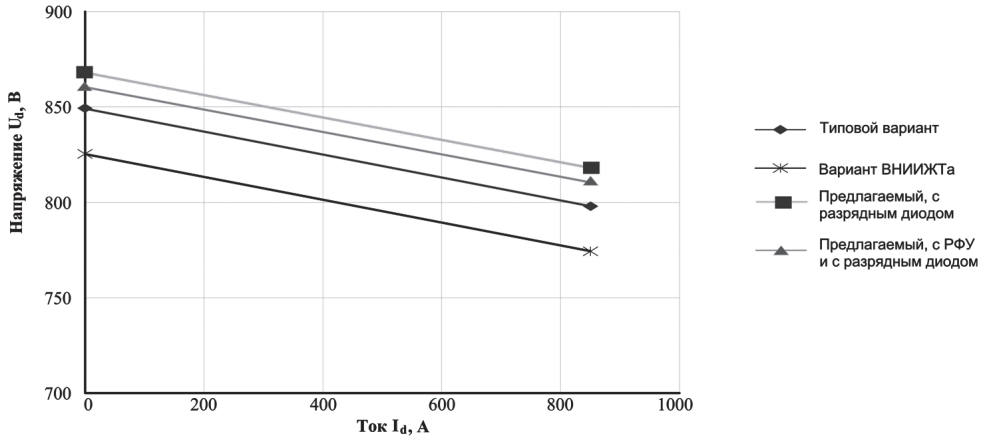


Рис. 10. Сравнительная внешняя характеристика преобразователя при различных режимах управления ВИП электровоза

по качеству напряжения в контактной сети, его электронного оборудования, и электрооборудования, другого оборудования находящегося в непосредственной близости рельсового пути.

Использование новых алгоритмов управления, совместно с адаптивной системой, позволит существенным образом улучшить характеристики напряжений в контактной сети, а, следовательно, снизить негативное влияние на работу электровоза. Повышение качества электроэнергии позволит продлить срок службы изоляции электрических машин и аппаратов, надёжность работы СЦБ, АЛСН, систем управления преобразователями электровоза, релейной защиты, автоматики, телемеханики, связи и вычислительной техники;

Разработанная система адаптивного разнофазного управления, выполняется при поддержке гранта 2008 года Иркутского государственного университета путей сообщения, за научно-исследовательскую работу по прикладным техническим наукам. В настоящий момент в локомотивном депо Иркутск-Сортировочный Восточно-сибирской железной дороге производится модернизация и подготовка к испытаниям электровоза ВЛ80Р №1829.

БИБЛИОГРАФИЯ

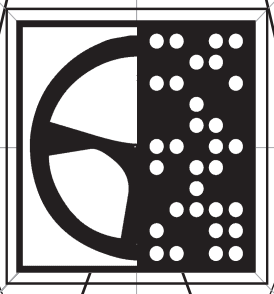
1. Тихменев, Б.Н. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями / Б.Н. Тихменев, В.А. Кучумов — М.: Транспорт, 1988, - 311 с.
2. Власьевский, С.В. Улучшение формы напряжения контактной сети при работе электровозов с тиристорными выпрямителями / С.В. Власьевский, В.Г. Скорик, О.В. Мельниченко // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. 2007. №5. С. 42-47.
3. Власьевский, С.В. Свободные колебания напряжения в контактной сети, вызванные процессами коммутации тиристорных преобразователей электровозов / С.В. Власьевский, В.Г. Скорик, О.В. Мельниченко // Электроника и электрооборудование транспорта. Научно-технический журнал. 2007. №1. С. 14-19.
4. Кучумов, В.А. Технико-экономические показатели тиристорных электровозов переменного тока с разнофазным управлением / В.А. Кучумов, В.В. Находкин, Н.Н. Широченко // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. 1987. №3. С. 15-18.
5. Кулинич, Ю.М. Испытания электровоза ВЛ85 с разнофазным управлением выпрямительно-инверторными преобразователями / Ю.М. Кулинич, В.В. Находкин, Н.Н. Широченко и др. // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. 1986. №4. С. 23-26.

Министерство образования и науки Российской Федерации
Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Иркутский государственный университет путей сообщения
Российская инженерная академия

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование



Раздел 2.

Управление в технических системах.
Моделирование.

Содержание научного журнала:

Инженерная механика
Транспортные средства
Энергетика и электромеханика
Строительство, материалы и конструкции
Охрана окружающей среды
Автоматизация технологических процессов
Современные технологии
Системный анализ
Моделирование технических систем
Транспортные системы
Энергоснабжение и электромеханика
Управление техническими системами
Информационные технологии

Финогенко И.А.

УДК007:531.3

О ПРИНЦИПЕ ДЕКОМПОЗИЦИИ ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С СУХИМ ТРЕНИЕМ

Введение. В теории управления существенное место занимают объекты механической природы, описываемые уравнениями Лагранжа второго рода. Как правило, это нелинейные динамические объекты высокого порядка с сильными перекрестными связями. Типичным примером является многозвенный робот-манипулятор, для которого требуется обеспечить движение схвата по заданной траектории (задача слежения) или его перемещение из заданного начального положения в желаемое конечное положение с последующей стабилизацией (задачи полной управляемости и стабилизации). Здесь характерно значительное динамическое взаимовлияние между звеньями манипулятора, которое характеризуется насыщенностью матрицы коэффициентов инерции соответствующей математической модели. Кроме этого, разнообразие целей управления требует наличие универсальных и многорежимных систем управления механическими объектами, сохраняющих свою структуру независимо от входных данных. На пути решения этих задач Е.С. Пятницким [1] был предложен и впоследствии развит принцип декомпозиции, суть которого заключается в следующем. Синтезируется универсальная двухуровневая иерархическая система управления, первый уровень которой обеспечивает собственно режим декомпозиции при полной компенсации динамического взаимовлияния между элементами системы, а второй - движение в режиме декомпозиции в соответствии с исходной целью управления.

Объектом исследований данной статьи является механическая система с n степенями свободы, движение которой описывается уравнениями Лагранжа второго рода в развернутой векторной форме:

$$A(t,q)\ddot{q} = g(t,q,\dot{q}) + Q^A(t,q,\dot{q}) + Q^T(t,q,\dot{q},N) + u. \quad (1)$$

Здесь используются обычные обозначения для обобщенных координат $q = (q^1,\dots,q^n)$ и обобщенных скоростей $\dot{q} = (\dot{q}^1,\dots,\dot{q}^n)$; $A(t,q) = [a_{ij}(t,q)]_1^n$ - симметричная, положительно определенная $n \times n$ матрица квадратичной формы обобщенных скоростей в выражении кинетической энергии системы в движении относительно инерциальной системы координат. Функции $g(t,q,\dot{q})$ и $Q_i^A(t,q,\dot{q})$ описывают обобщенные активные силы различной природы, действующие на систему; разрывные по переменной $\dot{q}$ функции $Q_i^T(t,q,\dot{q},N)$ описывают обобщенные силы трения скольжения, которые в соответствии с законом Кулона выражаются через коэффициенты трения и модули нормальных реакций (см. более детально [2]). Векторная функция $u = (u_1,\dots,u_n)$ задает обобщенные управляющие силы. На управления u_i накладываются ограничения вида

$$|u_i| \le H_i(t,q,\dot{q}), i = 1,\dots,n, \quad (2)$$

где $H_i = H_i(t,q,\dot{q}) > 0$ - максимальные ресурсы управления.

В упомянутых выше работах Е.С. Пятницкого (см. также [3]) при условии отсутствия сил трения $Q^T = 0$ структура управлений u_i определяется решением задачи синтеза систем управления механическими системами на основе принципа декомпозиции следующим образом.

Пусть требуется найти такие управления u_i, которые в рамках некоторых дополнительных предположений обеспечивали бы достижение движениями системы (1) пересечения многообразий (целевого множества) вида

$$S_i = \left\{ \left(t,q,\dot{q}\right) \in \Omega : \phi_i\left(t,q,\dot{q}\right) = 0 \right\}, i = 1,\dots,n. \quad (3)$$

В качестве меры отклонения движений системы (1) от множеств (3) выбирается положительно определенная квадратичная относительно функций $\varphi_i(t,q,\dot{q})$ форма:

$$v_\varphi = \frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{n} a_{ij}(t,q)\varphi_i\varphi_j \quad (4)$$

Управления u выбираются из условия минимума производной $\dot{v}_\varphi$ в силу системы (1) (являются оптимальными по отношению к демпфированию функции v_φ). Это приводит с уче-

том ограничений (2) к релейным управлениям вида

$$u_i = -H_i \ sign\, \chi_i, i = 1,\dots,n$$

при условии $\chi_i \neq 0$, где $\chi_i = \chi_i(t,q,\dot{q})$ - некоторые непрерывно-дифференцируемые функции. Наиболее исследован случай $\varphi_i = \dot{q}^i - f_i(t,q)$, для которого получаем закон управления в виде $u_i = -H_i\, sign(\dot{q}^i - f_i(t,q))$. При определенных условиях [1] (см. также [3]- [6]) эти управления стабилизируют движение по целевому множеству, а выбор функций $f_i(t,q)$ обеспечивает достижение исходной цели управления. В данной работе принцип декомпозиции Е.С. Пятницкого обосновывается для системы (1) с целевым множеством (3) при наличии в ней сил трения.

Разумеется, кроме перечисленных выше задач можно одновременно ставить задачи оптимизации каких-либо критериев, например, минимизации энергии, работы или быстродействия. Однако это требует уже привлечения теории оптимального управления и может привести к существенно иным результатам. Так исследования проведенные в [7] по перемещению звена манипулятора из одного положения в другое с минимальной работой показали на основе вариационного принципа максимума, что оптимальное управление содержит импульсные составляющие, а в промежутке между моментами приложения импульсных воздействий движение осуществляется с постоянной угловой скоростью $\dot{q} = \nu$. Можно полагать, что это равенство определяет некоторое целевое множество движения манипулятора, но задачи синтеза систем управления на принципе декомпозиции с импульсами практически не исследовались.

Управляемые механические системы с сухим трением. Отметим, что система (1) представляет собой систему дифференциальных уравнений с разрывной правой частью. Теория таких уравнений к настоящему времени хорошо развита (см. [8]) на основе теории дифференциальных включений. Однако в данной ситуации система помимо разрывной неуправляемой характеристики Q^T (сухого трения) содержит также управление u, которое в силу наложенных на него ограничений принимает значения в некотором ограниченном выпуклом множестве. Это обстоятельство требует дополнительного рассмотрения вопроса о понятии решения системы (1). Но предварительно опишем процедуру синтеза управления для системы с трением на принципе декомпозиции.

Введем в рассмотрение многозначную функцию $\overline{Q}^T(t,q,\dot{q})$, представляющую собой в точке $(t,q,\dot{q})$ наименьшее выпуклое замкнутое множество (выпуклую оболочку), содержащее все предельные значения функции $Q^T(t,q,\dot{q})$ в этой точке. В соответствии с основными методами теории дифференциальных уравнений с разрывными правыми частями от системы (1) перейдем к дифференциальному включению

$$A(t,q)\ddot{q} \in g(t,q,\dot{q}) + Q^A(t,q,\dot{q}) + \overline{Q}^T(t,q,\dot{q}) + u. \quad (5)$$

Для простоты изложения будем рассматривать квадратичную форму (4) с функциями $\varphi_i = \dot{q} - f(t,q)$. Для включения (5) минимум производной этой квадратичной формы по всем управлениям $|u_i| \le H_i$ зависит от выбора точки $w \in \overline{Q}^T(t,q,\dot{q})$, однако значение этого минимума всякий раз достигается на одном и том же управлении

$$u_i = -H_i\, sign(\dot{q}^i - f_i(t,q)) \quad (6)$$

Это обстоятельство корректно решает задачу синтеза системы управления первого уровня в виде (6). Отметим, что управление вида (6) обладает универсальностью в том смысле, что сохраняет свою структуру для различных целевых множеств, с помощью которых предполагается решать исходную задачу управления - задачу стабилизации или задачу слежения. Кроме того, реализация таких управлений требует минимальной информации о входных данных - знаков значений функций $\varphi_i = \dot{q}^i - f_i(t,q)$.

Прежде чем записать условия реализуемости и устойчивости движения по целевому множеству введем понятие решения системы (1) с управлениями (6). Для управляемых систем под решением обычно понимается пара функций, одна из которых в каждый момент времени t задает состояние системы, а вторая - управление. Поэтому применительно к управляемым механическим системам () под решением будем понимать набор $(q(t),\dot{q}(t),u(t))$, где функция $t \to (q(t),\dot{q}(t))$ абсолютно непрерывна, функция $t \to u(t)$ - измерима и почти всюду выполняются соотношения

$$A(t,q(t))\ddot{q}(t) \in g(t,q(t),\dot{q}(t)) +$$

$$+Q^A(t,q(t),\dot{q}(t)) + \overline{Q}^T(t,q(t),\dot{q}(t),G) + u(t)$$

При этом требуется

$u_i(t) = -H_i\, sign(\dot{q}^i(t) - f(t,q(t)))$, если

$\dot{q}^i(t) - f_i(t,q(t)) \neq 0$, и $u_i(t) \in [-H_i, H_i]$, если $\dot{q}^i(t) - f_i(t,q(t)) = 0$. Иными словами значения функций $u_i(t)$ совпадают со значениями позиционных управлений (6) для тех моментов t, в

которых они определены и непрерывны, а в точках их разрыва значения $u_i(t)$ лежат между максимально возможными значениями управлений (6) и в общем случае задаются неявно. Такое понятие согласуется с общепринятым понятием решения для разрывных управляемых систем.

Неравенства, обеспечивающие асимптотическую устойчивость целевого множества без учета сухого трения, имеют вид (см. [4]):

$$\left|\sum_{k=1}^{n} a_{ik}\left(\frac{\partial f_k}{\partial t}+\sum_{j=1}^{n}\frac{\partial f_k}{\partial q_j}f_j\right)-[g_i+Q_i^A]\right|_{\dot{q}=f(t,q)} < \quad (7)$$
$$< H_i, i=1,\ldots,n.$$

Для системы (1) с сухим трением соответствующие неравенства принимают следующий вид:

$$\max_{w\in\overline{Q}^T}\left|\sum_{k=1}^{n} a_{ik}\left(\frac{\partial f_k}{\partial t}+\sum_{j=1}^{n}\frac{\partial f_k}{\partial q_j}f_j\right)-[g_i+Q_i^A+w]\right|_{\dot{q}=f(t,q)} <$$
$$< H_i, i=1,\ldots,n. \quad (8)$$

Суть неравенств (7) и (8) состоит в том, что они влекут дифференциальное неравенство $\dot{v}_\varphi \le -l\sqrt{v_\varphi}$ с некоторой константой $l>0$. Интегрируя это неравенство, получаем оценку для квадратичной формы отклонения решений системы от целевого множество в виде: $\sqrt{v_\varphi(t)} \le \sqrt{v_\varphi(t_0)} - l(t-t_0)/2$ для всех $t \ge t_0$. Из нее сразу же вытекает, что $v_\varphi(t)=0$ для всех $t \ge t_0+T$ с некоторым числом $T>0$. Таким образом, устанавливается не только асимптотическая устойчивость целевого множества, но и достижение его решениями системы за конечный промежуток времени.

Отметим, что невыполнение неравенств (8) может привести к тому, что режим декомпозиции может оказаться не только неустойчивым, но и нереализуемым. С физической точки зрения это будет означать, что ресурсов управления недостаточно для преодоления сил сопротивления внешней среды. Для систем с трением в этой же ситуации возникают множества неизолированных положений равновесия ("зоны застоя") в сколь угодно малой окрестности целевого множества, из которых управляющие силы вывести систему не могут. Влияние на динамику системы в режиме декомпозиции "зон застоя" в общем случае не изучено и является весьма нетривиальной задачей. Возникающие проблемы рассмотрим на примере простейшего линейного осциллятора с трением.

Пример. Тело, рассматриваемое как материальная точка массы m, движется по горизонтальной прямой Ox по действием упругой силы пружины с коэффициентом упругости k и точкой ненапряженного состояния $x=0$. Предполагается, что на тело действует сила тяжести $P=mg$ и сила сухого трения Кулона $F=-fPsign\dot{x}$ при условии $\dot{x}\neq 0$; f - постоянный коэффициент трения. Уравнение движение системы запишется в виде:

$$m\ddot{x} = -kx + F + u, \quad (9)$$

где управляющая сила u подлежит определению. Целью управления является стабилизация системы в положении равновесия $\dot{x}=0, x=0$.

Система (9) без управляющего воздействия u обладает "зоной застоя" вида $L=\{(x,0):|x|\le fP/k\}$. Это отрезок на оси Ox, содержащий начало координат фазовой плоскости системы и состоящий из множества неизолированных положений равновесия. Поведение системы (9) при условии $u=0$ легко анализируется. Ее траекториями являются полуэллипсы, расположенные выше и ниже оси Ox с центрами на концах отрезка застоя. Амплитуда колебаний системы уменьшается с арифметической прогрессией и через конечное время тело останавливается в состоянии, которое может оказаться любой точкой "зоны застоя" (см. [9]). Для достижения поставленной выше цели управления управляющая сила u должна, во-первых, преодолевать силу трения в "зоне застоя" и, во-вторых, обеспечивать асимптотически устойчивое движение системы в положение равновесия $(0,0)$ - середину отрезка L. Решение первой задачи зависит ограничения на ресурс управления $|u|\le H$, а второй - от выбора целевого множества, которое определим в виде: $S=(x,\dot{x}):\dot{x}+ax=0$. При движении по множеству S система будет экспоненциально приближаться к положению $(0,0)$ и тем самым цель управления будет считаться достигнутой. Скорость движения по множеству S определяется параметром $a>0$, который может выбираться произвольно. Скорость переходного процесса (время перехода в движение по множеству S) зависит от ресурса управления H. В соответствии с принципом декомпозиции управление возьмем в виде $u=-Hsign(\dot{x}+ax)$. Тогда уравнение (9) движения системы запишется в виде:

$$m\ddot{x} = -kx - fPsign\dot{x} - Hsign(\dot{x}+ax). \quad (10)$$

Проведем детальный анализ динамики системы (10) в зависимости от соотношения между пороговой величиной силы трения fP и ресурса управления H.

1. Полагая $\ddot{x}=0$ и $\dot{x}=0$ находим, что система (10) имеет "зону застоя" $|x|\le (fP-H)/k$ на оси Ox при условии $H<fP$. Это отрезок, содержащий цель управления - начало координат (0,0) фазовой плоскости $(x.\dot{x})$. Цель управления не достигается, а положение равновесия (0,0) не является асимптотически устойчивым ни при каком выборе управления с ограничением $|u|\le H$. Таким образом, необходимым условием решения поставленной выше задачи стабилизации системы в начале координат фазовой плоскости является неравенство $H \ge fP$: сила трения не должна превышать ресурс управления. Отметим, что в этом случае положение равновесия (0,0) единственно.

2. Теперь покажем, что неравенство $H \ge fP$ полностью решает задачу стабилизации для уравнения (10) на принципе декомпозиции. Точнее: в случае когда управления превышает силу трения неравенство (8) нетривиальным образом выполняется и в окрестности начала координатной фазовой плоскости $(x,\dot{x})$ реализуем асимптотически устойчивый режим декомпозиции $\dot{x}+ax=0$.

Действительно, учитывая, что на прямой $\dot{x}+ax=0$ выполняется условие $sign\dot{x}=-signx$, неравенство (8) для уравнения (10) приобретает вид:

$$|(a+k)x-fPsignx|<H \qquad (11)$$

Простой анализ этого неравенства показывает, что оно в случае $H>fP$ определяет полосу на фазовой плоскости, содержащей внутри себя начало координат - цель управления, и тем самым обеспечивает реализуемость и асимптотическую устойчивость движения по прямой $\dot{x}+ax=0$ в окрестности начала координат.

Если же $H<fP$, то неравенство (11) полосе $|x|<(fP-H)/(a+k)$ перестает выполняться и, также как и выше, в системе (10) на оси Ox возникает "зона застоя", определенная неравенством $|x|\le (fP-H)/k$. Записывая уравнение (10) в виде

$$m\dot{x}d\dot{x}+(kx+fpsign\dot{x}+Hsign(\dot{x}+ax))dx=0$$

и интегрируя его, находим, что траекториями системы являются дуги эллипсов, соответствующие различным знакам значений $\dot{x}$ и $\dot{x}+ax$:

$$\frac{m\dot{x}^2}{2}+\frac{(kx+fPsign\dot{x}+Hsign(\dot{x}+ax))^2}{2}=R^2 \qquad (12)$$

Прямые $\dot{x}=0$ и $\dot{x}+ax=0$ делят фазовую плоскость на четыре части. Расположение траекторий на ней симметрично относительно начала координат. Центры эллипсов расположены на оси Ox, а их смещение по этой оси положительную или отрицательную стороны зависят от неравенств $H<fP$ и $H>fP$. Это делает наглядным аналитический анализ этих неравенств, проведенный выше. На рис.1 представлена верхняя полуплоскость фазовой плоскости системы при условии $H<fP$. Центры эллипсов (12) для области $\dot{x}>0$, $\dot{x}+ax<0$ расположены слева от начала координат O. Это приводит к тому, что траектории, начинающиеся левее точки A могут приходить на отрезок застоя AB. На рис. 2 выполняется неравенство $H>fP$, центры эллипсов в той же области расположены справа от начала координат, отрезок застоя не возникает и все траектории приходят в начало координат.

Фазовая плоскость системы позволяет также сделать вывод о том, существенное влияние на динамику системы силы трения и управления оказывают в тех ее областях, где они имеют разные знаки, т.е. действуют на систему в противоположных направлениях. В

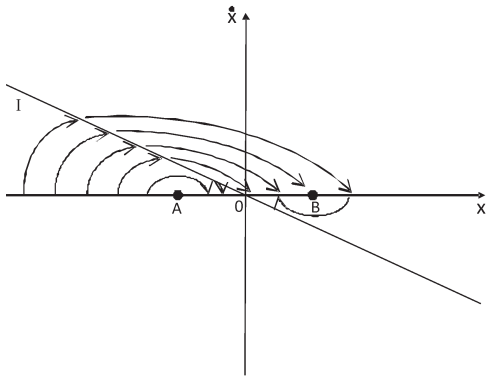


Рис. 1. Верхняя фазовая полуплоскость при выполнении условия H<fP

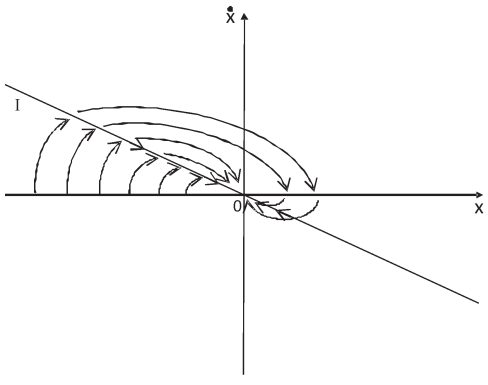


Рис. 2. Верхняя фазовая полуплоскость при выполнении условия H>fP

заключение отметим, что данный пример является иллюстративным и выбран в силу своей наглядности. Но и более сложные системы могут исследоваться по такой же схеме: выявление множества положений равновесия, выбор целевого множества и анализ неравенства (8).

Работа (частично) поддержана грантом РФФИ (проект № 06-01-00247), грантом президента РФ НШ-1676.2008.1 и грантом ИНТАС-СО РАН (проект № 06-100013-9019).

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Пятницкий, Е.С. Синтез иерархических систем управления механическими и электромеханическими объектами на принципе декомпозиции. I, II - Пятницкий Е.С. // Автоматика и телемеханика. 1989. № 1. С. 87-98, № 2. С. 57-71.
2. Матросов, В.М. Аналитическая динамика систем твердых тел с трением - Финогенко И.А. ISBN 5-2121-0091-2 // В кн.: Нелинейная механика - М.: Физматлит, 2001. С. 39-61.
3. Матюхин, В.И. Универсальные законы управления механическими системами. М.: МАКС Пресс, 2001. 249 с.
4. Финогенко, И.А. О правосторонних решениях одного класса разрывных систем 1,2 - Финогенко И.А. // Автоматика и телемеханика. 2001. № 9. С149-158, № 11. С. 95-108.
5. Финогенко, И.А. О неявном доопределении и "правосторонних решениях" одного класса разрывных систем, возникающих в задачах управления механическими объектами - Финогенко И.А. // Автометрия. 2006. Т. 42. № 5. С. 73-82.
6. Finogenko, I.A. To the Control of the Lagrange Systems on the Basis of the Decomposition Principle - Finogenko I.A. // Proc. of the Second IASTED International Multi-Conference on Automation, Control and Infermation Technology, 2005. Novosibirsk, Russia, pp. 254-258.
7. Дыхта, В.А. Оптимальное импульсное управление с приложениями - Самсонюк О.Н. ISBN 5-9221-0352-0. М.: Физматлит, 2000. 255 с.
8. Филиппов, А.Ф. Дифференциальные уравнения с разрывной правой частью - Филиппов А.Ф. М.: Наука, 1985. 223 с.
9. Андронов, А.А. Теория колебаний - Витт А.А., Хайкин С.Э. М.: Наука, 1981. 568 с.

Зароднюк Т.С., Горнов А.Ю.

УДК 519.652

ТЕХНОЛОГИЯ ПОИСКА ГЛОБАЛЬНОГО ЭКСТРЕМУМА В ЗАДАЧЕ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

1. Введение.

Большинство известных алгоритмов поиска оптимального управления в нелинейных системах предназначены для нахождения только локального экстремума целевого функционала. Разработка методов исследования невыпуклых задач оптимизации динамических систем ведется многими специалистами, среди которых нельзя не отметить В.Ф. Кротова [1], Ю.Г.Евтушенко [2], А.С. Стрекаловского [3], В.А. Срочко [4], C.A. Floudas [5], I.L. Lopez-Cruz [6] и других. Но, по мнению многих авторитетных ученых, разработанные к настоящему времени методы поиска глобального экстремума в задаче оптимального управления (ЗОУ) пока недостаточно развиты и не могут служить инструментом для эффективного решения практических задач. Проблема создания методов невыпуклой оптимизации динамических систем продолжает оставаться актуальной. В данной работе предложена вычислительная технология поиска глобального экстремума в невыпуклой ЗОУ, основанная на "конечномерных" алгоритмах и редукции исходной задачи к последовательности задач безусловной минимизации.

В стандартной постановке задачи динамика процесса описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений с начальными условиями: $\dot{x} = f(x,u,t)$, $x(t_0) = x_0$, где t -

время из интервала $T = [t_0, t_1]$, $x = (x_1, x_2,...,x_n)$ - вектор фазовых координат, и - управляющее воздействие. Вектор-функция f(x,u,t) предполагается непрерывно дифференцируемой по всем аргументам. Допустимыми называются кусочно-непрерывные управляющие функции $u = u(t)$, для любых значений времени t, принадлежащие множеству U, где $U = \{u \in R: u_l \le u \le u_g\}$. ЗОУ заключается в поиске допустимого управления $u^* = u^*(t)$, доставляющего минимум терминальному функционалу $I(u) = \varphi(x(t_1)) \to \min$, здесь функция $\varphi(x(t))$ также предполагается непрерывно дифференцируемой.

2. Технология решения невыпуклой ЗОУ.

Для решения невыпуклых ЗОУ в приведенной постановке разработана вычислительная технология, состоящая из двух этапов. На первом этапе выполняется редукция ЗОУ к конечномерной задаче безусловной минимизации (БМ) с прямыми ограничениями на оптимизируемые переменные. При этом искомое управление грубо аппроксимируется с помощью кусочно-линейных функций с большим шагом дискретизации. Далее ищется глобальный минимум в поставленной конечномерной задаче с небольшим числом переменных, что позволяет найти грубое приближение к оптимальному управлению. На втором этапе решения строится уточненная аппроксимация управления с использованием полученного на первом этапе приближения в качестве начального. В результате находим более точное приближение к оптимальному управлению на основе применения алгоритмов золотого сечения и параболической интерполяции.

Общая схема предлагаемого подхода изображена на рис. 1. Ядром рассматриваемой технологии является глобальный алгоритм парабол [7, 8], позволяющий с большой вероятностью находить минимальное значение невыпуклой функции. Программная реализация предлагаемой технологии протестирована с помощью коллекции невыпуклых модельных ЗОУ.

Представленная технология, конечно, не может гарантировать нахождение глобального экстремума в любой задаче. Тем не менее, в рамках рассматриваемого подхода показала себя эффективной для быстрого нахождения управлений из области притяжения глобального экстремума в ЗОУ.

3. Вспомогательная задача БМ.

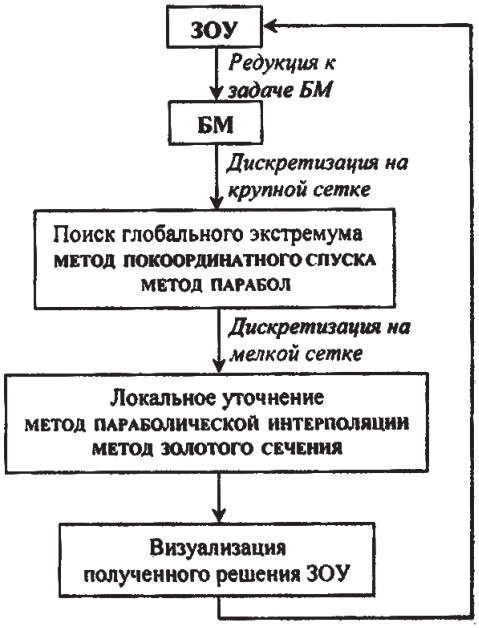


Рис. 1. Схема технологии решения невыпуклой ЗОУ.

Для решения исходной ЗОУ осуществляется ее редукция к вспомогательной задаче БМ (рис. 1), которая заключается в поиске минимума невыпуклой функции нескольких переменных g(y) по всем y из множества Y, где Y - m-мерный параллелепипед

$$\min_{y \in Y} g(y),\ Y = \{y \in R^m: \alpha_i \le y_i \le \beta_i,\ i = \overline{1,m}\},$$

здесь $g(y)$ имеет вид исходного функционала, зависящего от дискретизованного управления, доставляющего грубую аппроксимацию траектории в результате интегрирования системы дифференциальных уравнений. На следующем этапе выбирается более мелкое разбиение интервала времени функционирования системы, что приводит к задаче БМ большей размерности. При ее решении, найденное на крупной сетке управление используется в качестве начального приближения к искомому оптимальному управлению.

4. Описание основного алгоритма подхода.

Подход к решению рассматриваемой конечномерной задачи (1) основывается на комбинации следующих методов: покоординатного спуска для многомерной задачи нахождения экстремума и глобального метода парабол для вспомогательного одномерного поиска. Уточнение управления из области притяжения глобального экстремума осуществляется с помощью методов параболической интерполяции и золотого сечения. Приведем описание

одной итерации алгоритма решения вспомогательной задачи БМ. На k-м шаге:

1. Фиксируются все координаты функции $g(y_1,y_2,...,y_k,...,y_m)$, кроме k-ой, где $k = \overline{1,m}$.

2. На отрезке $[\alpha_k,\beta_k]$ изменения значений переменной y_k генерируется случайная сетка $C = \{c_i\}_{i=\overline{1,M}}$, такая, что $c_1 = \alpha_k$ и $c_M = \beta_k$.

3. В узлах сетки вычисляются значения функции $g(y_1,y_2,...,c_i,...,y_m)$, $i = \overline{1,M}$.

4. Производится поиск "выпуклых троек" $<c_{i-1}, c_i, c_{i+1}>$ - последовательно расположенных точек $c_{i-1} < c_i < c_{i+1}$, значения в которых удовлетворяют следующему двойному неравенству

$$g(y_1,y_2,...,c_{i-1},...,y_m) \ge g(y_1,y_2,...,c_i,...,y_m) \le \le g(y_1,y_2,...,c_{+1},...,y_m).$$

5. В каждой "выпуклой тройке" с помощью комбинации локальных методов одномерного поиска находится минимальное значение функции $\min_{z\in[c_{i-1},c_{i+1}]} h(z)$, где $h(z) = g(y_1,y_2,...,z,...,y_m)$, $z = y_k$.

6. На отрезке $[\alpha_k,\beta_k]$ выбирается наименьшее значение целевой функции, из найденных в каждой "выпуклой тройке".

7. Полученная точка $(y_1, y_2,...,y_k^*,...,y_m)$ используется в качестве начального приближения на следующем шаге. Итерация завершена.

5. Технологическая постановка ЗОУ.

Технологическая постановка включает в себя, кроме математической постановки ЗОУ, задание параметров, управляющих работой алгоритмов. Указывается размерность задачи n, интервал времени функционирования системы $T = [t_0, t_1]$ значение траектории в начальный момент времени $x_1(t_0)$, $i = \overline{1,n}$ и прямые ограничения на управление $u_1 \le u \le u_g$, система дифференциальных уравнений и вид минимизируемого функционала.

Приведем пример постановки задачи в терминах реализованной вычислительной технологии. В задаче 1 [9] технологическая постановка будет выглядеть следующим образом: $n = 2$, $T = [0, 1.5]$, $x_1(0) = 0$, $x_2(0) = 0$, $|u| \le 1$,

$$\dot{x}_1 = x_2,$$
$$\dot{x}_2 = (2 + x_1 - x_1x_2 + x_1^2x_2)u,$$
$$I(u) = x_2(1.5) \to \min.$$

Основными алгоритмическими параметрами являются размерности используемых сеток дискретизации. Для редукции задачи на первом этапе используется грубая сетка, состоящая из k узлов. На втором - осуществляется локальное уточнение полученного решения на основе более мелкой сетки, включающей l узлов. В приведенном примере выбраны следующие значения основных алгоритмических параметров: $k = 5$, $l = 101$. Для нахождения траекторий системы использовалась программная реализация явного метода Рунге-Кутты, основанная на формулах Дормана-Принса с автоматическим управлением длиной шага [10].

На первом этапе решения рассматриваемой задачи полученное управление (рис.2) доставляет функционалу значение, равное -3.439. Машинное время решения - менее 1 сек. Полученная грубая аппроксимация оптимального управления выбирается в качестве начального приближения, на следующем этапе осуществляется его локальное уточнение. Генерируется сетка $\{\beta_i\}_{i=\overline{1,l}}$ из l узлов с постоянным шагом $h_1 = (t_1 - t_0)/(l - 1)$, такая, что

$$\beta_i = t_0 + h_i(i-1),\ i = \overline{1,l}.$$

С помощью рассматриваемого подхода удалось получить следующее рекордное значение функционала $I(u^*) = -4.041$, за время решения, равное 4 сек. Соответствующие оптимальные траектории и управление в рассматриваемой задаче 1 приведены на рис. 3(а).

Построена проекция множества достижимости с выделенными точками, в которых достигаются экстремальные значения функционала. Локальный экстремум и область его притяжения выделены серым цветом, глобальный - черным. Нахождение локальных экстремумов и построение аппроксимации множества достижимости осуществлялось с помощью программного комплекса OPTCON-III (Горнов

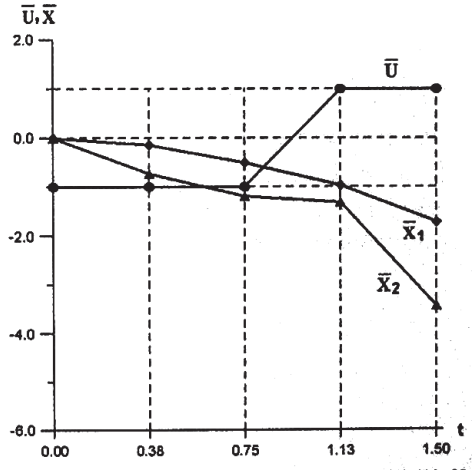


Рис. 2. Рекордное управление и соответствующие ему траектории, полученные на первом этапе решения задачи 1.

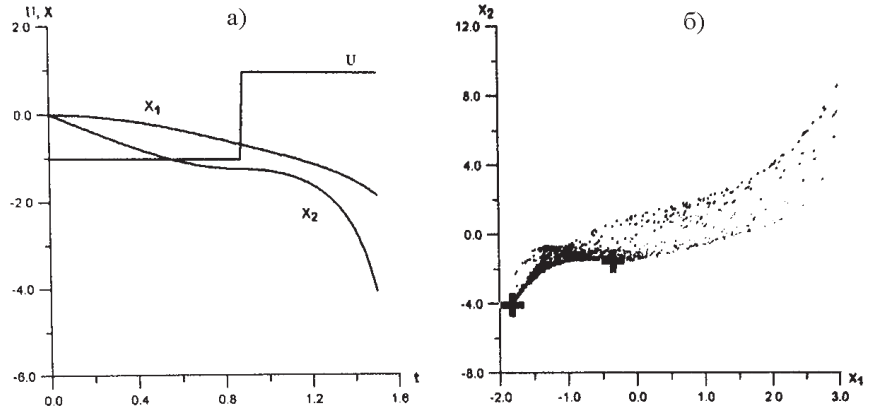


Рис. 3. Оптимальные траектории и управление (а), проекция множества достижимости и экстремальные точки (б) в задаче 1.

А. Ю., Зароднюк Т.С.), основанного на методе мультистарта [7]

6. Модельная ЗОУ колебаниями нелинейного маятника.

Рассмотрим известную модельную задачу гашения колебаний нелинейного маятника [11] $\dot{x}_1 = x_2$, $\dot{x}_2 = u - \sin x_1$, $x_1(0) = 5$, $x_2(0) = 0$, $|u(t)| \le 1$, $t \in [0,5]$. Целевой функционал в классической постановке выглядит следующим образом $I(u) = x_1^2(5) + x_2^2(5) \to \min$.

С помощью рассматриваемой технологии известное из первоисточника минимальное значение целевого функционала $I(u^*) = 11.908$ найдено за 12 секунд (на выполнение первого этапа потрачено менее 1 сек). На рис.4(а) пунктирной линией изображена грубая аппроксимация, сплошной - уточненная аппроксимация оптимального управления, полученная с использованием комбинации локальных методов.

7. Модельная задача 2 [12].

Управляемый динамический процесс описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений $\dot{x}_1 = \sin x_2$, $\dot{x}_2 = u - e^{x_1}$, с заданными начальными условиями $x_1(0) = x_2(0) = 1$ и ограничениями на управление $|u(t)| < 1$, $t \in [0,5]$. Необходимо минимизировать функционал вида $I(u) = x_1(5) + x_2(5) \to \min$.

За общее время решения задачи - 15 сек - найдено следующее минимальное значение функционала: $I(u^*) = -16.446$. Экстремальное управление, соответствующие ему траектории и проекция множества достижимости представлены на рис. 5.

8. Модельная задача 3.

Нелинейная система дифференциальных уравнений, описывающая процесс в модельной задаче 3 на интервале $T = [0,1]$, выглядит следующим образом $\dot{x}_1 = (x_1 + x_2)$ и, $\dot{x}_2 = \sin(x_1 + x_2 + u)$. Начальный фазовый вектор и интервал изменения управляющей

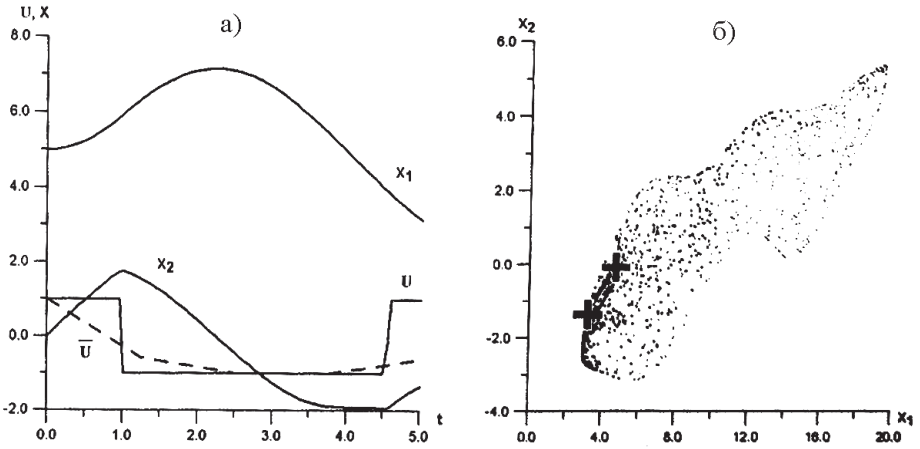


Рис. 4. Оптимальные траектории и управление (а), проекция множества достижимости и экстремальные точки (б) в ЗОУ колебаниями нелинейною маятника.

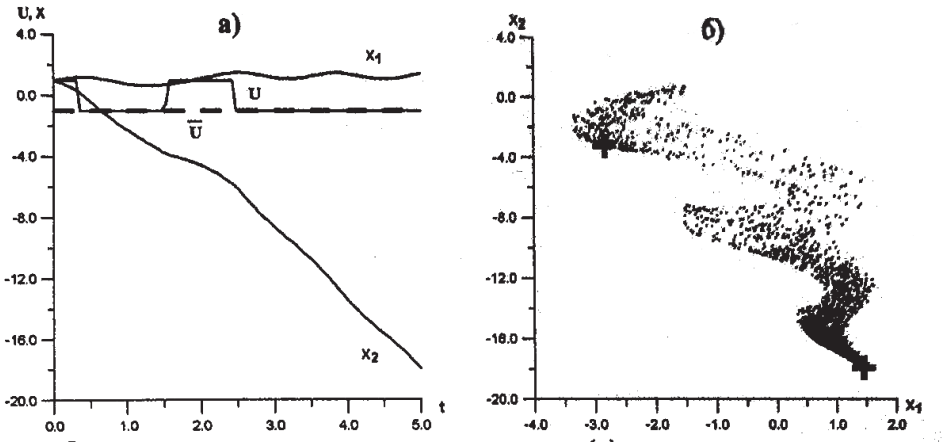


Рис. 5. Оптимальные траектории и управление (а), проекция множества достижимости и экстремальные точки (б) в модельной задаче 2.

функции заданы: $x_1(0) = -0.9, x_2(0) = 1, |u(t)|<1$. Поиск оптимального управления осуществляется на основании критерия качества вида $I(u) = -x_1(1) \to \min$.

Рассматриваемая технология позволила получить минимальное значение функционала $I(u^*) = -0.056$ за время, равное 5 сек (на выполнение первого этапа ушло менее 1 сек). Визуализация полученного решения приведена на рис. 6.

9. Модельная ЗОУ энергетической системой.

Одним из традиционных подходов к исследованию энергетических проблем является математическое моделирование с использованием управляемых систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Приведем известную модельную энергетическую задачу, рассмотренную в разных источниках [11, стр. 140], [13, с.115], [14, с. 204].

Данная система представляет собой линеаризованную модель простейшей энергосистемы: генератор - шины бесконечной мощности

$$\dot{x}_1 = x_2,$$
$$\dot{x}_2 = -6.725x_1 - 1.619x_3 + 0.194,$$
$$\dot{x}_3 - 0.066x_1 - 0.257x_3 + 0.19u + 0.018,$$
$$x_1(0) = 0.115, x_2(0) = 1.926, x_3(0) = 0.055,$$
$$|u(t)| \le 2.59, t \in [0, 1.4], I(u) = \|x(1.4\|^2 \to \min.$$

Здесь u - ЭДС возбуждения, x_1 - угол поворота ротора генератора по отношению к синхронной оси сдвига фазовой ЭДС и напряжения. В задаче рассматривается возмущенное движение, возникающее во время аварий в электропередаче. Необходимо за время $T = 1.4$ привести энергосистему в положение, как можно более близкое к 0.

В процессе минимизации рекордное значение функционала 0.002 в [11] было получено за время 157 секунд. В [13] минимальное значе-

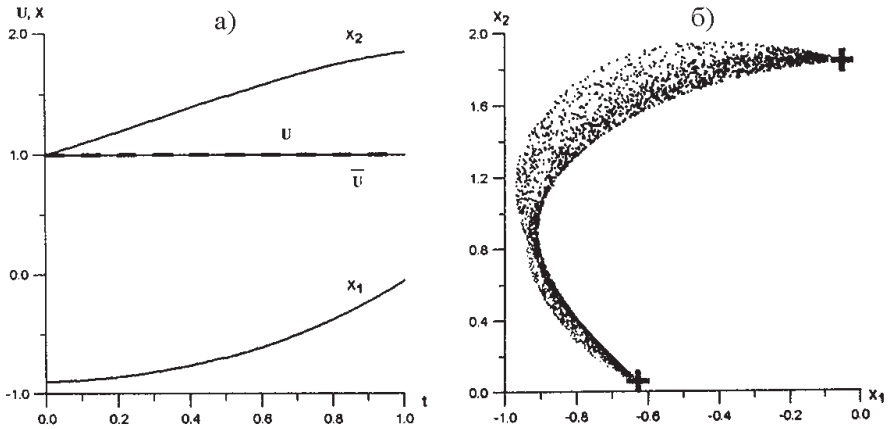


Рис. 6. Оптимальные траектории и управление (а), проекция множества достижимости и экстремальные точки (б) в модельной задаче 3.

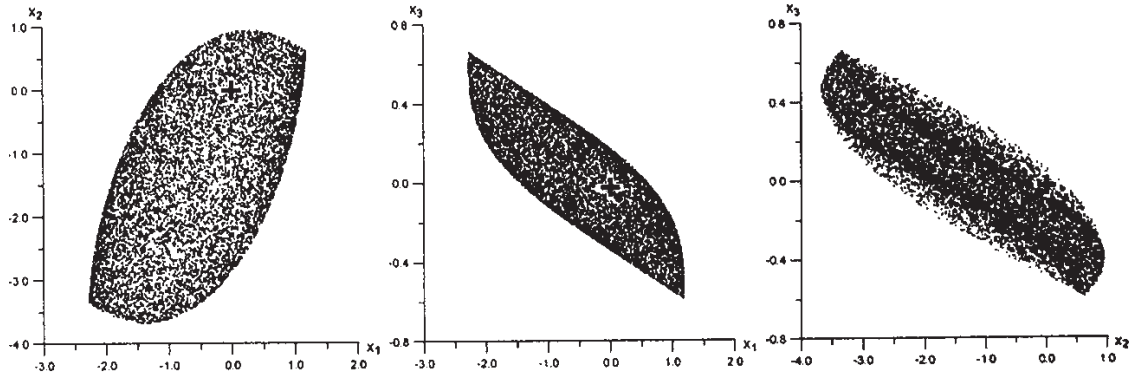


Рис. 7. Проекции множества достижимости в модельной энергетической задаче.

ние функционала равно 0.00127. Решение, полученное с помощью рассматриваемого подхода на порядок лучше - $I(u^*) = 0.00054$. Общее время решения задачи на ПК Pentium-IV 593 сек. Проекции множества достижимости и точка, в которой достигается минимальное значение функционала, приведены на рис. 7. Оптимальные траектории и управление - на рис. 8.

Заключение.

Любой метод поиска глобального экстремума, явно или неявно, включает два этапа: грубый сканирующий поиск экстремума на всем допустимом множестве и точный локальный поиск в тех областях, где вероятнее всего находится глобальный экстремум. Предложенный подход позволяет конструировать вычислительные схемы, вполне удовлетворяющие данным требованиям, и может служить основой для создания эффективных алгоритмов решения невыпуклых задач оптимального управления. Свойства рассматриваемых методов исследовались с помощью тестирования алгоритмов.

Представленная методика является эвристической и не может дать гарантии нахождения экстремума в любой задаче. Тем не менее, в большинстве решавшихся задач известный из первоисточника глобальный экстремум был найден. Предложенный подход показал себя работоспособным при решении тридцати сложных невыпуклых нелинейных задач.

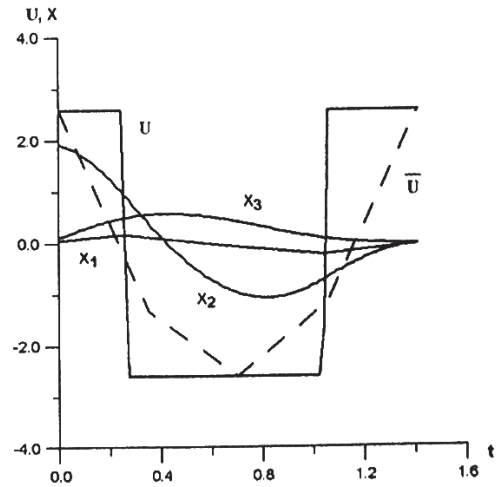


Рис. 8. Оптимальные траектории и управление в модельной энергетической задаче.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Krotov V.F. Global methods in optimal control theory - N.Y.: Marcel Dekker Inc., 1996. -348 с.
2. Евтушенко Ю.Г. Методы решения экстремальных задач и их применение в системах оптимизации // М.: Наука, 1982. 432 с.
3. Стрекаловский А.С. Элементы невыпуклой оптимизации. - Новосибирск: Наука, 2003. - 356 с.
4. Срочко В.А. Итерационные методы решения задач оптимального управления. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2000. - 160 с.
5. Floudas C.A. Deterministic Global Optimization: Theory, Methods and Applications; Nonconvex Optimization and its Applications. - Kluwer Academic Publishers, 2000. 508 p.
6. I.L. Lopez Cruz, L.G. van Willigenburg, G. van Straten. Efficient evolutionary algorithms for multimodal optimal control problems // Journal of Applied Soft Computing. - 2003. - Т. 2. № 3.- p.p. 97-122.
7. Жилинскас А.Г. Глобальная оптимизация: Аксиоматика статистических моделей, алгоритмы, применения. - Вильнюс: Мокслас, 1986. - 168 с.

8. Ершов А.Р., Хамисов О.В. Автоматическая глобальная оптимизация // Журн. Дискретный анализ и исследование операций. - 2004. - Т. 11, № 2. - С. 45-68.
9. Горнов А.Ю., Диваков А.О. Комплекс программ для численного решения задач оптимального управления. Руководство пользователя. - Иркутск, 1990. - 27 с.
10. Хайрер Э., Нерсетт С, Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Нежесткие задачи: Пер. с англ. - М.: Мир, 1990. - 512 с.
11. Тятюшкин А.И. Численные методы и программные средства оптимизации управляемых систем. -Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1992. - 193 с.
12. Горнов А.Ю., Данеева А.В. Подход к исследованию невыпуклых задач оптимального управления с параллелепипедными ограничениями // Вестник Бурятского университета. Серия 13: Математика и информатика. Вып. 2. - Улан-Удэ: Изд-во Бурятского госуниверситета, 2005. - С. 125-131.
13. Батурин В.А., Урбанович Д.Е. Приближенные методы оптимального управления, основанные на принципе расширения. - Новосибирск: Наука. Сиб. предприятие РАН. 1997. -175 с.
14. Ащепков Л.Т. Оптимальное управление разрывными системами. - Новосибирск: Наука, 1987.-226 с.

Федоров В.В., Молчанова Е.И.

УДК 004.85

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО РЕДАКТОРА БАЗЫ ЗНАНИЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ В СРЕДЕ CUPS

Актуальность.

Анализ современного состояния рынка информационных систем (ИС) показывает устойчивую тенденцию роста спроса на ИС организационного управления. Причем спрос продолжает расти именно на интегрированные системы управления. Автоматизация отдельной функции, например, бухгалтерского учета или сбыта готовой продукции, считается уже пройденным -паном для многих предприятий. ИС специалистов - обеспечивают работу с данными и -знаниями, повышают продуктивность и производительность работы инженеров и проектировщиков. Одним из направлений таких ИС являются экспертные системы (ЭС), осуществляющие поддержку принятия решений. В ИрГУПС выполняется разработка экспертной системы для обучения инженера-методиста по рентгенофлуоресцентному анализу. Число потенциальных потребителей этой системы очень велико. Только отечественные рентгеновские спектрометры, выпущенные ЗАО «Научприбор», работают более чем на 500 предприятиях металлургии, цементной и стекольной промышленности, в машиностроении и в научных учреждениях. Кроме того, многие заводские лаборатории оснащены аналитическими комплексами импортного производства. Проблемы, на решение которых направлен проект, сформулированы в Федеральной целевой программе - Национальная технологическая база - раздел VII (направление 78), раздел XVIII (направление 168).

Предлагаемые методы и подходы.

Осуществляемый проект отвечает требованиям, предъявляемым к программным комплексам нового поколения: имеет многослойную архитектуру, предусматривающую использование серверов приложений и серверов баз данных; ориентирован на работу в вычислительных сетях; имеет свойство расширяемости программного обеспечения (Рис.1).

В качестве среды разработки экспертной системы выбран Clips.Clips - C Language Integrated Production System (продукционная система, интегрируемая с языком С) [1].

Рис. 1. Структура экспертной системы

Clips представляет собой современный инструмент, предназначенный для создания экспертных систем (expert system tools, система управления экспертными системами, СУЭС). Clips состоит из интерактивной среды - экспертной оболочки со своим способом представления знаний, гибкого и мощного языка, а так же нескольких вспомогательных элементов.

Кроме того, данная СУЭС является платформонезависимой, т.е. устанавливается как на операционные системы семейства Unix, так и на системы Windows.

Среда Clips позволяет создавать продукционные и фреймовые БЗ и требует от разработчика ЭС детального знания ее процедурного и объектно-ориентированного языка. При использовании стандартного интерпретатора команд, создание БЗ занимает очень много времени. В месте с тем, для описания отдельных разделов даже одной предметной области необходимо создавать отдельные базы знаний (БЗ). Процесс разработки ЭС можно существенно ускорить, создав универсальный инструмент, предоставляющий инженеру по знаниям визуальный интерфейс, содержащий набор шаблонов для заполнения БЗ.

Цель. Целью данной работы являлось создание интеллектуального редактора базы знаний для разработки экспертных систем в среде Clips.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- Выбрать программные средства для реализации редактора БЗ.

- Спроектировать структуру базы данных (БД), в которой будут храниться данные и знания в процессе заполнения БЗ.

- Разработать визуальные интерфейсы, соответствующие элементам процедурного и объектно-ориентированного языка Clips.

Проектирование структуры редактора базы знаний. База знаний Clips представляет собой текстовый файл, содержащий команды интерпретирующего языка Clips, для структурирования знаний и запуска машины выводов. Процесс создания БЗ достаточно длительный и не может быть выполнен за один сеанс. В связи с чем, нами предложено хранить шаблоны элементов языка Clips, используемые для создания реальных БЗ в различных предметных областях, в реляционной базе данных. После завершения создания всех шаблонов выполняется команда генерации текстового файла в формате Clips.

Поскольку БЗ предназначена для использования в сети Интернет, в качестве реляционной СУБД выбран MySQL 5. Данная СУБД является платформо-независимой, не требует больших системных ресурсов, поддерживает создание связей между таблицами. Посредством Web-сервера Apache и языка серверных сценариев php, БД может быть доступна для наполнения и редактирования инженеру по знаниям, находящемуся в любой удаленной точке земного шара.

При проектировании схемы БД учитывали, что некоторые элементы языка Clips имеют сложную структуру. В связи с чем, выполнена декомпозиция сложных элементов языка Clips, таких как факты и классы на структурные составляющие. Например, шаблон для создания классов представлен таблицами Classes (имена классов), Classslot (слоты класса их грани и ограничения), Dmh (обработчики сообщений). Назначение таблиц в БД интеллектуального редактора БЗ для разработки экспертных систем в среде Clips представлено в табл. 1.

Последовательность заполнения БЗ представляет собой иерархию или дерево, согласно которому инженер по знаниям сначала определяет предметную область, затем создает новый или открывает ранее созданный проект. В каждом проекте содержится несколько модулей, с помощью которых можно группировать отдельные элементы базы знаний и управлять

Таблица 1

Назначение таблиц БД

Наименование таблицы	Хранимая информация
1	2
Modul	Программные модули
Project	Перечень разрабатываемых проектов
Rooles	Сформулированные правила
Fact slot	Слоты фактов из таблицы Fact
Classes	Сформулированные классы
Class slot	Слоты классов из таблицы Classes
Dmh	Сформулированные обработчики сообщений
Fact	Сформулированные неупорядоченные факты, упорядоченные факты или шаблоны фактов
Func	Сформулированные функции CLIPS
Rod	Сформулированные родовые функции
Area	Перечень предметных областей
Global	Перечень глобальных переменных

процессом доступа к этим элементам во время решения задач. Каждый модуль, в зависимости от назначения, содержит в себе набор фактов, правил, обработчиков сообщений, функций или глобальных переменных.

Этой схеме заполнения БЗ соответствует логическая схема БД, представленная на рис.2 в виде сущностей и их ключевых атрибутов.

Разработка визуальных интерфейсов пользователя. Инженер по знаниям, разрабатывающий экспертную систему, не обязан владеть технологиями работы с реляционными БД, поэтому, ему необходимо предоставить визуальные Web-интерфейсы, позволяющие генерировать шаблоны БЗ. С этой целью разработаны соответствующие визуальные шаблоны в виде Web-форм для каждого отдельного элемента (переменная, функция, факт, класс, правило и т.д.) языка Clips. Сложные элементы были представлены в виде фрейма, слотами которого являлись атрибуты элемента [2, 3].

Например, чтобы создать неупорядоченный факт с помощью конструктора языка Clips deftemplate, необходимо задать имя факта и описать входящие в него слоты (один или несколько). При создании слота указывается его имя, тип и значение по умолчанию (DEFAULT), если это необходимо (рис. 3.). Аналогично выполняется описание слотов классов. Так класс Химический элемент, используемый в БЗ по рентгенофлуоресцентному анализу, можно представить слотами Символ, Порядковый номер, Атомный вес и мультислотами Края поглощения и Линии спектра флуоресценции.

Класс Анализируемый материал определяется слотами Тип материала, Наименование продукта, Элемент - основа, Сумма содержаний (включая основу), Фазовый состав, мультислотом Элемент, который наследует символы элементов от класса Химический элемент, а также мульти слотами Химическое соединение, и Доля элемента.

В процессе работы интерпретатора Clips активация конструктора приводит к появлению в текущей базе знаний CUPS информации о шаблоне факта, с помощью которого в систему в дальнейшем можно будет добавлять факты, соответствующие данному шаблону.

Правила в Clips предназначены для генерации выводов на знаниях и, следовательно, являются результатом множественного наследования от различных фактов и объектов, к слотам которых могут быть применены различные функции, методы, обработчики сообщений.

Правила состоят из предпосылок и следствия (рис. 4).

Предпосылки называются так же ЕСЛИ - частью правила, левой частью правила или LHS правила (left-hand side of rule). Предпосылки правила представляют собой набор условий (или условных элементов), которые должны удовлетворяются, для того чтобы пра-

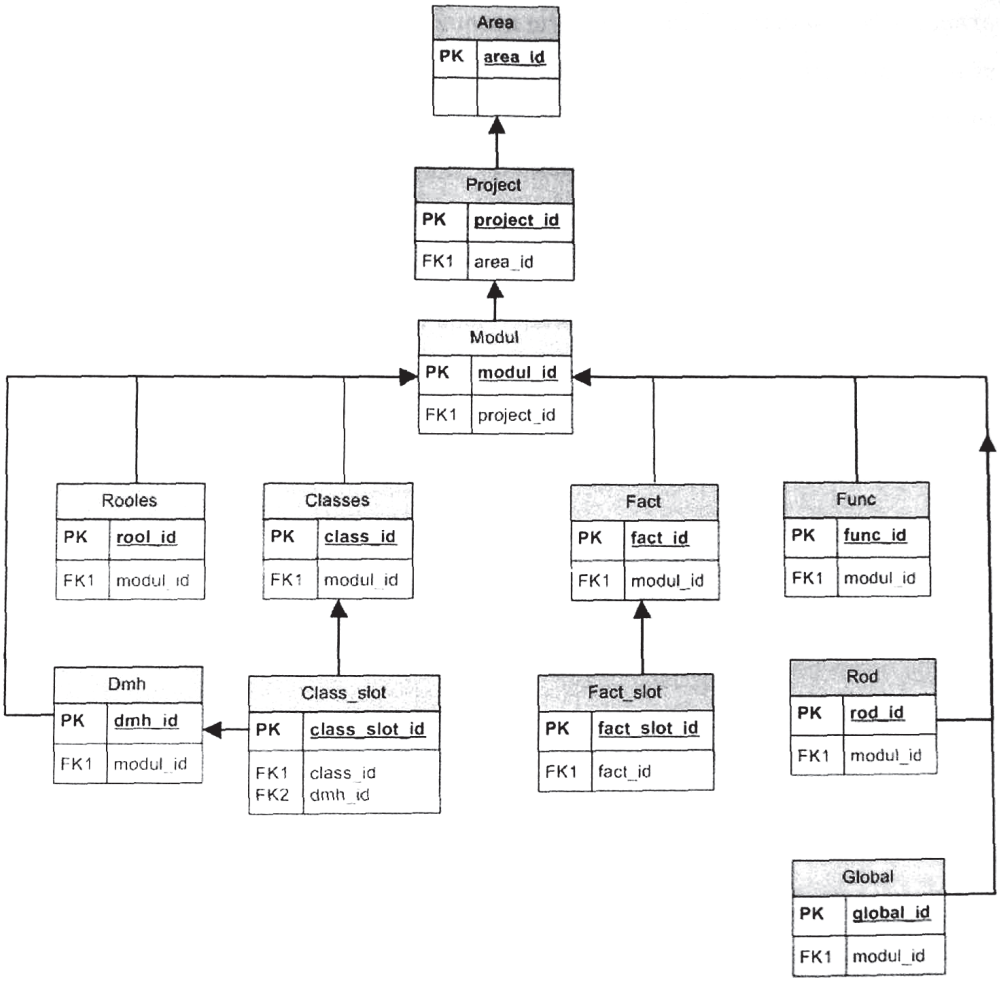


Рис. 2. Логическая схема базы данных

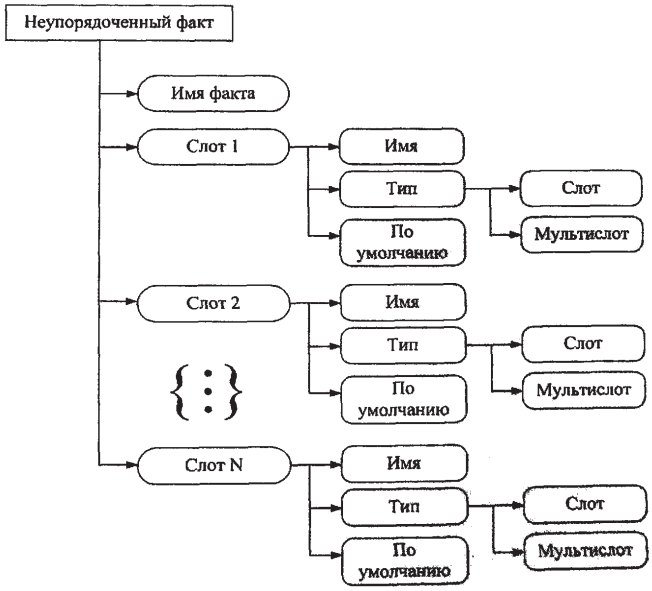


Рис. 3. Фрейм неупорядоченный факт

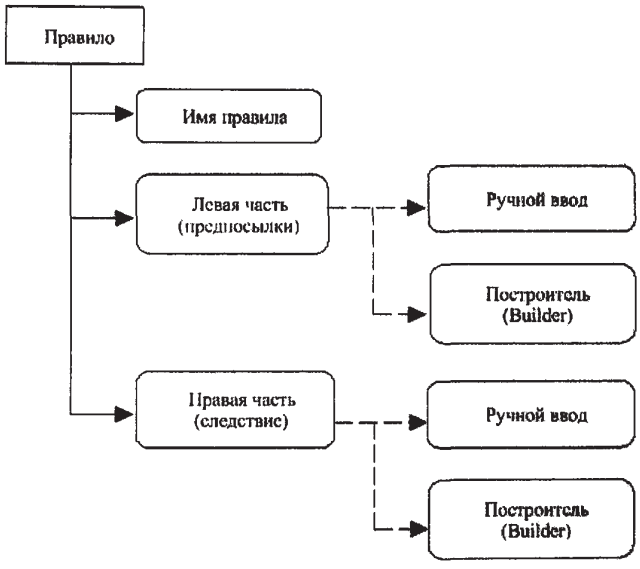


Рис. 4. Фрейм правило

вило выполнилось. Предпосылки правил удовлетворяются в зависимости от наличия или отсутствия некоторых заданных фактов в списке фактов или некоторых созданных объектов, являющихся экземплярами классов, определенных пользователем. Один из наиболее распространенных типов выражений в CLIPS - образцы. Образцы состоят из набора ограничений, которые используются для определения того, удовлетворяет некоторый факт или объект условному элементу. Следствие называется ТО - частью правила, правой частью или 11HS правила (right-hand side of rule). Следствие правила представляется набором некоторых действий, которые необходимо выполнить, в случае если правило применимо к текущей ситуации.

В нашем примере создания БЗ для разработки методики РФА выбор переменных (содержания С или интенсивности флуоресценции I влияющих элементов) в уравнении связи осуществляется проверкой значений слотов Сумма содержаний (summa) и Фазовый состав (phases) объекта Анализируемый материал (material). Для этого используются. например, правила:

(defrule Select_variable_C
(object (is-a material) (summa 1) (phases homogeneous))
=>

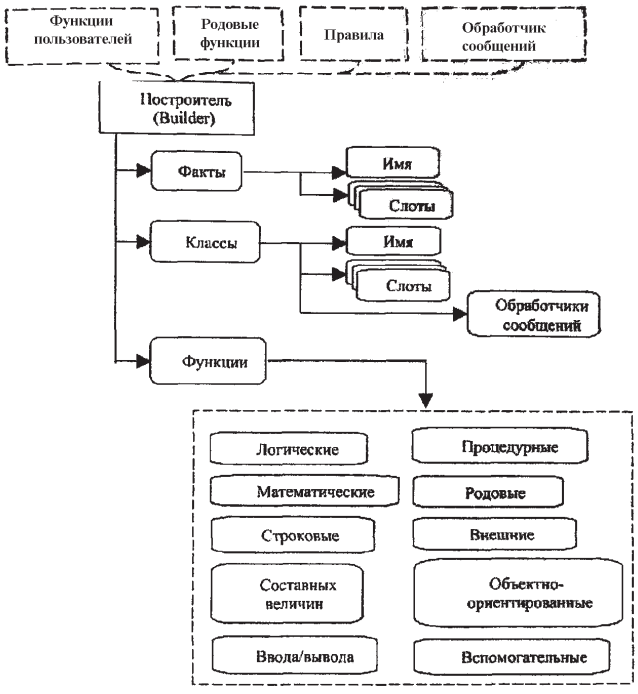


Рис. 5. Фрейм «построитель» (Builder)

(printout t crlf "Correction for Concentrations" crlf)) (defrule Select_variable_I
(object (is-a material)
(not (summa 1))
(or (not (phases homogeneous)))
=>
(printout t crlf "Correction for Intensities" crlf))

В качестве инструмента для заполнения слотов фреймов функций пользователя, родовых функций, обработчиков сообщений и правил был разработан фрейм - построитель (Builder), который позволяет составлять сложные выражения из существующих слотов фактов и классов, внутренних и внешних функций (рис. 5). Каждый фрейм, соответствующий элементу языка Clips, в окне построителя представлен комбинированным списком. Значения строк списка формируются из данных таблиц БД.

При разработке построителя использовался язык программирования Java Scripts, благодаря чему при выборе из списка любой функции, факта, правила, слота объект автоматически передается в формируемое выражение. Это позволяет реализовать собственный механизм наследования от структур, данных и знаний, хранящихся в БД.

Выводы

Разработан редактор БЗ, позволяющий визуальными средствами создавать элементы представления данных и знаний для их последующей интерпретации машиной выводов Clips, что позволяет унифицировать и ускорить процесс разработки экспертных систем. Элементы языка Clips представлены в виде фреймов. Предложен специальный фрейм - построитель для заполнения слотов функций пользователя, родовых функций, обработчиков сообщений и правил.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Частиков А.П. Разработка экспертных систем в среде CLIPS // М.: БХВ. 2003. 606 с.
2. Гома Х. UML проектирование систем реального времени, параллельных и распределенных приложений // М.: ДМК. 2002. 698 с.
3. Минский, М. Фреймы для представления знаний // М. Минский; пер. с англ. М.: Энергия, 1979 - 151 с.

Крюков А.В., Закарюкин В.П., Арсентьев М.О. УДК 621.311

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

В последние годы разработан целый ряд эффективных энерготехнологий, которые позволяют потребителям электроэнергии (ЭЭ) создавать собственные экономичные установки, конкурирующие с централизованным производством ЭЭ [1...6]. При этом электростанции потребителей обеспечивают не только собственные потребности в ЭЭ, но и выступают конкурентами на энергетическом рынке [1].

Под распределенной генерацией (РГ)[1] понимается совокупность потребительских энергоустановок как индивидуального использования, так и объединенных в микроэнергосистемы. Создание установок РГ диктуются необходимостью адаптации к условиям рынка, а также ужесточением требований экологии, стимулирующих использование нетрадиционных возобновляемых источников энергии.

Современная преобразовательная техника [7] позволяет присоединять установки РГ к электроэнергетической системе (ЭЭС) через вставки постоянного тока. Подобная концепция ограничивает мощность короткого замыкания на шинах источников РГ, обеспечивает высокое качество электроэнергии и придает электроснабжению потребителей характер гарантированного питания [1]. Источники РГ, объединенные в микроэнергосистемы (кластеры), обеспечивают не только повышенную надежность электроснабжения, но и открывают широкие возможности для оптимизации режимов и повышения экономичности производства и распределения ЭЭ. Таким образом, применение технологий РГ позволяет получить целый ряд положительных эффектов, главные из которых состоят в снижении затрат на энергообеспечение, повышении надежности электроснабжения ответственных потребителей, а также в уменьшении техногенного воздействия на окружающую природную среду.

Имеющийся отечественный и зарубежный опыт показывает применимость технологий РГ в промышленности, коммунально-бытовом секторе, сельском хозяйстве и на транспорте. В настоящей работе рассматриваются технические аспекты применения установок распределенной генерации в системах электроснабжения железнодорожного транспорта.

Вопросы использования технологий РГ на железнодорожном транспорте нашли отражение в нормативных документах, определяющих перспективы развития отрасли, в частности, в энергетической стратегии ОАО «РЖД» на период до 2010 года и на перспективу до 2020 года [8] и в стратегических направлениях научно-технического развития ОАО «Российские железные дороги». В этих документах отмечается, что на железнодорожном транспорте предусматривается широкое применение высокоэнергоэффективных нетрадиционных технических средств и технологий, основанных на достижениях фундаментальных наук. На их основе будут формироваться перспективные инновационные приоритеты отрасли в области энергосбережения, к которым относятся следующие:

- применение энергоемких накопителей энергии в основных технологических процессах энергопотребления и генерации энергии;
- широкое внедрение тепловых насосов, топливных элементов, электрохимических генераторов, водородной энергетики, биогазогенераторных установок утилизации отходов жизнедеятельности транспорта;
- использование ветровой, солнечной и геотермальной энергии для нужд автономных потребителей железных дорог.

[1] Иногда используется термин «рассредоточенная энергетика».

В регионах, где внешнее электроснабжение железных дорог является неустойчивым, предполагается создавать принадлежащие ОАО «РЖД» источники ЭЭ для обеспечения тяги поездов и нужд нетяговых железнодорожных потребителей. Так, например, в ближайшие годы на Свердловской железной дороге появится собственная электростанция мощностью 12 МВт, на которой будут установлены газовые турбины.

Для того, чтобы избежать зависимости от многочисленных сетевых компаний, предполагается в ряде случаев использовать построение системы тягового электроснабжения (СТЭ), при котором в зоне крупной электростанции ЭЭС сооружается опорная железнодорожная подстанция, питающая по собственной линии 65, 90 или 110 кВ, проложенной по опорам контактной сети промежуточные тяговые подстанции. Одновременно обеспечивается повышение качества электроэнергии, симметрирование нагрузки, снижение электромагнитного влияния тяговой сети на смежные линии [9...12]. Такое построение СТЭ создает особо благоприятные условия для внедрения установок распределенной генерации.

При строительстве новых железнодорожных линий может стать целесообразным создание транспортно-энергетических коридоров, в которых совмещаются трассы железной и автомобильной дорог, высоковольтных ЛЭП и магистральных линий связи. При этом снижаются расходы по их строительству и эксплуатации, что дает дополнительные доходы компании. Для повышения надежности электроснабжения ответственных потребителей в таких объектах инфраструктуры также актуально использование установок распределенной генерации.

Особую сферу применения установок РГ образуют системы гарантированного электроснабжения устройств сигнализации, централизации и автоблокировки, обеспечивающие повышение безопасности движения поездов. Аналогичные установки РГ применяются для гарантированного электроснабжения технологической автоматики, сигнализации и связи в искусственных сооружениях железнодорожного транспорта.

Железнодорожный транспорт России является достаточно емким потребителем энергоресурсов. В целом по сети железных дорог ежегодно потребляется до 5...6% вырабатываемой в РФ электроэнергии и до 6% дизельного топлива (рис. 1). В натуральных показателях это составляет 40 млрд. кВт·ч электроэнергии, 3 млн. т дизельного топлива, 4,5 млн. т угля, до 1 млн. т мазута, почти 1 млрд. м3 природного газа, 170 тыс. т бензина [8]. По удельным расходам топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) на единицу производимой работы железные дороги являются наиболее экономичным видом транспорта, на долю которого приходится подавляющее большинство перевозок грузов и до половины пассажирооборота страны. Энергоресурсы используются на перевозочный процесс, обеспечение работы железнодорожной инфраструктуры и на социальную сферу.

На тягу поездов расходуется около 80% электроэнергии и 85% дизельного топлива (рис. 2). Кроме того, до 20 млрд. кВт·ч ЭЭ дополнительно перерабатывается системами электроснабжения железных дорог на транзит и снабжение нетранспортных потребителей (рис. 3).

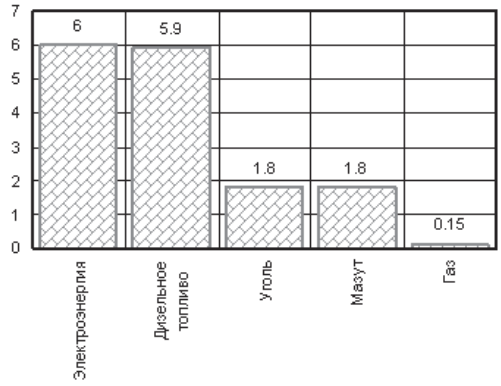


Рис. 1. Структура энергопотребления на железнодорожном транспорте в процентах от общероссийского производства ТЭР

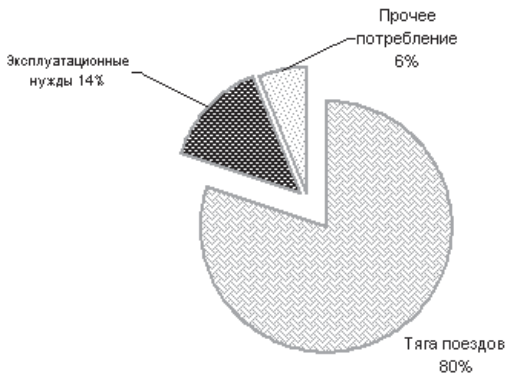


Рис. 2. Отраслевая структура электропотребления по направлениям деятельности

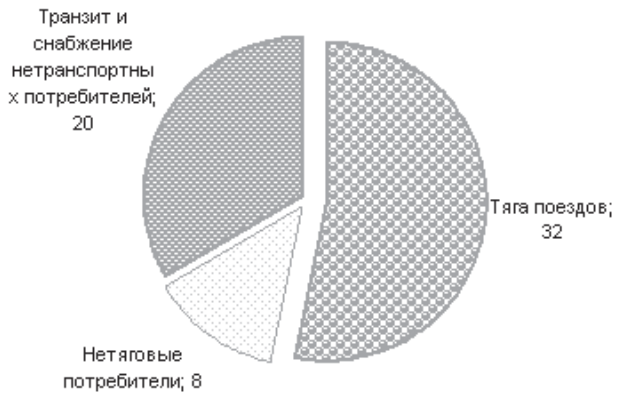


Рис. 3. Отраслевая структура электропотребления в млрд. кВт·ч

Основным энергоносителем является электроэнергия (рис. 4), что совпадает с общей направленностью энергетики страны [8].

Анализ представленных данных позволяет сделать вывод о том, что электроэнергетика железнодорожного транспорта представляет собой обширный полигон для внедрения современных технологий распределенной генерации. В условиях непрекращающегося роста тарифов на электроэнергию применение этих технологий позволит снизить затраты на электроснабжение. Кроме того, на этой основе возможно повышение надежности электроснабжения ответственных объектов железных дорог, качества электроэнергии, электромагнитной безопасности.

На основе изучения технологических процессов на железнодорожном транспорте, особенностей построения систем электроснабжения электрической тяги и нетяговых потребителей [13...15] можно наметить следующие сферы применения установок распределенной генерации:

- объекты железнодорожного транспорта (включая электрическую тягу поездов) в регионах с потенциально неустойчивым электроснабжением;
- для повышения надежности электроснабжения ответственных потребителей при создании транспортно-энергетических коридоров, совмещающих трассы железной и автомобильной дорог, высоковольтные ЛЭП и линии связи;
- на предприятиях железнодорожного транспорта, имеющих собственные теплоисточники (использование режимов совместной генерации электрической и тепловой энергии);
- в районах электроснабжения нетяговых и нетранспортных потребителей для снижения затрат на энергообеспечение и повышение качества электроэнергии (в частности, для уменьшения отклонений напряжения, вызываемых резкопеременной тяговой нагрузкой);
- для питания автономных объектов ЖД транспорта с использованием нетрадиционных возобновляемых источников энергии.

На рис. 5 представлена структурная схема энергообеспечения типичного предприятия железнодорожного транспорта.

Как правило, предприятия имеют собственные теплоисточники, многие из которых не отвечают современным требованиям и требуют реконструкции. При проведении технического перевооружения возможна реализация принципа когенерации, т.е. совместной выработки тепловой и электрической энергии. В качестве технических средств для этой цели могут использоваться паровые роторные объемные машины (ПРОМ) и паровые винтовые машины (ПВМ) [6]. В целом ряде случаев применение такого технического решения будет экономически эффективным. Ниже рассмотрены электротехнические эффекты от применения генераторов небольшой мощности в системах электроснабжения предприятий железнодорожного транспорта.

Следует отметить, что применение таких генераторов в системах электроснабжения предприятий железнодорожного транспорта,

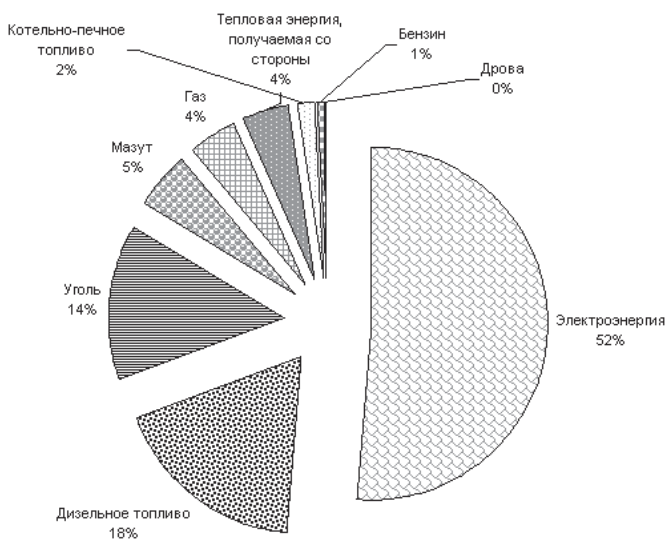


Рис. 4. Отраслевая структура энергопотребления по энергоносителям

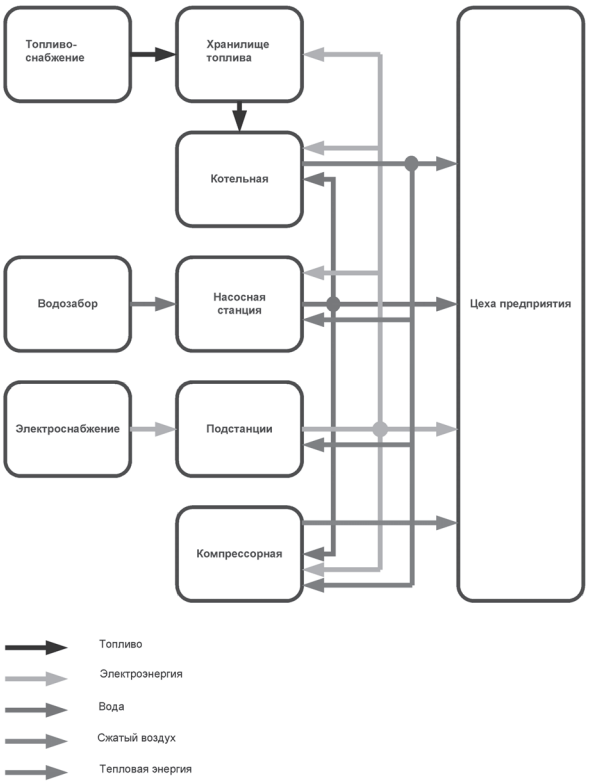


Рис. 5. Структурная схема энергообеспечения типичного предприятия железнодорожного транспорта

обычно потребляющих мощности порядка нескольких МВА, не способно заменить электроснабжение от ЭЭС. Вместе с тем питание таких предприятий осуществляется, как правило, от тяговых подстанций с пониженным качеством электроэнергии. При этом имеют место значительные отклонения напряжения, несимметрия, несинусоидальность, существенное влияние тяговой сети на линии электропередачи. Правильный выбор мощности и мест расположения установок распределенной генерации способны привести к существенному улучшению качества электрической энергии в системах электроснабжения предприятий железнодорожного транспорта и других объектов, получающих электроэнергию от этих систем.

В наибольшей мере влияние электрической тяги на качество электрической энергии сказывается при наиболее распространенном виде тягового электроснабжения переменного тока 1х25 кВ ввиду наличия однофазных несинусоидальных тяговых нагрузок и значительного электропотребления тяговыми подстанциями, от которых получают питание и нетяговые потребители. В наиболее неблагоприятной ситуации оказываются электрически удаленные нетяговые потребители, где наблюдаются самые большие отклонения напряжения вместе с существенными несимметрией и несинусоидальностью. Оценить воздействие установок распределенной генерации на улучшение качества электроэнергии, определить область их влияния и места наилучшего расположения можно с применением методики и программного комплекса имитационного моделирования, разработанного в ИрГУПСе [16, 17].

Метод моделирования в фазных координатах многопроводных систем [16] основан на использовании решетчатых схем замещения воздушных и кабельных линий, трансформаторов и автотрансформаторов. Конкретной реализацией метода является созданный в ИрГУПСе комплекс программ «Fazonord-Качество — расчеты показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения в фазных координатах с учетом движения поездов» [17], предназначенный для расчетов режимов СТЭ переменного тока совместно с питающей ЭЭС и районами электроснабжения нетяговых и нетранспортных потребителей. Комплекс позволяет проводить имитационное моделирование режимов СТЭ переменного тока (1х25 кВ, 2х25 кВ и новых типов) с одновременным расчетом высших гармоник, генерируемых электровозами и другими источниками несинусоидальности. Рассчитываемая система может включать в свой состав воздушные линии и контактные сети любой конфигурации, трехфазные и однофазные трансформаторы с любым приемлемым на практике соединением обмоток, источники тока и ЭДС, балансирующие узлы, нагрузки в узлах сети и между ними. Токи гармоник электровоза при эффективном токе 150 А являются исходными данными при расчетах. Расчеты проводятся с использованием визуальных компонент из набора элементов.

Методика анализа влияния распределенной генерации на качество электроэнергии предприятия железнодорожного транспорта проиллюстрирована на примере системы электроснабжения локомотивного депо, получающего основное питание от обмотки 10 кВ

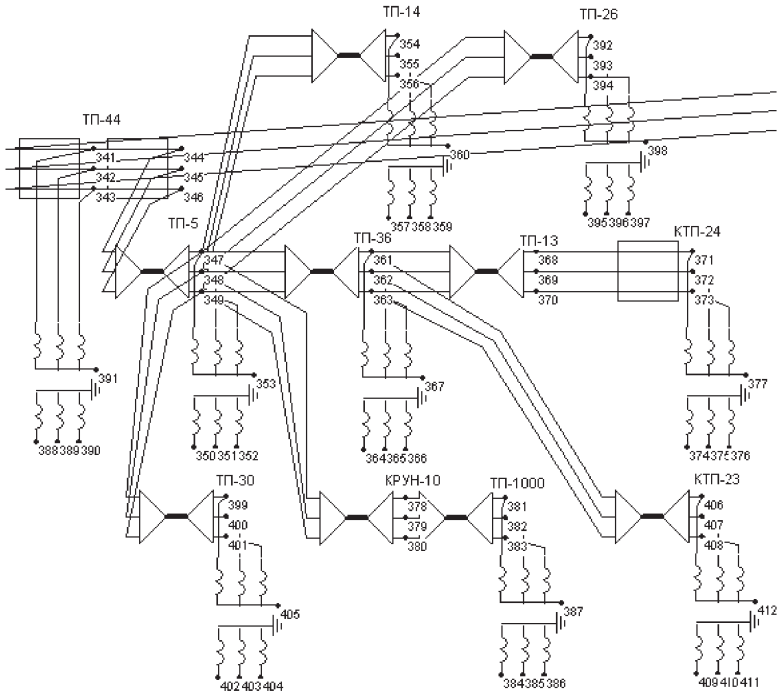


Рис. 6. Расчетная схема системы электроснабжения депо

тягового трансформатора. Часть расчетной схемы питания депо, сформированная средствами комплекса Fazonord, показана на рис. 6.

Девять трансформаторных подстанций депо получают питание по радиальным схемам со стороны ТП-44, которая через ЛЭП, выполненную проводами АС-120 длиной 7.5 км, подключена к шинам 10 кВ тяговой подстанции. Опорная тяговая подстанция с фазировкой III типа получает питание от двухцепной ЛЭП 110 кВ. Мощность короткого замыкания в точке подключения ТП составляет 770 МВА. На тяговых шинах в узлах 68, 70 подключены устройства параллельной компенсации с установленной мощностью 7200 квар и полезной мощностью 4000 квар.

Небольшая мощность короткого замыкания в точке подключения питающей ТП к ЭЭС приводит к сильному влиянию однофазных тяговых нагрузок. На рис. 7 черной линией показано расчетное изменение напряжения фазы С шин 0.4 кВ (узел 376) электрически наиболее удаленной трансформаторной подстанции КТП-24 в режиме без дополнительного генератора. Фаза С соответствует наиболее загруженной фазе тягового трансформатора с наибольшими отклонениями напряжения. При прохождении вблизи подстанции поездов массой 6300 т напряжение снижается до недопустимо низких значений.

Установка фиксированной генерации 80 + j60 кВ·А в узлах 347, 348, 349 приводит к подъему минимального напряжения фазы С всего на 4 В, а в среднем напряжение повышается на 3 В. Если генератор имеет устройства автоматического регулирования возбуждения (АРВ), то ситуация улучшается более существенно: минимальное напряжение повышается на 23 В, а среднее значение напряжения — на 24 В (рис. 7, тонкая серая линия). Таким образом, можно обеспечить приемлемые отклонения напряжения на шинах наиболее удаленной трансформаторной подстанции предприятия.

Большие отклонения напряжения, вызванные однофазными тяговыми нагрузками, приводят к большой несимметрии напряжения стороны 0.4 кВ КТП-24. На рис. 8 показана динамика изменения коэффициента несимметрии по обратной последовательности при наличии и отсутствии собственного генератора депо. В последнем случае коэффициент несимметрии достигает 21% (без учета симметрирующего эффекта асинхронной нагрузки) с превышением предельно допустимого уровня большую часть времени. При наличии генератора с АРВ наблюдается снижение максимального значения коэффициента несимметрии на 7%.

Создаваемая тяговыми нагрузками несинусоидальность напряжения на шинах 0.4 кВ КТП-24 из-за большой электрической удаленности и фильтрации гармоник, кратных трем, существенно снижается по сравнению с несинусоидальностью на шинах тяговой подстан-

Рис. 7. Изменение напряжения фазы С КТП-24 при движении поездов

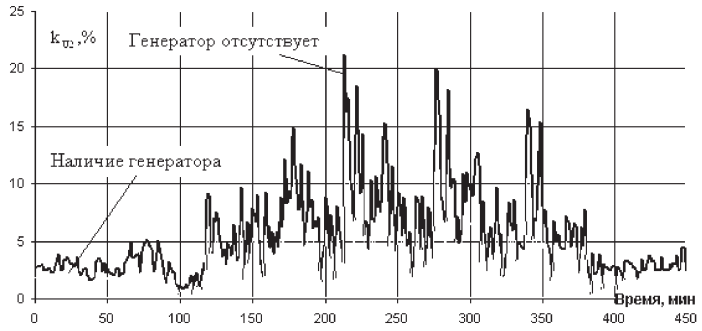


Рис. 8. Коэффициент несимметрии напряжения на шинах 0.4 кВ КТП-24

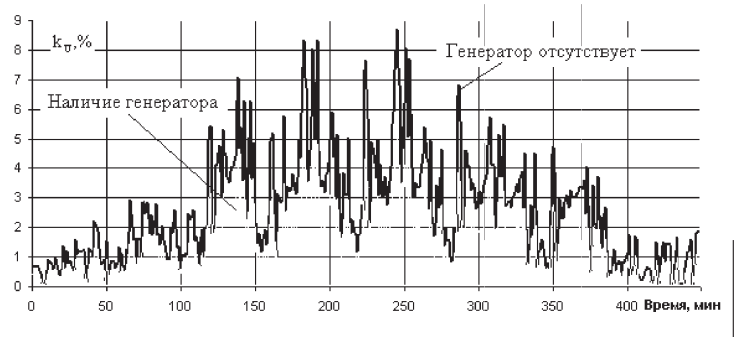


Рис. 9. Коэффициент несинусоидальности напряжения на шинах 0.4 кВ КТП-24

ции. На рис. 9 показана динамика изменения коэффициента искажения кривой синусоидальности напряжения. Наблюдается существенное — до двукратного — снижение коэффициента несинусоидальности при наличии собственного генератора депо.

Выводы

1. Сферами применения установок распределенной генерации на железнодорожном транспорте являются следующие направления:

• объекты железнодорожного транспорта (включая электрическую тягу поездов) в регионах с потенциально неустойчивым электроснабжением;

• для повышения надежности электроснабжения ответственных потребителей при создании транспортно-энергетических коридоров, совмещающих трассы железной и автомобильной дорог, высоковольтные ЛЭП и линии связи;

• на предприятиях железнодорожного транспорта, имеющих собственные теплоисточники (использование режимов совместной генерации электрической и тепловой энергии);

• в районах электроснабжения нетяговых и нетранспортных потребителей для снижения затрат на энергообеспечение и повышение качества электроэнергии (в частности, для уменьшения отклонений напряжения, вызываемых резкопеременной тяговой нагрузкой);

• для питания автономных объектов ЖД транспорта с использованием нетрадиционных возобновляемых источников энергии.

2. Для анализа возможностей применения установок распределенной генерации в системах электроснабжения железнодорожного транспорта могут быть применены методика и программные средства имитационного моделирования систем электроснабжения в фазных координатах.

3. Установки распределенной генерации могут быть применены для снижения отклонений и несимметрии напряжения в системах электроснабжения предприятий железнодорожного транспорта.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Фотин, В.П. Рассредоточенная энергетика [Электронный ресурс] / В.П. Фотин. — http://www.vei.ru/public/public2.htm.
2. Фотин, В.П. Технологическая стратегия электроэнергетической системы России [Текст] / В.П. Фотин, В.Г., Аракелян // Электричество. — № 9. — 2001. — С. 12-20.
3. Фотин, В.П. Энергетика и экономика России: виртуальное настоящее и реальное будущее [Электронный ресурс] / В.П. Фотин. — http://www.vei.ru/public/public2.htm.
4. Агроскин, В. Распределённая генерация, перспективы и проблемы [Электронный ресурс] / В. Агроскин // ЭСКО. — № 7(19). — 2003. — http://esco-ecosys.narod.ru/journal/journal19.htm.
5. Фотин, В.П. Электрификация теплоснабжения [Электронный ресурс] / В.П. Фотин. — http://www.vei.ru/public/public2.htm.
6. Пейсахович, В. Роль малой энергетики в решении проблем энергетического обеспечения потребителей [Электронный ресурс] / В. Пейсахович // Энергорынок. — № 5. — 2005. — http://www.e-m.ru.

7. Куро, Ж. Современные технологии повышения качества электроэнергии при ее передаче и распределении [Электронный ресурс] / Ж. Куро. — Новости электротехники. — 2005. — № 1 (31). — http://news.elteh.ru/arh.
8. Котельников, А.В. Энергетическая стратегия железных дорог России [Электронный ресурс] / А.В. Котельников // Железные дороги мира. — № 2. — 2005. — http://www.css-mps.ru/zdm/index.html.
9. Василянский, А. М. Совершенствование системы тягового электроснабжения железных дорог, электрифицированных на переменном токе 27,5 кВ, 50 Гц [Текст] / А.М. Василянский, Р.Р. Мамошин, Г.Б. Якимов // Железные дороги мира. — 2002. — № 8. — С. 40-46.
10. Бородулин Б. М. Симметрирование токов и напряжений на действующих тяговых подстанциях переменного тока [Текст] / Б.М. Бородулин // Вестник ВНИИЖТ. 2003. №2.
11. Бардушко, В.Д. Режимы работы системы тягового электроснабжения напряжением 94 кВ с симметрирующими трансформаторами [Текст] / В.Д. Бардушко, В.П. Закарюкин, А.В. Крюков // Вестник ВНИИЖТ. — 2005. — №3. — С. 44-47.
12. Закарюкин, В.П. Имитационное моделирование системы тягового электроснабжения 94 кВ с симметрирующими трансформаторами [Текст] / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков // Вестник ВНИИЖТ. — 2005. — №5. — С. 12-17.
13. Марквардт, К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / К.Г. Марквардт. — М.: Транспорт, 1982. — 528 с.
14. Поплавский, А.Н. Электроэнергетика предприятий железнодорожного транспорта [Текст] / А.Н. Поплавский. — М.: Транспорт, 1981. — 264 с.
15. Поплавский, А.Н. Стационарная электроэнергетика железнодорожного узла [Текст] /. А.Н. Поплавский, Б.Д. Краснов, В.В. Недачин. — М.: Транспорт, 1986. — 279 с.
16. Закарюкин, В.П. Имитационное моделирование систем тягового электроснабжения [Текст] / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков — Иркутск: ИрГУПС, 2007. — 124 с.
17. Свидет. об офиц. регистр. программы для ЭВМ №2007612771 (РФ) «Fazonord-Качество — Расчеты показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения в фазных координатах с учетом движения поездов» / Закарюкин В.П., Крюков А.В. — Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. — Зарегистр. 28.06.2007.

Зоркальцев В.И., Медвежонков Д.С. УДК [51.001.57+519.853]:656

ТРАНСПОРТНАЯ МОДЕЛЬ С НЕЛИНЕЙНЫМИ ЗАТРАТАМИ НА ПЕРЕВОЗКУ

Введение. В статье рассматривается математическая модель транспортной системы, осуществляющей транспортировку однородной продукции из одних пунктов в другие. Особенностью модели является нелинейность зависимости между объемами перевозок и издержками.

Можно выделить два подхода к исследованию транспортных задач. Первый основан на построении оптимизационной задачи и поиске экстремального решения [2], второй — на составлении условий равновесия и определении значений показателей экономической системы, удовлетворяющих этим условиям [10,11]. Рассматриваемая модель, в некоторой степени, сочетает оба подхода. Модель описывается исходной задачей оптимизации и дополняется двойственной к ней. Рассматривается система условий, решение которой соответствует точке равновесия (оптимума) двойственных задач.

По традиции, восходящей к пионерным работам в математической экономике, транспортная задача часто рассматривается в ли-

нейной постановке, только с линейными зависимостями издержек от объемов перевозок [3,9]. Вместе с тем есть работы, например [2], в которых вводятся нелинейные зависимости затрат на перевозки от их объемов. Нелинейные затраты точнее описывают ситуации, возникающие в реальных транспортных системах. И этот факт важно учитывать как при выборе оптимальных планов перевозок и при формировании тарифов на перевозки, так и при экономической интерпретации получаемых решений и свойств транспортной задачи.

В данной статье рассматривается наиболее простой случай нелинейной транспортной задачи, когда предельные затраты на перевозки являются для каждой дуги непрерывной монотонно возрастающей функцией, что, в частности, исключает многоэкстремальность задачи. Исследование такой транспортной задачи было начато в работе [6] в связи с изучением электрических и гидравлических цепей [4,7]. Существует аналогия между техническими системами потокораспределения и нелинейной транспортной задачей, что полезно учитывать. В частности здесь, также как и в книге Денниса [4], посвященной электрическим цепям, при формулировке транспортной задачи в виде двойственной задачи оптимизации будем использовать свойства сопряженных функций Лежандра и их обобщения в виде сопряженных функций Фенхеля [8].

Конечно, изучаемым в данной статье случаем не исчерпываются все возможные формулировки нелинейных транспортных задач. Вместе с тем, изучение этого случая необходимо для прояснения более общих ситуаций. Исследуемая здесь модель может быть полезна для описания функционирования различных систем надземного, подземного, водного и воздушного транспорта (в которых перевозчик может распределять объемы перевозок по ветвям сети). Она может быть полезна для изучения проблем и механизмов управления железнодорожными перевозками, системами транспорта тепла, электроэнергии, воды, природного газа. Особенно в связи с осуществляемыми в этих системах реформами. В частности, важной проблемой для этих систем является формирование рациональных транспортных тарифов, которые должны с одной стороны покрывать издержки и, с другой стороны, стимулировать пользователей трубопроводных, электрических сетей и железных дорог к рационализации перевозок.

1. Постановка нелинейной транспортной задачи. Опишем транспортную систему с помощью направленного графа, имеющего m узлов (транспортные развязки), и n ветвей (транспортные связи). Положительное направление ветвей будет показывать, в какую сторону осуществляется неотрицательная по объему транспортировка груза. Будем считать, что все объемы перевозок неотрицательны. Если транспортировка между какими-то двумя узлами может осуществляться в обе стороны, то на графе задается отдельная ветвь для каждого направления. Матрицу инциденций узлов и ветвей графа размера mn обозначим A, её элементы имеют значения:

$$\begin{cases} 0, & \text{если узел } i \text{ не связан с ветвью } j, \\ -1, & \text{если узел } i \text{ является началом дуги } j, \\ +1, & \text{если узел } i \text{ является концом дуги } j. \end{cases}$$

Обозначим $b_i > 0$ — количество груза, выходящего из сети к потребителю в узле i. При $b_i < 0$ будем считать, что груз в i-м узле поступает в сеть из источника в количестве $|b_i|$. Считаем, что суммарный объем поставляемых в транспортную систему грузов равен объему выходящих из системы грузов,

$$\sum_{i=1}^{m} b_i = 0. \qquad (1)$$

Обозначим искомый план перевозок вектором $x = (x_1, \ldots, x_n)^T$ где x_j - количество груза, которое необходимо перевезти по ветви j. Пусть $G_j(x_j)$ — функция издержек на перевозки по ветви j, значение которой зависит от объемов перевозок по данной ветви. Будем считать, что эта функция является суммой нелинейной и линейной функций

$$G_j(x_j) = F_j(x_j) + s_j x_j \qquad (2)$$

где s_j — заданный коэффициент при линейной функции. Считаем, что функция F_j равна нулю в нуле. Из чего следует, что G_j равна нулю в нуле. Это означает, что функция G_j выражает только переменные издержки, зависящие от объемов перевозок. Постоянные издержки, не зависящие от объемов перевозок, здесь не учитываются, поскольку их значение не влияет на выбор оптимального плана перевозок.

Обозначим Z — множество непрерывно дифференцируемых функций вещественного аргумента, равных нулю в нуле, производные которых монотонно возрастают, равны нулю в

нуле и принимают значения от 0 до +∞ при изменении аргумента от 0 до +∞.

В данной статье ограничимся случаем, когда все функции F_j находятся в Z. Это, в частности, означает, что предельные издержки на каждой ветви будут монотонно возрастающими функциями от объемов перевозок по этим дугам. Эти предельные издержки, определяемые согласно экономической теории как частные производные функции переменных издержек, будут в данном случае суммой значений производной функции F_j и величины s_j. Величину s_j можно назвать постоянной (не зависящей от объема перевозок) составляющей предельных издержек. Производную функции F_j можно назвать переменной (зависящей от объема перевозок) составляющей предельных издержек.

Введем сепарабельные функции вектора $x \in R_+^n$

$$G(x)=\sum_{j=1}^{n} G_j(x_j),\ F(x)=\sum_{j=1}^{n} F_j(x_j).$$

Здесь R_+^n — множество векторов R^n с неотрицательными компонентами. Пусть $s \in R^n$ — вектор-столбец, составленный из величин s_j, а s^T — его транспонирование. Согласно (2))

$$G(x)=F(x)+s^T x. \qquad (3)$$

Исходная задача оптимизации. Рассматривается задача поиска такого плана перевозок, при котором суммарные издержки минимальны

$$G(x)\to \min \qquad (4)$$

и выполняются ограничения

$$Ax=b,\ x>0. \qquad (5)$$

Первое условие в (5) выражает баланс входящих и выходящих потоков в каждом узле, аналог первого закона Кирхгофа. План перевозок $x \in R^n$, удовлетворяющий условиям (5), будем называть допустимым. План перевозок, при котором достигается решение задачи (4), (5) будем называть оптимальным планом перевозок.

Из условия $F_j \in Z,\ j=1,\dots,n$ следует, что при любом $s \in R^n$ определяемая по правилу (3) функция G будет строго выпуклой и будет иметь ограниченное множество Лебега, т.е. при любом α множество

$$X_\alpha=\left\{x \in R_+^n : G(x) \le \alpha\right\}$$

будет ограниченным, возможно пустым.

Теорема 1. Для существования решения задачи (4), (5) необходимо и достаточно непротиворечивости ограничений (5). Причем если у данной задачи имеется оптимальный план, то он единственный.

Доказательство. Ограниченность множества Лебега при α, равном значению целевой функции G при каком-то допустимом плане, означает существование оптимального решения у задачи. Строгая выпуклость G и выпуклость множества допустимых по условиям (5) решений означают, что решение у задачи (4), (5) может быть только единственным.

Теорема 1 доказана.

Замечание. Отметим, что для существования допустимого плана перевозок необходимо выполнение условия (1). Это условие становится достаточным, если граф транспортной сети является связным. Связным будем называть такой граф транспортной сети, при котором из любого узла можно доставить груз в любой другой узел: для любых двух номеров узлов $l,h \in \{1,\dots,m\}$ при векторе $e^{lh} \in R^m$ таком что $e_l^{lh}=1,\ e_h^{lh}=-1,\ e_i^{lh}=-1,\ i \ne l,\ i \ne h,$

должна иметь решение система линейных уравнений и неравенств $Ax=e^{lh},\ x>0.$

2. Представление транспортной задачи в виде системы уравнений. Нелинейную транспортную модель можно представить не только в виде задачи оптимизации, но и в виде системы уравнений, опираясь на необходимые и достаточные условия оптимальности для задачи минимизации дифференцируемой выпуклой функции при линейных ограничениях.

В данном разделе приведем несколько систем уравнений с такими же как у исходной задачи оптимизации (4), (5) составом исходных данных. Все рассматриваемые здесь системы уравнений, как будет показано, являются равносильными задаче (4), (5): либо все рассматриваемые здесь задачи и задача (4), (5) не имеют решения, либо все они имеют решение. Причем решение любой из этих задач является решением остальных.

Сопряженные функции. Для каждой функции V из Z существует и единственна функция W из Z такая, что производные функций V и W являются взаимно обратными функциями на множестве неотрицательных чисел. Такие пары функций V и W из Z будем называть сопряженными. Это понятие сопряженных функций является частным случаем сопряженных функций Лежандра и Фенхеля [4,

6, 8]. В частности, для них выполняется условие сопряженности Фенхеля [8]:

$$W(\alpha)=\arg\max_{\beta}\{\alpha\beta-V(\beta)\},\ \ \alpha\ge 0. \qquad (6)$$

Обозначим Φ_j функцию из Z, сопряженную к F_j, т.е. F_j и Φ_j составляют пару сопряженных функций. Обозначим

$$f_j(x_j)=\frac{dF_j(x_j)}{dx_j},\ \varphi_j(y_j)=\frac{d\Phi_j(y_j)}{dy_j},$$

производные функций F_j и Φ_j. Они заданы на множестве неотрицательных вещественных чисел, $x_j>0,\ y_j>0$. Введенные функции являются взаимно обратными в силу условия сопряженности:

$$f_j(\varphi_j(y_j))=y_j,\ \ \varphi_j(f_j(x_j))=x_j, \qquad (7)$$

для любых $y_j\ge 0,\ x_j\ge 0$.

Из условия сопряженности Фенхеля (6) следует, что при $x_j>0,\ y_j>0$ если $y_j=f_j(x_j)$, то

$$F_j(x_j)+\Phi_j(y_j)=x_jy_j, \qquad (8)$$

если $y_j\ne f_j(x_j)$, то

$$F_j(x_j)+\Phi_j(y_j)>x_jy_j. \qquad (9)$$

Введем сепарабельную функцию от вектора $y\in R^n_+$. Пусть

$$\Phi(y)=\sum_{j=1}^{n}\Phi_j(y_j).$$

Обозначим $f(x)$, $\varphi(y)$ вектор-функции с компонентами $f_j(x_j)$ и $\varphi_j(y_j)$ для $j=1,\dots,n$.

Исходная система уравнений. Рассматривается задача поиска векторов $x\in R^n$, $y\in R^n$, $u\in R^m$, удовлетворяющих условиям

$$Ax=b,\ x\ge 0, \qquad (10)$$

$$y=(A^Tu-s)_+, \qquad (11)$$

$$y=f(x). \qquad (12)$$

Здесь символом $(\cdot)_+$ обозначена неотрицательная срезка вектора: для $x\in R^n$ выражение x_+ соответствует вектору из R^n с компонентами

$$(x_+)_j=\max(0,x_j),\ j=1,\dots,n.$$

Теорема 2. Система (10) – (12) имеет решение в том и только том случае, если имеет решение исходная задача оптимизации (4), (5). Причем для всех решений системы (10) – (12) векторы x и y имеют единственное значение, вектор x совпадает с оптимальным планом исходной задачи оптимизации (4), (5). Вектор u состоит из множителей Лагранжа балансовых ограничений задачи (4), (5) и имеет неединственное значение в решении системы (10) – (12).

Доказательство. Из условия оптимальности для задачи минимизации дифференцируемой выпуклой функции при линейных ограничениях (см, например, [6, стр. 121]) следует, что вектор будет решением задачи (4), (5) в том и только том случае, если этот вектор удовлетворяет условиям (10) и при некотором выполняются соотношения

$$f(x)+s\ge A^Tu, \qquad (13)$$

$$x_j\left(f_j(x_j)+s_j-(A^Tu)_j\right)=0,\ j=1,\dots,n. \qquad (14)$$

Отметим, что в приведенных условиях вектор $f(x)+s$ является градиентом целевой функции $G(x)$ в точке x. Соотношение (14) принято называть условием дополняющей нежесткости.

Докажем, что условия (10) – (12) и условия (10), (13), (14) равносильны. Условие (12) можем рассматривать как определение вектора y. Согласно (12) векторы $f(x)$ и y совпадают. Требуется доказать, что при выполнении условия (10) равносильными являются условие (11) и условия (13), (14). Поскольку f_i – производная функции F_j из Z, то в силу постулированных свойств функций множества Z возможны только два случая при выполнении (12): либо $x_j>0$ и $y_j>0$, либо $x_j=0$ и $y_j=0$.

Из условия дополняющей нежесткости (14) следует, что если $x_j>0$, то

$$y_j=\left(A^Tu-s\right)_j.$$

Поскольку в этом случае $y_j>0$, то справедливо равенство

$$y_j=\max\left\{0,\ \left(A^Tu-s\right)_j\right\}.$$

Из условия дополняющей нежесткости и неравенства (13) следует, что если $x_j=0$, то

$$y_j>\left(A^Tu-s\right)_j.$$

Поскольку в этом случае $y_j=0$, то опять-таки выполняется соотношение (15).

Выполнение для всех $j=1,\dots,n$ соотношения (15) означает справедливость (11). Итак, доказано, что из выполнения условий (10), (13), (14) для векторов x, u следует выполнение для этих же векторов и вектора y, определяемого по правилу (12), условий (10), (11).

Осталось доказать обратное – если векторы x, y, u удовлетворяют условиям (10) – (12), то векторы x, u удовлетворяют условиям (13), (14). Действительно, согласно (11)

$$y_j\ge\left(A^Tu-s\right)_j,$$

что в силу (12) означает выполнение неравенства (13). Поскольку $y_j > 0$ при $x_j > 0$, то в этом случае из (11) следует, что

$$y_j = \left(A^T u - s\right)_j .$$

Следовательно,

$$x_j \left(f_j(x_j) + s_j - (A^T u)_j\right) = 0.$$

Поэтому выполняется условие (14). Очевидно, что это условие выполняется и при $x_j = 0$.

Итак, эквивалентность системы (10) – (12) системе ограничений (10), (13), (14) и, следовательно, исходной задаче оптимизации (4), (5) доказана. Все эти три задачи либо не имеют решения, либо имеют решение. Причем в силу теоремы 1 вектор x будет иметь единственное значение среди решений системы (10) – (12). В силу (12) вектор y также может иметь только единственное значение в решении системы (10) – (12).

Вектор u может иметь неединственное значение среди решений системы (10) – (12), в том числе, если $rank\ A < m$. Именно такой случай имеет место в рассматриваемой транспортной задаче, поскольку сумма строк матрицы A равна нулю.

Теорема 2 доказана.

Экономическая интерпретация. Компоненты вектора $(y + s)$ можно рассматривать как значения тарифов на перевозки грузов по отдельным ветвям, если считать, что тарифообразование осуществляется по предельным издержкам. Часть тарифа на ветви j, равная s_j, не зависит от объема перевозки по ветви. Часть тарифа на ветви j, равная y_j, в силу (12) зависит от объема перевозки по ветви. С ростом объема перевозки на любой ветви предельные издержки и, следовательно, тариф для этой ветви возрастают.

Компоненты вектора u можно с некоторой условностью интерпретировать как значения цен на транспортируемую продукцию в отдельных узлах. Условность, в частности, вызвана тем, что этот вектор имеет неединственное значение среди решений системы (10) – (12). Добавление ко всем компонентам вектора $u \in R^n$ из решения системы (10) – (12) любой константы $\lambda \in R$ приведет к вектору $\tilde{u}$ с компонентами $\tilde{u} = u_i + \lambda$, который также будет удовлетворять условиям системы (10) – (12). Поэтому более точно будет интерпретировать разницу значений $\left(A^T u\right)_j$ компонент вектора u как относительное приращение цены транспортируемой продукции в конечном узле по сравнению с начальным для дуги j=1, ..., n. Это приращение цены согласно условию (11) не превышает величину полного тарифа $y_j + s_j$ на перевозки из одного узла в другой узел ветви j.

Из свойств функций множества Z следует, что если в оптимальном плане по ветви j осуществляется транспортировка (т.е. $x_j > 0$), то $y_j > 0$. Согласно (11) в этом случае выполняется равенство

$$y_j + s_j = \left(A^T u\right)_j .$$

Это значит, что тариф на транспортировку по ветви j равен разнице цен в конечном и начальном узле ветви.

Если $x_j = 0$, то $y_j = 0$ и условие (11) приобретает вид

$$s_j > \left(A^T u\right)_j .$$

В этом случае тариф на транспортировку равен s_j и он не меньше разницы цен в конечном и начальном узлах ветви.

Уместно отметить, что величина постоянной составляющей предельных издержек s_j в рассматриваемой здесь постановке транспортной задачи может иметь как неотрицательное, так и отрицательное значение. В случае $s_j < 0$ при некоторых объемах перевозок по данной ветви будем иметь отрицательное значение тарифа, т.е. доплаты. На первый взгляд такая ситуация кажется парадоксальной. Вместе с тем, она вполне реальна. Например, некоторые западноевропейские страны в прошлые годы возвращали часть денег за купленную у них сельскохозяйственную продукцию при перевозке её в Россию. Это делалось под предлогом, что в цене этой продукции содержатся налоги, которыми не пользуются покупатели в России. На самом деле это была скрытая форма протекционизма.

Согласно условию дополняющей нежесткости (14)

$$x^T (y + s - A^T u) = 0 \Rightarrow x^T (y + s) = x^T A^T u.$$

Так как

$$x^T A^T u = (Ax)^T u = b^T u ,$$

то получаем соотношение

$$x^T (y + s) = b^T u. \qquad (16)$$

Это соотношение означает, что для оптимального плана перевозок сумма произведений предельных издержек на объемы перевозок по всем ветвям сети должна быть равна суммарной выручке от перевозки. Последняя величина равна стоимости продукции, выхо-

дящей из сети в узлах-потребителях, за вычетом стоимости продукции, входящей в транспортную систему в узлах-источниках.

Модификации исходной системы уравнений. Кроме (10) – (12) могут быть предложены и другие формы представления нелинейной транспортной задачи в виде системы уравнений. Разные формы записи системы уравнений могут быть применены, в частности, для разработки алгоритмов поиска решения нелинейной транспортной задачи.

1. Согласно (7) уравнение (12) можно заменить следующим:

$$x = \varphi(y). \qquad (17)$$

2. Из свойств сопряженных функций (8), (9) следует, что условие (12) можно заменить ограничениями

$$F_j(x_j) + \Phi_j(y_j) - x_j y_j = 0,\ j = 1,\dots,n, \qquad (18)$$

Причем эти n ограничений можно представить в виде одного нелинейного ограничения

$$F(x) + \Phi(y) - x^T y = 0. \qquad (19)$$

3. Из (16), (19) следует, что условие (12) равносильно следующему ограничению при выполнении условий (10), (11):

$$F(x) + \Phi(y) - b^T u + s^T x = 0. \qquad (20)$$

4. Добавим и вычтем $s_j x_j$ в левой части j-го равенства (18):

$$F_j(x_j) + s_j x_j + \Phi_j(y_j) - x_j(y_j + s_j) = 0,\ j = 1,\dots,n. \qquad (21)$$

Из условия дополняющей нежесткости (14) следует, что

$$x_j(y_j + s_j) = x_j(A^T u)_j.$$

Значит условие (12) в системе (10) – (12) можно заменить также на ограничения

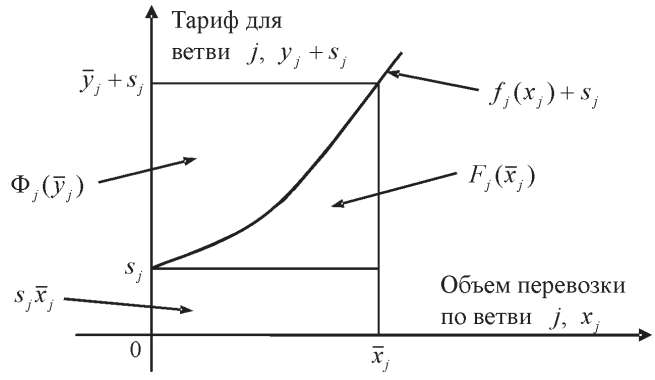


Рис. 1. Взаимосвязь объема перевозки x_j по ветви j и тарифа $y_j + s_j$. Здесь $\bar{x}_j$ – оптимальный объем перевозки, $\bar{y}_j + s_j$ – тариф на ветви j, равный $f_j(\bar{x}_j) + s_j$

$$F_j(x_j) + s_j x_j + \Phi_j(y_j) - x_j(A^T u)_j = 0, j = 1,\dots,n. \qquad (22)$$

5. Используя специфику системы (10) – (12), её можно свести к проблеме решения системы уравнений с меньшим количеством переменных. Так, выразив из (11), (17) вектор x через вектор u, придем к следующей системе из m нелинейных уравнений относительно m-мерного вектора переменных u:

$$A\varphi(A^T u - s)_+ = b. \qquad (23)$$

Вычислив вектор u в результате решения данной системы, прямым счетом из (11) найдем вектор y, а из (17) найдем вектор x.

Замечание. На рис. 1 проиллюстрировано равенство (21) для ветви j. Считаем, что тарифообразование осуществляется по предельным издержкам. Тогда величина $\bar{x}_j(\bar{y}_j + s_j)$ соответствует стоимости перевозки груза в объеме $\bar{x}_j$ по ветви j. Из рис. 1 видно, что площадь прямоугольника со сторонами длиной $\bar{x}_j$ и $\bar{y}_j + s_j$ является суммой площадей двух фигур. Площадь фигуры, расположенной под графиком функции предельных издержек $f_j(x_j) + s_j$, равна величине $F_j(\bar{x}_j) + s_j \bar{x}_j$. Это соответствует переменным затратам на перевозку по ветви j. Площадь фигуры, расположенной над графиком функции $f_j(x_j) + s_j$, равна $\Phi_j(\bar{y}_j)$. Эту величину в соответствии с терминологией принятой в экономической теории [4], можно назвать дополнительным доходом перевозчика (surplus).

3. Эквивалентные задачи оптимизации, двойственная задача оптимизации. Рассмотрим задачу минимизации дифференцируемой выпуклой функции при линейных ограничениях: найти векторы $y \in R^n$, $u \in R^m$ из условия

$$\Phi(y) - b^T u \to \min \qquad (24)$$

при ограничениях

$$y - A^T u \geq -s,\ y \geq 0. \qquad (25)$$

Теорема 3. Задача оптимизации (24), (25) имеет решение в том и только том случае, если имеет решение система (10) – (12). Причем если векторы x, y, u составляют решение системы (10) – (12), то векторы y, u будут составлять решение задачи (24), (25), а вектор x будет состоять из множителей Лагранжа для первого ограничения в условии (25). И наоборот, если векторы y, u составляют решение задачи (24), (25), а вектор x состоит из множителей Лагранжа ограничений в первом условии из (25), то векторы x, y, u составят решение системы (10) – (12).

Доказательство. Из условий оптимальности для задачи минимизации дифференцируемой выпуклой функции при линейных ограничениях [6, стр. 121] следует, что векторы $y \in R^n$, $u \in R^m$, удовлетворяющие условиям (25), будут решениями задачи (24), (25) в том и только том случае, если при некотором $x \in R^n$ выполняются соотношения

$$\varphi(y) \geq x, \qquad (26)$$

$$x \geq 0, \ -b = -Ax \qquad (27)$$

$$y_j(\varphi(y_j) - x_j) = 0, \quad j = 1, \ldots, n. \qquad (28)$$

Необходимо доказать, что условия (25) — (28) и условия (10) — (12) равносильны.

Пусть выполняются условия (25) — (28). Из (28) следует, что при $y_j > 0$

$$\varphi_j(y_j) = x_j, \qquad j = 1, \ldots, n.$$

Если $y_j = 0$, то $\varphi_j(y_j) = 0$ и из (26) и первого условия в (27) следует, что $x_j = 0$. Итак, доказано, что соотношение (12) выполняется.

Согласно первому условию в (25)

$$y \geq A^T u - s.$$

Производная $\varphi_j(y_j)$ функции $\Phi_j(y_j)$ является монотонно возрастающей при любом $y_j \geq 0$. Поэтому если величина $\left(A^T u - s\right)_j$ положительна для решения задачи (24), (25), то с ней будет совпадать оптимальное значение y_j. Итак,

$$y_j = \left(A^T u - s\right)_j, \text{ если } \left(A^T u - s\right)_j > 0.$$

В силу того, что $y \geq 0$

$y_j = 0$, если $\left(A^T u - s\right)_j \leq 0$.

Эти соотношения означают выполнение (11). Условия (27) совпадают с (10).

Докажем теперь обратное, т.е. то, что из выполнения условий (10) — (12) следует выполнение условий (25), (26), (28). Условие (26) вытекает из (12). Из (12) следует, что $\varphi(y) = x$ и поэтому выполняется (28). Условия (25) являются следствием условия (11).

Теорема 3 доказана.

Замечания. 1. Из теорем 1, 2 следует, что исходная задача оптимизации (4), (5) и приведенная здесь двойственная задача оптимизации (24), (25) равносильны. Возможны только два случая: либо обе задачи не имеют решения, либо обе имеют решение. Если решения есть, то они совпадают — расширенное решение одной из этих задач является расширенным решением другой (условимся, что расширенное решение включает три вектора: x, y, u — не только оптимальные значения переменных, но и множители Лагранжа ограничений задач).

2. Необходимо отметить, что исходный состав переменных двойственных задач различен. В первом случае исходными переменными являются только объемы перевозок по ветвям, составляющие вектор x. В двойственной задаче переменными являются только цены в узлах (компоненты вектора u) и переменные составляющие тарифов на перевозки по ветвям (компонентами вектора y).

3. Условия (25) можно заменить выражением (11). Задача минимизации функции (24) при ограничениях (11) равносильна приведенной двойственной задаче оптимизации (24), (25) (в том смысле, что они имеют одинаковые решения). С учетом этого двойственную задачу можно представить в виде задачи безусловной оптимизации выпуклой функции с m переменными:

$$\Phi\left(A^T u - s\right)_+ - b^T u \to \min, \qquad u \in R^m.$$

Необходимым и достаточным условием существования решения является равенство нулю градиента целевой функции. Это условие совпадает с системой (23). Это совпадение можно рассматривать в качестве еще одного способа доказательства эквивалентности системы (10) — (12) и задачи (24), (25).

4. Задача (24), (25) всегда имеет допустимое решение. Например, допустимое решение составляют вектор $u = 0$ и вектор $y = -s_+$. Эта задача может не иметь решения в том и только том случае, если её целевая функция не ограничена снизу на области допустимых решений. А это возможно в том и только том случае, если при некотором $u \in R^m$ выполняются неравенства

$$A^T u \leq 0, \ \ b^T u > 0.$$

Данный факт по теореме об альтернативных системах линейных неравенств [6] возможен в том и только том случае, если не существует вектора $x \in R^n$, удовлетворяющего условиям

$$Ax = b, \ \ x \geq 0.$$

5. Двойственная задача имеет нетривиальную экономическую интерпретацию. Эта задача посвящена формированию рациональной системы тарифов. Причем в ней в явном виде никак не используются значения оптимальных объемов перевозок.

Двойственную задачу можно интерпретировать как поиск таких цен на перевозимую продукцию в отдельных узлах (составляющих

вектор u) и таких тарифов на перевозки (составляющих вектор $y+s$), при которых максимальна выручка от транспортировки (величина (b, u)) без дополнительного дохода перевозчика (величина $\Phi(y)$). Минимизация дополнительного дохода считается важнейшей целью антимонопольного регулирования [1]. Максимизация выручки от транспортировки груза — вполне естественная цель, но с учетом двух ограничивающих обстоятельств: исключение из максимизируемой выручки дополнительных доходов и выделение ограничивающих правил на ценообразование — разница цен в конечном и начальном пунктах данной ветви не должна превышать тарифа на перевозку по ней.

Приведенную экономическую интерпретацию выражает следующая форма записи задачи (24), (25):

$$b^T u - \Phi(y) \to \max, \tag{29}$$

$$y + s \geq A^T u, \quad y \geq 0. \tag{30}$$

Самосопряженная задача оптимизации. Найти векторы $x \in R^n$, $y \in R^n$, $u \in R^m$, доставляющие минимум дифференцируемой выпуклой функции

$$F(x) + \Phi(y) + s^T x - b^T u \to \min \tag{31}$$

при линейных ограничениях (5), (25).

Данная задача представляется в виде формального соединения исходной и двойственной задач оптимизации. Целевая функция (31) является суммой целевых функций (4) и (24). Ограничения представляют собой объединение ограничений указанных двух задач. Ограничения, связывающие вектор x и векторы y, u, отсутствуют. Вместе с тем самосопряженная задача представляет собой самостоятельный интерес, в том числе в вычислительном отношении.

Отметим, что самосопряженная задача имеет решение в том и только том случае, когда имеет решение исходная задача оптимизации (4), (5). Заранее известно оптимальное значение целевой функции самосопряженной задачи. Оно равно нулю в силу (20).

Рассматриваемая задача интересна в том плане, что двойственная к ней совпадает с ней же. Оптимальные значения векторов x и u будут одновременно составлять множители Лагранжа ограничений этой задачи. Этим объясняется ее название.

Симметричная задача оптимизации. Найти векторы $x \in R^n$, $y \in R^n$, $u \in R^m$, являющиеся решением экстремальной проблемы

$$F(x) + \Phi(y) - x^T y \to \min \tag{32}$$

при условиях (5), (25).

Отметим, что целевая функция данной задачи на множестве допустимых по ее ограничениям решений является выпуклой, поскольку на этом множестве значения данной целевой функции совпадают со значениями целевой функции самосопряженной задачи оптимизации.

Симметричную задачу оптимизации можно рассматривать как непосредственное воплощение экстремальной проблемы, соответствующей системе (10), (11), (19). Допустимые, но не оптимальные решения симметричной задачи дают положительные значения целевой функции. Заведомо известно, что оптимальное решение будет доставлять нулевое значение целевой функции. Также известно, что множители Лагранжа всех ограничений симметричной задачи оптимизации равны нулю. Эти факты могут эффективно использоваться в алгоритмах решения задачи.

4. Иллюстративный пример: обсуждение возможных вариантов тарифообразования. Рассмотренную модель можно интерпретировать как описание поведения транспортной компании (электросетевой, газотранспортной, теплоснабжающей, водоснабжающей, железнодорожной и др.), которая перевозит от пунктов производства к пунктам потребления некоторую продукцию (электроэнергию, газ, горячую или холодную воду, уголь). Причем модель нацелена на решение двух взаимосвязанных, но не совпадающих в содержательном плане проблем.

Во-первых, эта модель оптимизирует план перевозок — распределяет потоки по ветвям в целях минимизации затрат (переменных и одновременно полных) на перевозки. Эта проблема непосредственно представлена в виде исходной задачи оптимизации (4), (5).

Во-вторых, модель позволяет формировать систему тарифов, "зовущих к оптимуму". Получаемые в результате решения двойственной задачи оптимизации (24), (25) тарифы по предельным издержкам позволяют оценивать, к каким приращениям затрат приведут изменения в небольших масштабах заданий на перевозки (т. е. небольшие изменения компонент вектора b). Принципиально важно, что

эти тарифы могут использоваться самими клиентами для выбора ими маршрутов перевозок дополнительных грузов. Минимизация платы за перевозки дополнительных объемов грузов будет соответствовать минимизации полных издержек транспортной системы.

Недостатки тарифообразования по предельным издержкам. Многие приводимые в данной статье в качестве примеров транспортные системы являются естественными монополиями, тарифы для которых должны устанавливаться директивно государственными органами. По сложившейся в России и других странах практике установление цен и тарифов на продукцию естественных монополий осуществляется на основе не предельных, а средних издержек. Недостатком этого подхода является то, что объемы перевозок, формируемые по таким тарифам, не соответствуют минимуму суммарных издержек транспортной системы.

Отметим некоторые недостатки тарифообразования по предельным издержкам.

1. Указанная стимулирующая роль тарифов по предельным издержкам действует лишь только для относительно малых изменений объемов перевозимых грузов с малыми изменениями самих предельных издержек. При больших изменениях объемов перевозок, ведущих к большим изменениям предельных издержек, изначальные предельные издержки уже не будут играть роль цен, "зовущих к оптимуму". В этом случае требуется пересмотр тарифов.

2. Предельные издержки гораздо труднее подсчитывать на практике, чем средние издержки. Только в математических условно-иллюстративных моделях можно легко определять затраты на дополнительную единицу продукции. В бухгалтерской практике выделение такого показателя является сложным делом.

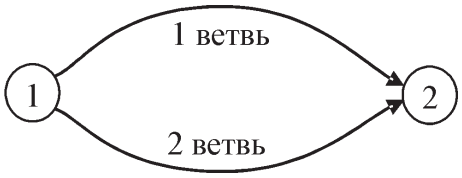


Рис. 2. Транспортная сеть между двумя узлами из двух дуг

Подсчет же средних затрат путем деления всех понесенных затрат на объем перевозок — более простая и более естественная для бухгалтерских расчетов операция (впрочем, и здесь имеются некоторые проблемы).

3. Плата за перевозки по тарифам, отражающим предельные издержки, может существенно отличаться от величины затрат, понесенных на эти перевозки транспортной компанией.

Пример, в котором сравниваются варианты тарифообразования по предельным и по средним издержкам.

Рассмотрим для примера транспортную систему представленную на рис. 2.

Необходимо из узла 1 в узел 2 перевезти груз объемом 12 единиц. Имеется две ветви, соединяющие эти узлы. Пусть x_1 и x_2 — объемы перевозок по этим ветвям. Переменные затраты на перевозки выражаются квадратичными зависимостями

$$G_1(x_1)=0{,}2x_1^2+2x_1, \qquad G_2(x_2)=0{,}5x_2^2+4x_2.$$

Исходная задача оптимизации перевозок имеет вид:

$$G_1(x_1)+G_2(x_2)\to \min,$$
$$x_1+x_2=12, \quad x_1\ge 0, \quad x_2\ge 0.$$

В табл. 1 представлены оптимальные для исходной задачи объемы перевозок $\bar{x}_j$, предельные издержки $MC_j=\dfrac{dG_j(\bar{x}_j)}{dx_j}$, средние издержки $AC_j=\dfrac{G_j(\bar{x}_j)}{\bar{x}_j}$, общие переменные из-

Таблица 1

Оптимальные по затратам перевозки при тарифообразовании по предельным издержкам

Ветвь, j	Объемы перевозок, $\bar{x}_j$	Предельные издержки, MC_j	Средние издержки, AC_j	Переменные издержки, VC_j	Плата за перевозки, PM_j	Дополнительный доход, $\Phi(\bar{y}_j)$
1	10	6	4	40	60	20
2	2	6	5	10	12	2
Всего	12	6	4,17	50	72	22

Таблица 2

Равновесные перевозки при тарифообразовании по средним издержкам

Ветвь, j	Объемы перевозок, $\bar{x}_j$	Предельные издержки, MC_j	Средние издержки, AC_j	Переменные издержки, VC_j	Плата за перевозки, PM_j	Дополнительный доход, $\Phi(\bar{y}_j)$
1	11,43	6,57	4,29	49	49	0
2	0,57	4,57	4,29	2,44	2,44	0
Всего	12	6	4,29	51,44	51,44	0

держки $VC_j = G_j(\bar{x}_j)$, плата за перевозки при тарифах по предельным издержкам $PM_j = MC_j \cdot \bar{x}_j$, дополнительный доход $\Phi(\bar{y}_j) = PM_j - VC_j$ для ветвей $j = 1, 2, ..., n$.

Из табл. 1 видно, что плата за перевозки при тарифах по предельным издержкам (равная 70 денежным единицам) существенно превышает величину издержек (равную 50 единицам). Это превышение совпадает с суммой величин дополнительных доходов $\Phi_j(\bar{y}_j)$ по обоим дугам.

В табл. 2 представлены результаты расчетов плана перевозок при тарифообразовании по средним издержкам. Эти расчеты являются решением системы (10) – (12), когда в ней вместо функций $f_j(x_j)$ используются зависимости

$$\bar{f}_j(x_j) = \frac{G_j(x_j)}{x_j} - s_j .$$

В этом случае величина $\bar{f}_j(x_j) + s_j$ будет соответствовать средним издержкам. Плата за перевозки выражается величиной

$$PM_j = AC_j \cdot \bar{x}_j ,$$

поэтому решение $\bar{x}$ названо равновесным при тарифообразовании по средним издержкам. Плата за перевозки существенно ниже, чем для варианта из табл. 1. Эта плата совпадает с издержками, и поэтому дополнительный доход – нулевой. При этом общие издержки на перевозку выше, чем при оптимальном плане.

5. Развитие исследований. Можно выделить следующие направления развития рассмотренной здесь нелинейной транспортной модели.

1. Отказ от условий монотонного возрастания функций предельных затрат. Не только теоретический, но и практический интерес представляет случай со снижающимися предельными издержками при увеличении объемов перевозок до некоторого уровня с последующим возрастанием. В этом случае возможна многоэкстремальность – наличие нескольких допустимых планов перевозок, доставляющих локальный экстремум целевой функции.

2. Отказ от жесткой фиксации заданий b на перевозку в узлах путем введения функций спроса и предложения, описывающих зависимость между объемами потребления и производства в узлах сети от цен в этих узлах.

3. Рассмотрение случая, когда удельные издержки на перевозки зависят не только от объема, но и от расстояния транспортировки.

4. Изучение ситуации с ограниченным числом клиентов транспортной сети, каждый из которых может выбирать маршруты перевозок своих грузов и воздействовать тем самым на тарифы. Это включает в т. ч. изучение возможности получения равновесий Нэша, Штакельберга.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Айзенберг Н. И. Теоретические основы регулирования естественных монополий. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2006. – 29 с.
2. Васильева Е.М., Левит Б.Ю., Лившиц В.Н. Нелинейные транспортные задачи на сетях. – М: Финансы и статистика, 1981. – 105 с.
3. Гейл Д. Теория линейных экономических моделей. – М: Изд-во иностранной литературы, 1963. – 419 с.
4. Деннис Дж. Б. Математическое программирование и электрические цепи. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1961, – 216 с.
5. Зоркальцев В. И. Модели рыночной экономики: Учеб. пособие. – Иркутск: Иркут. ун-т, 1993. – 144 с.
6. Зоркальцев В. И., Хамисов О. В. Равновесные модели в экономике и энергетике. – Новосибирск: Наука, 2006. – 221 с.

7. Меренков А.П., Сеннов Е.В., Сумароков С.В. и др. Математическое моделирование и оптимизация систем тепло-, водо-, нефте- и газоснабжения. — Новосибирск: Наука, 1992. — 407 с.
8. Рокафеллар Р. Выпуклый анализ. — М.: Мир, 1973. — 470 с.
9. Форд Л. Р., Фалкерсон Д. Р. Потоки в сетях. — М: Мир, 1986. — 276 с.
10. Шамрай Н. Б. Применение вариационно-подобных неравенств для решения задач транспортного ценового равновесия // Информатика и системы управления. — 2006. — №1(11). — С. 62—72
11. Nagurney A. Network Economics: A Variational Inequality Approach (second revised edition). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999.

Пержабинский С.М.

УДК 519.83+621.311:51.001.57

АЛГОРИТМ ВНУТРЕННИХ ТОЧЕК, ИСПОЛЬЗУЮЩИЙ КВАДРАТИЧНЫЕ АППРОКСИМАЦИИ

В работе представлен алгоритм решения задач выпуклой оптимизации, основанный на алгоритме линеаризации и применении методов внутренних точек для решения линеаризованной задачи. Для сокращения погрешности линеаризации при решении вспомогательной задачи поиска направления корректировки предлагается применять энергетическую норму. Приводятся результаты экспериментальных исследований предлагаемого метода.

Постановка задачи. Рассматривается задача поиска вектора $x \in R^n$

$$f_0(x) \to \min, \quad (1)$$

$$f_i(x) \le q_i, i = 1, \ldots, m, \quad (2)$$

$$\underline{x} \le x \le \bar{x}. \quad (3)$$

Предполагается, что все функции $f_i(x), i = 0, \ldots, m$ выпуклые.

Метод внутренних точек, базирующийся на линеаризации. Итеративный процесс метода внутренних точек проходит внутри области допустимых решений, т.е. на каждой итерации $t = 1, 2, \ldots$ выполняются неравенства

$$f_i(x^t) < q_i, i = 1, \ldots, m,$$

$$\underline{x} < x^t < \bar{x}.$$

Задача поиска направления улучшения решения $s \in R^n$ имеет вид:

$$\left\langle \nabla f_0(x^t), s \right\rangle + \frac{1}{2} s^T s + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{n} \frac{(s_j)^2}{(d_j^t)^2} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{m} \frac{(y_i)^2}{(q_i - f_i(x^t))^2} \to \min, \quad (4)$$

при условии

$$y_i = \left\langle \nabla f_i(x^t), s \right\rangle, \qquad i = 1, \ldots, m. \quad (5)$$

Здесь

$$d_j^t = \min\left\{ \bar{x}_j - x_j^t, x_j^t - \underline{x}_j \right\}, j = 1, \ldots, n, \quad (6)$$

$s^T s$ обозначает квадрат евклидовой нормы вектора s.

Решение задачи поиска направления корректировки. Учитывая выражение (5), возьмем производную функции (4) по s и приравняем ее к нулю. Тогда задача поиска направления корректировки сведется к решению системы линейных уравнений с симметрической положительно определенной матрицей:

$$c^t + s + (D_1^t)^{-1} s + D_2^t s = 0. \quad (7)$$

Здесь

$$c^t = \nabla f_0(x^t),$$

$$D_1^t = diag\left(d_j^t\right)^2, j = 1, \ldots, n,$$

$$D_2^t = \sum_{i=1}^{m} \frac{\nabla f_i(x^t)\left(\nabla f_i(x^t)\right)^T}{(q_i - f_i(x^t))^2}.$$

Решив систему (7), получим направление корректировки

$$s^t = -(E + (D_1^t)^{-1} + D_2^t)^{-1} c^t.$$

Вычисление шага.

1) Сначала вычислим величину

$$\lambda_1^t = \arg\min f_0\left(x^t + \lambda s^t\right)$$

2) Затем λ_2^t рассчитывают из условия невыхода вектора $x^t + \lambda s^t$ за пределы двусторонних ограничений неравенств (3):

$$\lambda_2^t = \gamma \max\left\{\lambda : \underline{x} \le x^t + \lambda s^t \le \bar{x}, x, s \in R^n\right\},$$

при заданном $\gamma \in \left(0, \frac{2}{3}\right)$.

3) Вычислив λ_1^t и λ_2^t, поиск λ^t можно осуществить путем деления минимального из них пополам до тех пор, пока точка $x^t + \lambda^t s^t$ не будет удовлетворять ограничениям (2).

Вычисление множителей Лагранжа. Для задачи (4), (5) построим функцию Лагранжа:

$$\left\langle \nabla f_0(x^t), s\right\rangle + \frac{1}{2} s^T E s +$$

$$+ \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{n} \frac{(s_j)^2}{(d_j^t)^2} + \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{m} \frac{(y_i)^2}{(q_i - f_i(x^t))^2} -$$

$$-\sum_{i=1}^{m} u_i (y_i - \left\langle \nabla f_i(x^t), s\right\rangle) \to \min.$$

Взяв частную производную функции Лагранжа по y_i и приравняв ее к нулю, получим численное выражение u_i.

$$u_i^t = \frac{\left\langle \nabla f_l(x^t), s^t\right\rangle}{(q_i - f_i(x^t))^2}, i = 1, \ldots, m. \qquad (8)$$

Критерий останова. Согласно необходимым и, в данном случае, достаточным условиям оптимальности Куна-Таккера [1] точка x^* является оптимальным решением задачи (1) — (3), если она удовлетворяет неравенствам (2), (3) и существуют множители $v_i \ge 0$, $i = 1, 2, \ldots, m+2n$, при которых выполняются следующие соотношения

$$\nabla f_0(x^*) + \sum_{i=1}^{m+2n} v_i \nabla f_i(x^*) = 0,$$

$$v_i (f_i(x^*) - q_i) = 0, \; i = 1, 2, \ldots, m+2n.$$

Здесь

$$f_i(x) = x_i, \; q_i = \bar{x}_i, \; i = m+1, \ldots, m+n,$$

$$f_i(x) = -x_i, \; q_i = -\underline{x}_i, \; i = m+n+1, \ldots, m+2n.$$

Поэтому критерием останова может служить выполнение неравенств

$$\left\| \nabla f_0(x^t) + \sum_{i=1}^{m+2n} v_i^t \nabla f_i(x^t) \right\| \le \varepsilon, \qquad (9)$$

$$\left| v_i^t (f_i(x^t) - q_i) \right| \le \varepsilon, \; i = 1, 2, \ldots, m+2n, \; \varepsilon > 0, \qquad (10)$$

где ε – положительная малая величина. Множители v_i^t, $i = 1, \ldots, m+2n$ вычисляются по формулам

$$v_i^t = \max\left\{0, u_i\right\}, \; i = 1, \ldots, m, \qquad (11)$$

$$v_i^t = \max\left\{0, \frac{s_{i-m}^t}{(x_{i-m}^t - \bar{x}_{i-m}^t)^2}\right\}, i = m+1, \ldots, m+n,$$

$$v_i^t = \max\left\{0, \frac{-s_{i-n-m}^t}{(\underline{x}_{i-m-n}^t - x_{i-m-n}^t)^2}\right\},$$

$$i = m+n+1, \ldots, m+2n.$$

Если критерий останова в точке x^t не выполнился, то осуществляем итеративный переход по правилу

$$x^{t+1} = x^t + \lambda^t s^t.$$

Метод внутренних точек, учитывающий квадратичные аппроксимации. Для сокращения погрешностей линеаризации [2] вместо квадрата евклидовой нормы $\|s\|^2 = s^T s$ предлагается использовать квадрат нормы энергетической $s^T Q^t s$, где матрица Q^t определяется следующим образом

$$Q^t = \nabla^2 f_0(x^t) + \sum_{i=1}^{m} v_i^{t-1} \nabla^2 f_i(x^t), \qquad (12)$$

v_i^{t-1} –множители Лагранжа, вычисленные по правилам (8), (11), $i = 1, \ldots, m$, на первой итерации $v_i^0 = 1$.

Тогда задача поиска направления корректировки $s \in R^n$ примет вид:

$$\left\langle \nabla f_0(x^t), s\right\rangle + \frac{1}{2} s^T Q^t s +$$

$$+ \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{n} \frac{(s_j)^2}{(d_j^t)^2} + \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{m} \frac{(y_i)^2}{(q_i - f_i(x^t))^2} \to \min, \qquad (13)$$

при условии

$$y_i = \left\langle \nabla f_i(x^t), s\right\rangle, i = 1, \ldots, m. \qquad (14)$$

Здесь

$$d_j^t = \min\left\{\bar{x}_j - x_j^t, x_j^t - \underline{x}_j\right\}, j = 1, \ldots, n. \qquad (15)$$

Решение задачи (13), (14) аналогично решению задачи (4), (5). Поэтому направление корректировки в методе внутренних точек, учитывающем квадратичные аппроксимации, определяется правилу

$$s^t = -(Q^t + (D_1^t)^{-1} + D_2^t)^{-1} c^t.$$

Шаг корректировки находится вышеописанным способом. В качестве критерия оста-

нова предлагаемого метода используются неравенства (10), (11). Если критерий останова в точке x^t не выполняется, то осуществляем итеративный переход

$$x^{t+1} = x^t + \lambda^t s^t.$$

Иллюстрация работы метода внутренних точек, базирующегося на линеаризации и алгоритма внутренних точек, учитывающего квадратичные аппроксимации.

Рассмотрим задачу квадратичного программирования:

$$f_0(x) = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} 4 & -5 & 4 \\ -5 & 12 & 5 \\ 4 & 5 & 23 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} + $$

$$+\begin{pmatrix} -3 & 5 & -8 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \to \min,$$

$$f_1(x) = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} 7 & 6 & 2{,}5 \\ 6 & 25 & -5{,}4 \\ 2{,}5 & -5{,}4 & 6 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} +$$

$$+\begin{pmatrix} 25 & -27 & 34 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} - 1100 \le 0,$$

$$f_2(x) = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} 8 & -6 & -3{,}5 \\ -6 & 9 & 6{,}4 \\ 3{,}5 & 6{,}4 & 7 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} +$$

$$+\begin{pmatrix} -45 & 22 & 40 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} - 800 \le 0,$$

$$-12 \le x_1 \le 20,$$
$$-20 \le x_2 \le 32,$$
$$-10 \le x_3 \le 34,$$

Вычислительный процесс необходимо начать с внутренней точки, поэтому $x^0 = (5;6;7)$. В критерии останова $\varepsilon = 0{,}001$. Результаты экспериментального исследования приведены в таблице 1 и таблице 2.

Заметим, что метод, учитывающий квадратичные аппроксимации, решил поставленную задачу за 40 итераций, исходный алгоритм — за 92.

Численный эксперимент. Экспериментальные исследования метода внутренних точек, основывающегося на линеаризации, и его модификации проводились на серии из 50 задач различной размерности. В численном эксперименте решались задачи квадратичного программирования следующего вида

$$f_0(x) = \frac{1}{2} x^{\mathrm{T}} A_0 x + b_0^{\mathrm{T}} x \to \min,$$

$$f_i(x) = \frac{1}{2} x^{\mathrm{T}} A_i x + b_i^{\mathrm{T}} x \le q_i, i = 1, \ldots, m,$$

Таблица 1

Приближения к оптимальной точке, полученные методом квадратичной аппроксимации на итерации t = **1,2,…**

Номер итерации, t	Метод с квадратичной аппроксимацией	Значение целевой функции
1	(4,733; 4,5143; 0,0565)	70,5522
2	(-6,6099; -3,8059; 2,5154)	-12,4252
3	(-8,4649; -4,9848; 2,9882)	-14,9852
20	(-9,4054; -5,6122; 3,1956)	-15,8898
39	(-9,4198; -5,6155; 3,1991)	-15,8955
40	(-9,4159; -5,617; 3,1985)	-15,8956

Таблица 2

Приближения к оптимальной точке, полученные исходным методом линеаризации на итерации t = 1,2,...

Номер итерации, t	Исходный метод линеаризации	Значение целевой функции
1	(4,9039; 5,2566; -0,0846)	93,4471
2	(5,3499; 3,6621; -1,4693)	20,2459
3	(5,7039; 2,7878; -1,3425)	11,1443
60	(-9,3496; -5,5771; 3,1811)	-15,851
91	(-9,4110; -5,6107; 3,1966)	-15,89
92	(-9,4118; -5,6112; 3,1946)	-15,8901

$$\underline{x} \le x \le \bar{x},\ x \in R^n.$$

Здесь матрицы A_i, $i=1,\ldots,m$ симметрические положительно определенные, то есть функции $f_i(x)$, $i=1,\ldots,m$ строго выпуклые.

Матрицы A_i создавались следующим способом: сначала генерировалась диагональная матрица D_i с положительными элементами на главной диагонали, затем при помощи унитарных преобразований формировалась матрица $A_i = T_i D_i T_i^{-1}$, $T_i = T_{i1} T_{i2} \ldots T_{i\,n-1} T_{in}$, $i=1,\ldots,m$,

$$T_{i1} = \begin{pmatrix} \cos\alpha_1 & \sin\alpha_1 & 0 & \ldots & 0 \\ -\sin\alpha_1 & \cos\alpha_1 & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \ldots & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & \ldots & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$T_{i2} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & \cos\alpha_1 & \sin\alpha_1 & \ldots & 0 \\ 0 & -\sin\alpha_1 & \cos\alpha_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ldots & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & \ldots & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

.....

$$T_{i3} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & \ldots & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \ldots & 0 & \cos\alpha_n & \sin\alpha_n \\ 0 & \ldots & 0 & -\sin\alpha_n & \cos\alpha_n \end{pmatrix}.$$

Числа α_l выбирались случайным образом из равномерно распределенных величин на отрезке $[-2\pi, 2\pi]$, $l=1,\ldots,n$. Векторы b_i, $i=1,\ldots,m$, $\underline{x}$, $\bar{x}$ задавались случайным образом из целых чисел отрезка $[-10,30]$. В качестве начальной точки x^0 использовалась середина отрезка $[\underline{x}, \bar{x}]$, затем находилась величина $q_i = \frac{1}{2}(x^0)^{\mathrm{T}} A_i (x^0) + b_i^{\mathrm{T}}(x^0) + h_i$, где h_i – целые числа, выработанные генератором случайных чисел, $h_i \in [5000, 10000]$, $i=1,\ldots,m$. Таким образом, обеспечивалась допустимость стартовой точки. В критерии останова (14), (15) использовалось $\varepsilon = 0{,}001$.

Эксперименты отличались размерностью задач и количеством ограничений. Их результаты (минимальное, максимальное, среднее число итераций) сведены в таблице 3, таблице 4.

Итоги эксперимента подтверждают пригодность метода внутренних точек, использующего квадратичные аппроксимации, для решения нелинейных задач вида (1) – (3). Более того, из результатов эксперимента видно, что последовательность приближений, вырабатываемая методом квадратичных аппроксимаций, сходится к оптимальной точке за количество итераций в два раза меньшее, чем последовательность исходного метода. Сравнение методов по количеству итераций, за которые была решена задача, справедливо, поскольку трудоемкость каждой итерации исследуемых методов примерно одинакова (на каждой итерации необходимо решать систему с симметрической положительно определенной матрицей).

Для метода внутренних точек, учитывающего квадратичные аппроксимации, имеется практически значимое приложение: модель

Таблица 3

Число итераций, необходимое для решения тестовых задач методом внутренних точек, базирующимся на линеаризации

Число переменных, n	Число ограничений	Число итераций		
		Максимальное	Минимальное	Среднее
3	2	147	7	55,04
10	5	250	36	106,2
20	10	361	67	147,96
40	20	397	80	173,02

Таблица 4

Число итераций, необходимое для решения тестовых задач методом внутренних точек, использующим квадратичные аппроксимации

Число переменных, n	Число ограничений	**Число итераций**		
		Максимальное	Минимальное	Среднее
3	2	61	7	24,36
10	5	118	21	51,24
20	10	128	29	60,54
40	20	155	34	82,32

оценки дефицита мощности электроэнергетических систем (ЭЭС) с квадратичными потерями мощности в ЛЭП. Методика анализа надежности ЭЭС предполагает нахождение минимального суммарного дефицита мощности для большого количества сформированных с помощью датчика случайных чисел состояний режимов функционирования ЭЭС (случайные колебания нагрузки, отказ оборудования и т.д.). Сокращение времени вычислений позволит «проиграть» большее количество случайных ситуаций и, тем самым, повысить надежность электроэнергетической системы.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. М. Мину Математическое программирование. Теория и алгоритмы. Москва: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990, 363 с.
2. Б.Н. Пшеничный Метод линеаризации. Москва: Наука, 1983, 135 с.

Белоусов Р.А., Бузиков И.А., Климов Н.Н.,
Фискин Е.М., Фискина М.М.

УДК 621.391.1.037.37

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА АВТОМАТИЗАЦИИ УЧЕТА ТЕПЛА В ЖКХ

Автоматизация коммерческого учета тепла — одна из наиболее насущных проблем энергосберегающих предприятий России. Это связано с резким увеличением числа приборов учета тепла. Идея внедрения подомового учета в ЖКХ потребовала установки и обслуживания очень большого числа приборов учета в рамках биллингового и технического контроля. При количестве приборов учета несколько сотен и даже тысяч — это непростая задача. Очевидное решение проблемы — применение различных систем автоматизации. Стандартный подход на основе SCADA-систем с контролем параметров в реальном времени здесь не подходит, так как очень сложно одновременно отобразить состояние нескольких тысяч узлов в системе, а диспетчеру сложно их проконтролировать, выявить ошибки и определить приоритетность их устранения. Однако, собрав и обработав статистическую информацию, мы получим гораздо более полную картину состояния узла учета за произвольный промежуток времени. Таким образом, автоматизация учета тепла в ЖКХ сводится не к диспетчеризации, а к автоматизации сбора и обработки статистических данных. Работа оператора в этом случае заключается в анализе подготовленных компьютером отчетов, которые отражают нештатные ситуации, позволяют оценить величину перерасхода, отклонения параметров теплоносителя от заданных. Как показывает практика, это позволяет более оперативно принимать решения.

Несмотря на наличие достаточно большого количества разработок в данной области, существующие в настоящее время системы учета тепловой энергии в случае развертывания их в масштабе города, во-первых, снижают производительность, во-вторых, возрастает номинальная стоимость организации точки сбора информации, что приводит к нерентабельности развертывания таких систем. Кроме того, системы масштаба города с числом приборов в несколько тысяч имеют повышенные требования к надежности и производительности, которые должны учитываться при разработке этих систем.

Данная статья посвящена разработке масштабной информационно-измерительной системы учета тепловой энергии, позиционируемой как система массового обслуживания (СМО), возможности которой будут достаточны для создания ИИС учета тепла общегородского масштаба.

Сформируем требования к системе учета следующим образом.

1. Обеспечение связи с узлами по технологиям пакетной передачи через сети сотовой связи GPRS/CDMA/HSDPA, дающее доступ к сети в любой точке города при низкой стоимости связи, а также поддержка IP-связи в общем случае (т.е. через xDSL, Ethernet, Wi-Fi и т.д.) - это позволит использовать уже проложенные коммуникации домовых сетей на тех районах, где эти сети достаточно развиты и не дороги.

2. Множественный доступ к приборам со стороны сервера. Возможность распараллеленной обработки данных от теплосчетчиков, чтобы дать возможность получить почасовую детализацию данных даже при большом числе приборов в сети и оптимизировать работу многопроцессорных серверных систем.

3. Платформа хранения и обработки данных класса SQL Server для обеспечения возможности хранить и обрабатывать большие объемы данных, предоставляя оператору только нужные ему сведения. Это также снижает требования к каналам связи клиент-сервер.

4. Открытая платформа доступа через HTML для обеспечения возможности изменять оформление отчетных документов в соответствии с требованиями теплоснабжающих организаций, а также добавлять новые

специфичные для нужд каждой организации отчеты и интерфейсы.

5. Наличие в системе собственного WEB-сервера для предоставления доступа всем заинтересованным организациям через Интернет, возможно дополнительно использование SOAP-сервера.

6. Возможности резервирования данных и масштабирования системы.

7. Возможность выгрузки данных в формат XML для обеспечения обмена данными с другими информационными системами.

8. Автоматизация документооборота с теплоснабжающими организациями путем применения штрих-кодов на документах.

Архитектура ИИС учета тепла показана на рис.1. В соответствии с требованиями к системе, ИИС строится на технологии клиент-сервер и состоит из следующих компонентов:

- сервер базы данных — предназначен для хранения и обработки данных, поступающих через каналы связи с приборов учета тепла;

- сервис управления процессом — предназначен для реализации алгоритмов установки и управления связью и передачей данных;

- Web-Сервер отчетов — создает визуальное представление данных учета в виде таблиц, регламентированных отчетов и диаграмм, позволяет также выгружать необходимые данные в формате XML прямо через Web-интерфейс;

- клиентские приложения — подключаются к серверу БД через локальную сеть и предназначены для конфигурирования и управления системой;

- подсистема прогнозирования — еще один сервис, предназначенный для реализации алгоритмов прогнозирования потребления тепловой энергии в масштабах отдельного объекта, района, города или конкретного теплоисточника, является частью аналитической подсистемы.

Как наиболее важный компонент системы можно выделить «сервис управления процессом», т.к. этот компонент осуществляет управление связью, синхронизацию всех терминалов, передачу данных и сверку исполняемых задач, и таким образом, определяет производительность системы, максимальное количество обслуживаемых объектов, требования к магистральным каналам связи. Функции данного сервиса разбиваются на несколько вертикальных абстрактных уровней, каждый из которых будет выполнять действия в некоторой предметной области, а также производится горизонтальное разбиение процесса на несколько одинаковых элементов для реализации распараллеливания выполнения функций передачи данных. На рис. 2 приводится архитектура сервиса управления.

Компонент «Менеджер управления опросом» производит управление созданием и уничтожением объектов с названием «Поток», выполняющихся в отдельных временных промежутках процессора и с отдельным контекстом, что позволяет оптимизировать выполнение под многопроцессорные серверные системы и за счет распараллеливания медленных операций. Функционально «Поток» содержит «Ядро» и в момент запуска подключает «Драйвер» и «Диспетчер связи». «Драйвер» выбирается на основе данных о типе тепловычислителя, установленного на объекте учета и выполняет преобразование уникального протокола тепловычислителя, определяемого производи-

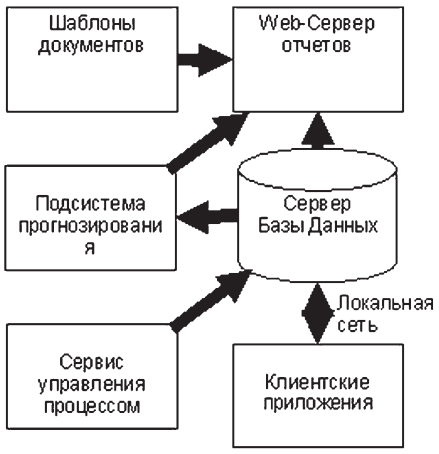


Рис. 1. Архитектура ИСС

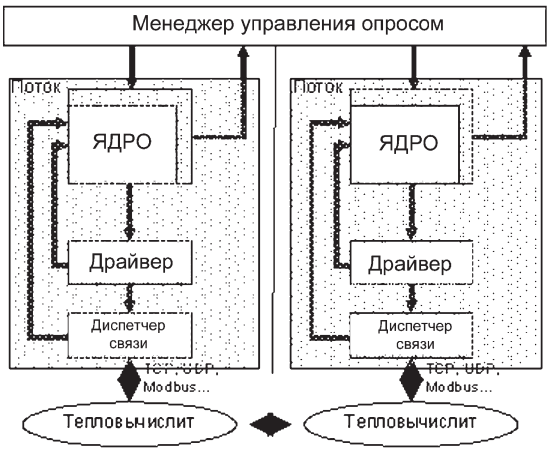


Рис. 2. Архитектура сервиса управления

телем оборудования в «Универсальный Абстрактный Протокол». Этот протокол реализует типовые функции обмена данными с абстрактным тепловычислителем. «Диспетчер связи» реализует унифицированный интерфейс обмена данными, не зависящий от физических способов установки соединения (TCP, UDP, RS232/485, IPv6 и т.п.). Такая технология абстрагирования позволяет подключить к системе практически любой тепловычислитель, через любой канал связи. Использование «Диспетчера связи» позволяет строить собственные протоколы связи с телеметрическим оборудованием, что позволяет реализовывать алгоритмы обхода таких сетевых элементов как NAT и Firewall, достаточно часто используемых сотовыми- и интернет-операторами.

Архитектура информационно-измерительной системы масштаба города методически может исследоваться с помощью моделей теории телетрафика и теории массового обслуживания, в этом случае систему можно представить как СМО вида: $D|M|V|\infty|d_0^+$. Это система с дискретным входящим потоком заявок, экспотенциальным распределением времени обработки заявок, неограниченной очередью заявок с приоритетами на входе системы.

Ввиду достаточной сложности аналитического подхода к определению характеристик сложных систем массового обслуживания представляет интерес использование имитационных моделей. Программы имитационных моделей на специализированных языках моделирования близки к описанию модели на естественном языке, что позволяет создавать сложные модели и изучать их характеристики без привлечения сложного математического аппарата.

Одним из наиболее эффективных и распространенных языков моделирования сложных дискретных систем является в настоящее время язык GPSS. Он может быть с наибольшим успехом использован для моделирования систем, формализуемых в виде систем массового обслуживания. В качестве объектов языка используются аналоги таких стандартных компонентов СМО, как заявки, обслуживающие приборы, очереди и т.п. Достаточный набор подобных компонентов позволяет конструировать сложные имитационные модели, сохраняя привычную терминологию СМО. Функциональная модель СМО приведена на рис.3.

Как видно из рис. 3, модель является нелинейной и содержит ветви обратной связи. Основным элементом системы является ядро. Оно должно быть представлено на GPSS многоканальным устройством (МКУ). Это объясняется тем, что логика управления опросом теплосчетчика одинакова для любого экземпляра исходного кода системы. Ядро принимает заявки до тех пор, пока есть каналы, которые могут их обслуживать. Если свободных каналов нет, заявка встает в очередь на обслуживание, при этом используется тип очереди с приоритетами. Порядок задающий приоритет, определяется по количеству ошибок опроса,

Рис. 3. Функциональная схема ИИС

которые претерпела данная заявка. Блок «Успешная обработка...», и блоки с ошибками моделируют поведение самого алгоритма опроса тепловычислителей в зависимости от получаемого результата. При этом предусматривается допуск 5% (либо 0,5%) от общего числа заявок на случай выхода из строя самого теплосчетчика или нарушения связи на линии ТС-МОДЕМ. Система в этом случае в течение 20мин. будет пытаться отправлять запросы к теплосчетчику, т.к. связь с модемом будет присутствовать. Этот интервал существенно длиннее нормального опроса (50±20сек.), поэтому данный случай значительно влияет на общую загруженность системы. В случае же ошибки связи с модемом сеанс опроса длится всего лишь 10сек., после чего заявка возвращается в очередь. Такая ситуация должна учитываться отдельно. На этапе обработки также расставляются приоритеты заявок — каждый ошибочный опрос добавляет единицу к полю приоритета заявки (параметр №1). Наивысшим считается приоритет равный нулю, т.е. более новые заявки имеют преимущество при обработке. Сама обработка задается как определенная задержка заявки во времени, задаваемая средним значением и функцией распределения.

На последнем этапе обработки делается транзакция в базу данных. Эта операция может проводиться единовременно только для одной заявки, т.к. все выходящие из ядра заявки встают в одну общую очередь без приоритетов.

Принятое в модели время равно 1мс. Моделирование ведется за 10 суток работы и позволяет учесть долгосрочные изменения в модели, например, накопление ошибок опроса при неработоспособном модеме или теплосчетчике.

По результатам моделирования можно сделать ряд выводов.

1. Число каналов в МКУ (ядре) определяет производительность системы в целом и ограничивается полосой пропускания магистрального канала связи от сотового оператора до сервера системы и составляет 1000 на 1Мбит полосы. Второе ограничение связано с загрузкой базы данных входящими транзакциями. Оно приводит к ограничению числа каналов на уровне 1500 на одно соединение с БД.

2. Система является устойчивой к помехам связи и ошибки сеансов связи на уровне 20% не приводят к заметному снижению производительности.

3. Наиболее критичным местом в алгоритме является время занятия канала при отсутствии связи с теплосчетчиком, но наличии связи с терминалом. В этом случае программой производятся повторы запросов, приводящие к длительному до 20 мин. занятию канала. Также очевидно, что следует ограничивать время пребывания таких заявок в очереди.

4. Общая производительность сети при опросе позволяет поддерживать работу с 20000 теплосчетчиков на одном сервере с магистральным каналом на GPRS сеть сотового оператора в 1Мбит/с и периодом опроса равным 4 часам.

5. Разработанная ИИС «КУМИр-ТеплоКом» отвечает всем предъявляемым требованиям, зарегистрирована в Роспатенте и сертифицирована по системе СДС СИИИС (Программное обеспечение средств измерений и информационно-измерительных систем).

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Белоусов Р.А., Фискин Е.М. Информационно-измерительная система «КУМИР-ТеплоКом» - новое решение для масштабных систем автоматизации учета тепла в ЖКХ. Материалы всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири». Иркутск, ИрГТУ, 2006. С. 17-18.
2. Р.А.Белоусов. Использование теории телетрафика для построения математической модели ИИС «КУМИр-ТеплоКом». Вестник ИрГТУ, 2008. С. 42-46.
3. В.В. Крылов, С.С. Самохвалова. Теория телетрафика и ее приложения. — СПб.: BHV-Санкт-Петербург, 2005. - 272 с.

Абаев А.В., Бутырин О.В.

УДК 519.816:519.254

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ОПЕРАТИВНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ГПС

Государственная противопожарная служба (ГПС) представляет собой многоуровневую систему организационного управления. Целенаправленное функционирование всех звеньев этой системы обеспечивается посредством управленческих воздействий органов вышестоящих уровней, реализуемых в форме организационно-управленческих решений. При исследовании сложных социально-экономических систем, в число которых входит и ГПС, для оценки эффективности работы составляющих ее элементов, часто проводят искусственный эксперимент. Объектом исследования в настоящей работе выбрана оперативная деятельность подразделений противопожарной службы. Ее результаты, к которым относятся временные характеристики занятости подразделений службы пожаротушением, безусловно, будут являться объективными факторами оценки оперативной деятельности.

Рассмотрим предложенные оценочные факторы. $\tau_{\text{следования}}$ - время следования подразделений ГПС от места их дислокации (пожарной части) до места пожара, $\tau_{\text{локализации}}$ - время локализации пожара, (общее время сосредоточения и введения сил и средств, а также проведения действий до момента прекращения распространения горения и обеспечения возможности ликвидации пожара); $\tau_{\text{ликвидации}}$ - время ликвидации пожара, (общее время боевых действий подразделений по прекращению горения и всех боевых действий, обеспечивающих его выполнение). Введем также фактор $\tau_{\text{обсл}}$, который является суммой перечисленных выше характеристик. Так как рассматриваемые величины носят вероятностный характер, то необходимо применение вероятностных методов для их обработки. Информация по данным показателям в обязательном порядке указывается в соответствующих реквизитах карточки учета пожара.

Порядок обработки оценочных показателей будет осуществляться на основе следующей алгоритмической схемы.

В результате агрегирования оценочных параметров определяется комплексный показатель $K(j)$, представляющий собой линейную свертку вида:

$$K(j) = \sum_{i=1}^{k} \alpha_i x_{ji} \quad , j = \overline{1,n}, \qquad (1)$$

где x_{ji} - статистические данные результатов оперативной деятельности; α_i - параметры, которые могут быть найдены на основе решения последовательности вероятностных задач, сводящихся к анализу платежной матрицы методами игрового моделирования; n — количество рассматриваемых подразделений; k — количество временных интервалов, соответствующей временной характеристики.

Рассмотрим информационную матрицу X результатов оперативной деятельности подразделений ГПС:

$$X = \| x_{ji} \|, i = \overline{1,k}, j = \overline{1,n}. \qquad (2)$$

Теоретическим законом распределения временных характеристик занятости подразделений ГПС пожаротушением является экспоненциальный [1]. Для описания эмпирического ряда при помощи математической модели закона распределения необходимо вычислить теоретическую вероятность P попадания величины $\tau_{обсл}$ в интервал времени $[\tau_i ; \tau_{i+1}]$:

$$P\{\tau_i \le \tau_{обсл} < \tau_{i+1}\} = e^{-\mu\tau_i} - e^{-\mu\tau_{i+1}}, \qquad (3)$$

где $\mu = 1/\tau_{обсл}$ - параметр экспоненциального закона распределения.

После подстановки (3) в (1) имеем:

$$K(j) = \sum_{i=1}^{k} P\{\tau_i \le \tau_{обсл} \le \tau_{i+1}\} x_{ji}, j = \overline{1,n}. \qquad (4)$$

Элементы матрицы x_{ji} являются статистическими данными соответствующей временной характеристики на i-том интервале для j-того подразделения ГПС, представленные в

виде частоты. Пусть x_{ji} являются элементами платежной матрицы. Тогда матрица оценки вариантов решений для данной задачи (5) может рассматриваться как некоторая игровая модель:

$$\begin{array}{c} \\ \\ A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_n \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cc} p_1 & p_2 \dots p_{k+1}, \\ B_1 & B_2 \dots B_{k+1}, \end{array} \\ \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} \dots x_{1k+1} \\ x_{21} & x_{22} \dots x_{2k+1} \\ \dots & \dots \dots \dots \\ x_{n1} & x_{n2} \dots x_{nk+1} \end{pmatrix}. \end{array} \quad (5)$$

Здесь, $A_1, A_2, \dots, A_n$ — стратегии стороны A, являющихся подразделениями ГПС; $B_1, B_2, \dots, B_{k+1}$ — стратегии стороны B — попадание $\tau_{обсл}$ в соответствующий временной интервал, рассматриваемой временной характеристики, для которых определены вероятности $p_1, p_2, \dots, p_{k+1}$. Далее производится расчет частных функций оценки оперативной деятельности F_j^l исследуемых объектов по правилу:

$$F_j^l = \sum_{i=1}^{k} P_i^l x_{ji}^l, \quad l = \overline{1,m},\ j = \overline{1,n}. \quad (6)$$

Здесь m — количество временных характеристик составляющих $\tau_{обсл}$.

В заключении определяется значение комплексного показателя:

$$K(j) = \sum_{l=1}^{m} \tilde{\alpha}_l F_j^l \to \min, \quad (7)$$

где $\tilde{\alpha}_l$ - нормирующие коэффициенты, определяемые как в результате экспертизы, так и посредством прямого вычисления, причем $\sum_{l=1}^{m} \tilde{\alpha}_l = 1$.

Для подтверждения эффективности разработанной методики оценки оперативной деятельности подразделений ГПС рассмотрим следующий пример. Пусть имеются данные о результатах оперативной деятельности четырех подразделений ГПС по рассматриваемым временным характеристикам, приведенные в таблицах 1 - 3.

Определяем вероятности занятости подразделений ГПС в соответствии с каждой из рассматриваемых временных характеристик:

1. среднее время следования

$\bar{\tau}_{следования} = 26{,}0681$ мин./вызов; $\mu = 0{,}03836$ вызов/мин;

2. среднее время локализации пожара

Таблица 1

Время следования подразделений ГПС

Интервалы времени следования, мин	Подразделения			
	ПЧ-1	ПЧ-2	ПЧ-3	ПЧ-4
0 — 3	5	37	15	8
3 — 5	4	53	26	12
5 — 10	1	60	30	26
10 — 15	1	28	4	15
15 — 20	3	24	5	22
20 — 30	2	18	2	40
30 — 40	1	6	2	28
40 — 50	1	0	12	2
50 — 60	2	1	1	1
Более 60	2	1	1	1

Таблица 2

Время локализации пожаров подразделений ГПС

Интервалы времени локализации, мин	Подразделения			
	ПЧ-1	ПЧ-2	ПЧ-3	ПЧ-4
0 - 3	2	25	17	32
3 - 5	5	33	55	75
5 - 10	35	13	83	108
10 - 15	9	1	28	25
15 - 20	9	3	24	18
20 - 30	9	2	18	17
30 - 40	3	1	6	2
40 - 50	1		5	1
50 - 60	2	1	3	1
Более 60	2	1	1	6

$\bar{\tau}_{локализации} = 27{,}7183$ мин./вызов; $\mu = 0{,}03608$ вызов/мин;

3. среднее время ликвидации пожара

$\bar{\tau}_{локализации} = 32{,}9845$ мин./вызов; $\mu = 0{,}03032$ вызов/мин.

Результаты расчета теоретической вероятности сведем в таблицу 4.

Адекватность построенной модели определяется на основе значения критерия Романовского в соответствии с [2]. Далее строится матрица оценки вариантов решений для каждой временной характеристики в соответствии с (3).

Рассчитаем частные оценки для каждой временной характеристики по рассматривае-

Таблица 3

Время ликвидации пожаров подразделений ГПС

Интервалы времени ликвидации, мин	Подразделения			
	ПЧ-1	ПЧ-2	ПЧ-3	ПЧ-4
0 - 3	5	37	45	26
3 - 5	4	53	56	48
5 - 10	1	60	114	77
10 - 15	54	49	29	28
15 - 20	26	14	12	7
20 - 30	15	12	11	4
30 - 40	4	5	8	3
40 - 50	4	3	1	1
50 - 60	2	1		
Более 60	4	1	1	2

Таблица 4

Время ликвидации пожаров подразделений ГПС

Интервалы временных характеристик, мин	Теоретическая вероятность временных характеристик		
	$P_{следования}$	$P_{локализации}$	$P_{ликвидации}$
0 - 3	0,108708	0,102581	0,086938
3 - 5	0,065824	0,062472	0,053718
5 - 10	0,144071	0,13781	0,120872
10 - 15	0,118926	0,115064	0,103871
15 - 20	0,098169	0,096073	0,089261
20 - 30	0,147928	0,147191	0,142622
30 - 40	0,100798	0,102613	0,105322
40 - 50	0,068683	0,071535	0,077778
50 - 60	0,046801	0,04987	0,057436
Более 60	0,1000923	0,1147915	0,1621822

мым подразделениям по правилу (6). Результаты расчетов представлены в таблице 5.

Далее по правилу (7) определяем комплексную оценку оперативной деятельности и находим коэффициенты весомости каждой временной характеристики: $\alpha_1 = 0{,}3$, $\alpha_2 = 0{,}5$, $\alpha_3 = 0{,}2$.

Результаты расчета значения комплексного показателя оценки оперативной деятельности для каждого подразделения:

Матрица вариантов решений для времени следования:

	$P_1 =$ 0,10871	$P_2 =$ 0,06582	$P_3 =$ 0,14407	$P_4 =$ 0,11893	$P_5 =$ 0,09817	$P_6 =$ 0,14793	$P_7 =$ 0,1008	$P_8 =$ 0,06869	$P_9 =$ 0,0468	$P_{10} =$ 0,10009
	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	B_8	B_9	B_{10}
A_1	0,22727	0,18182	0,04546	0,04546	0,13636	0,09091	0,04546	0,04546	0,09091	0,09091
A_2	0,16228	0,23246	0,26316	0,12281	0,10526	0,07895	0,02632	0	0,00439	0,00439
A_3	0,15306	0,26531	0,30612	0,04082	0,05102	0,02041	0,02041	0,12245	0,0102	0,0102
A_4	0,05161	0,07742	0,16774	0,09677	0,14194	0,25807	0,18065	0,0129	0,00645	0,00645

(8)

Матрица вариантов решений для времени локализации пожара:

	$P_1 =$ 0,10258	$P_2 =$ 0,06247	$P_3 =$ 0,13781	$P_4 =$ 0,11506	$P_5 =$ 0,09607	$P_6 =$ 0,14719	$P_7 =$ 0,10261	$P_8 =$ 0,07154	$P_9 =$ 0,04987	$P_{10} =$ 0,11479
	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	B_8	B_9	B_{10}
A_1	0,02597	0,06494	0,45455	0,11688	0,11688	0,11688	0,03896	0,01299	0,02597	0,02597
A_2	0,3125	0,4125	0,1625	0,0125	0,0375	0,025	0,0125	0	0,0125	0,0125
A_3	0,07083	0,22917	0,34583	0,11667	0,1	0,075	0,025	0,02083	0,0125	0,00417
A_4	0,11228	0,26316	0,37895	0,08772	0,06316	0,05965	0,00702	0,00351	0,00351	0,02105

(9)

Матрица вариантов решений для времени ликвидации пожара:

	$P_1 =$ 0,08694	$P_2 =$ 0,05372	$P_3 =$ 0,12087	$P_4 =$ 0,10387	$P_5 =$ 0,08926	$P_6 =$ 0,14262	$P_7 =$ 0,10532	$P_8 =$ 0,07778	$P_9 =$ 0,05744	$P_{10} =$ 0,16218
	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	B_8	B_9	B_{10}
A_1	0,03390	0,00848	0,45763	0,22034	0,12712	0,03390	0,03390	0,01695	0,03390	0,03390
A_2	0,21116	0,23904	0,19522	0,05578	0,04781	0,01992	0,01195	0,00398	0,00398	0,21116
A_3	0,19444	0,39583	0,10069	0,04167	0,03819	0,02778	0,00347	0,00000	0,00347	0,19444
A_4	0,22018	0,35321	0,12844	0,03211	0,01835	0,01376	0,00459	0,00000	0,00917	0,22018

(10)

K(1) = 0,111204; K(2) = 0,10012; K(3) = 0,103979; K(4) = 0,109362. Наименьшее значение оценочной функции получено для второго подразделения, которое в соответствии с (7) и является наилучшим.

Таким образом, используя предложенную методику, можно, исходя из целей анализа качества функционирования подразделений пожарной охраны, в необходимой мере объективно и с минимальными затратами производить оценку оперативной деятельности подразделений ГПС, повысить качество принимаемых управленческих решений.

Таблица 5

Результаты оценки оперативной деятельности для каждой временной характеристики.

Подразделение	Частный показатель оценки временной характеристики		
	F^1	F^2	F^3
A_1	0,096521	0,120448	0,110118
A_2	0,11077	0,092282	0,10374
A_3	0,103054	0,10847	0,094139
A_4	0,118534	0,108684	0,097297

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Системный анализ и проблемы пожарной безопасности народного хозяйства /Под ред. Н.Н. Брушлинского. - М.: Стройиздат, 1988.- 413 с.

Подкаменный Д.В.

УДК 519.688

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ СЕРВЕР ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

С развитием сетевых и Интернет-технологий тенденции развития программного обеспечения (ПО) связаны с переходом к удаленному использованию вычислительных, информационных и других ресурсов (обычно в виде таких ресурсов выступают какие-либо уникальные программные, аппаратные или программно-аппаратные комплексы, базы данных и другое). Процесс организации научных исследований в настоящее время эволюционирует в сторону виртуальных территориально распределенных проектных групп, что, в свою очередь, обусловливает необходимость обеспечения одинаковой доступности всех информационных и вычислительных ресурсов, касающихся проекта, для всех его участников [1, 2].

Этот процесс наблюдается во всех областях знаний современного общества. Наиболее характерными примерами могут служить пакет Microsoft Office Project 2007, позволяющий проектной группе работать над общими проектами в рамках Web-приложения; пакет Google Office, переносящий офисные приложения, такие, как текстовый процессор, электронные таблицы, календарь в Интернет-среду, и дающий удобный инструмент для широкого круга пользователей.

Современное состояние в области пакетов программ (программных комплексов) по вычислительной математике характеризуется тем, что усложнение программных средств приводит к усложнению интерфейса и расширению состава базовых средств, как правило, уникальных и не всегда доступных для отечественного пользователя. Такие программные комплексы обычно дорогостоящи, что также повышает их труднодоступность.

Доступные пакеты программ (например, Maple, Mathlab) обладают более простым интерфейсом, но ориентированы на решение задач невысокой сложности. При усложнении постановок задач или серьезном увеличении размерности такие пакеты, как правило, оказываются несостоятельными при решении фундаментальных научных проблем. Кроме того, эти пакеты не имеют возможностей орга-

низации Internet-диалога и экспертной поддержки, консультирования пользователей в диалоговом режиме, что является принципиально необходимым при постановке и решении прикладных задач оптимизации.

Построению численных процедур поиска оптимальных решений в задачах оптимизации динамических систем за последние 40 лет посвящено огромное количество публикаций, среди которых важное место занимают работы Р.Беллмана, А.Брайсона, О.В.Васильева, В.В.Величенко, Р.Габасова и Ф.М.Кирилловой, Ю.Г.Евтушенко, В.И.Гурмана, В.А. Батурина, В.Ф.Демьянова и А.М.Рубинова, Ю.М.Ермольева, Н.Н.Красовского, В.Ф. Кротова, Н.Н.Моисеева, В.А.Срочко, А.И.Тятюшкина, Р.П.Федоренко, Ф.Л.Черноусько, Т.М.Энеева.

Большинство разработанных методов для задач оптимального управления были реализованы в виде программ, реализующих алгоритмы, но не предоставляющих удобного сервиса, и, как следствие, непригодных для широкого использования. Применение алгоритмов оптимизации на практике привело к появлению нескольких проектов программных комплексов для задач оптимального управления: система «ДИСО», разрабатываемая в ВЦ АН СССР под руководством Ю.Г.Евтушенко [3], комплекс программ «CONTROL» (Р.П.Федоренко, ИПМ АН СССР) [4], ППП «МАПР» и ППП «КОНУС» (А.И.Тятюшкин, Иркутский ВЦ СО АН СССР) [5], комплекс программ по решению задач оптимального управления (В.И. Гурман, В.А. Батурин, Д.Е. Урбанович, Иркутский ВЦ СО АН СССР).

Пакеты программ оптимизации содержали, кроме алгоритмов, диалоговый интерфейс и развитые сервисные средства для контроля за ходом расчетов. С появлением персональных компьютеров открылись новые возможности создания программных средств с графическим интерфейсом и богатыми возможностями визуализации найденных решений. С другой стороны, опыт применения пакетов оптимизации показал, что огромные программные системы с несовершенной документацией, рассчитанные «на все случаи жизни», все же не смогли завоевать широкого пользователя. Большинство специалистов-прикладников, слабо знакомых с программированием, не могли в отсутствии авторов таких пакетов преодолеть трудности постановки задачи, доступа к данным и управления вычислительным процессом.

Наступило время компактных программных комплексов с простым пользовательским интерфейсом, но содержащих необходимый набор инструментария для решения задачи оптимального управления. В 1990 г. по заказу ИПС АН СССР под руководством А.Ю. Горнова, ИрВЦ СО РАН, был разработан комплекс программ «OPTCON» для IBM PC [6], который удовлетворял означенным требованиям, был использован для решения большого количества прикладных задач оптимального управления и применяется в настоящее время.

В России в последние годы, к сожалению, в связи с отсутствием финансирования, были приостановлены все проекты разработки современных программных комплексов для задач оптимального управления, что привело в большинстве случаев к уменьшению или исчезновению коллективов, реализующих эти проекты.

За рубежом интерес к применению методов оптимального управления, наоборот, растет. В электронных базах адресов организаций, развивающих тематики, связанные с оптимизацией динамических систем, зарегистрировано несколько сотен организаций - университетов и лабораторий (из России — только одна). Большой проект реализуется фирмой «Боинг»: разработан и предлагается широкому пользователю программный комплекс для задач оптимального управления - SOCS («Sparse Optimal Control Software», руководитель — J.Betts). Комплекс реализован в традиционном стиле — как пакет программ огромного объема со сложным интерфейсом. В рамках системы MATLAB реализуется проект RIOTS_95. В Германии под руководством К.Шиттковского реализуется большой пакет программ для задач оптимального управления, основанный на методах последовательного квадратичного программирования. Концептуально наиболее близким к проекту, выполненному под руководством А.Ю. Горнова, является пакет NEOS [7].

Решение прикладных задач оптимального управления, несмотря на значительные достижения последних лет, к сожалению, продолжает оставаться довольно сложным процессом. Многообразие и трудноформализуемость нелинейных задач не позволяют пока создать алгоритмы, получающие удовлетворительные решения во всех случаях.

Подавляющее большинство реальных задач требует для решения поиска оригинального вычислительного сценария. Участие экспертов (как правило, это авторы программных средств) при решении конкретных задач представляется вполне обоснованным в ситуациях, когда пользователь не может самостоятельно воспользоваться имеющимися алгоритмами. Появление сети Интернет открывает новые

технологические возможности для расширения сферы применения оптимизационных программ и привлечения новых пользователей.

В последние годы развитие информационных технологий является наглядным примером того, что линии развития прикладных программных систем (ППС) и Internet, а точнее, Web-технологий, стремятся к слиянию в рамках единой открытой системы, интегрирующей обе составные части. Потребность в применении возможностей открытых систем возникла в информационных технологиях не вчера. Она обусловлена, в частности, возрастающим использованием разнообразных аппаратных платформ, исполняющих приложения, предназначенные для решения все более широкого диапазона задач.

Внедрение гетерогенных систем и желание разделять между такими системами данные привели к необходимости их совместной работы. Кроме того, совместимые двоично компьютеры сулили переносимость программ с платформы на платформу.

Импульс к применению возможностей открытых систем исходит не только от пользователей. Он исходит как от разработчиков, озабоченных необходимостью сокращать расходы и время переноса своих приложений на различные платформы, так и от производителей, старающихся разрабатывать новые платформы, на которых может выполняться широкий диапазон приложений.

Комитет IEEE POSIX 1003.0 остановился на определении, которое дает широкую и исчерпывающую трактовку понятия открытых систем. В соответствии с этим определением открытая система есть «система, реализующая открытые спецификации на интерфейсы, сервисы и поддерживаемые форматы данных, достаточные для того, чтобы обеспечить должным образом разработанным приложениям возможность переноса с минимальными изменениями на широкий диапазон систем, совместной работы с другими приложениями на локальной и удаленных системах и взаимодействия с пользователями в стиле, облегчающем им переход от одной системы к другой».

Ключевой момент в этом определении — использование термина «открытая спецификация», что, в свою очередь, определяется как «общедоступная спецификация, которая поддерживается открытым, гласным согласительным процессом, направленным на постоянную адаптацию новой технологии, и соответствует стандартам».

В соответствии с этим определением открытая спецификация не зависит от технологии, т.е. не зависит от специфического аппаратного и программного обеспечения или от продуктов конкретного производителя. Она одинаково доступна любой заинтересованной стороне. Более того, открытая спецификация находится под контролем компьютерной общественности и поэтому все, кого она затрагивает, могут участвовать в ее разработке.

В последнее время данная тенденция получила мощный импульс благодаря развитию Internet. Технологии CORBA, Java, XML — это открытые стандарты, и движение в этом направлении продолжается. Развитием данной тенденции стало движение Open Source Software (программное обеспечение с открытым кодом), это означает, что исходный код программы открыт, и любой желающий может вносить туда свои изменения.

Важным этапом развития архитектуры прикладных программных систем стала идея распределенной компонентной архитектуры клиент-сервер. Сущность этой идеи состоит в том, чтобы создавать конкретные приложения, собирая их из готовых компонентов. Имея стандарты на интерфейсы взаимодействия программных компонентов, можно свободно подключать требуемые компоненты или заменять их другими. Очень часто различные компоненты программной системы требуют реализации на разных языках и, возможно, на разных аппаратных платформах, поэтому, чтобы обеспечить взаимодействие объектов и их интеграцию в единую систему, архитектура промежуточного уровня должна отвечать следующим базовым требованиям: независимость от места нахождения объектов; независимость от платформы; независимость от языка реализации объекта.

Таким образом, появилась необходимость в стандартизации этих компонентов и механизмов их взаимодействия. Основой для этого послужили существующие стандарты сетевых протоколов [8].

Программный комплекс (ПК) Web-Optcon представляет собой Web-приложение в трехзвенной архитектуре «клиент-сервер» и реализует шаблон Thin Web Client (тонкий Web-клиент).

Первый уровень — это уровень интерфейса пользователя, он отвечает за представление информации пользователю и отображает действия пользователя в вызовы функций. Фактически соответствует компоненту "Вид" в архитектуре "Модель/Вид/Контроллер".

Второй уровень — это уровень логики предметной области, реализующий основную функциональность приложения, фактически соответствует компонентам "Контроллер" и

"Модель" в архитектуре "Модель/Вид/Контроллер". Данный уровень выполняет функции сервера для интерфейса пользователя и клиента для уровня ресурсов.

Третий уровень — это уровень ресурсов. Обычно на этом уровне функционирует SQL сервер, либо расположено какое-либо хранилище данных. В данном случае данные моделей хранятся в файлах формата ПК Опткон, а служебная информация представлена в виде XML-хранилища.

В силу того, что решение задачи оптимального управления отнимает много процессорного времени, была заложена возможность распределения вычислительного сервера и организация массива вычислителей для одного web-приложения.

За отделение расчетной части от бизнес-логики отвечает со стороны расчетной части RMI-сервер вычислительного сервера, который предоставляет RMI-интерфейс к ППП Optcon, а со стороны бизнес-логики — прокси-класс вычислительного сервера.

Общий вид архитектуры Web-приложения представлен на рис. 1.

Одним из центральных компонентов вычислительного сервера является RMI-сервер. Его основное назначение — отделить вычислительную часть программы от частей, реализующих взаимодействие с пользователем, подготовку и обработку данных с целью снизить нагрузки на вычислительную часть за счет возможности ее переноса на отдельный вычислительный сервер (ВС). Масштабирование программы за счет использования нескольких ВС.

Основными требованиями, выдвинутыми к RMI-серверу для достижения поставленного назначения, являются:

1) работа с исполняемыми модулями ППП Optcon;

2) работа с данными ППП Optcon;

3) предоставление программного интерфейса (ПИ) для 1) и 2).

Фактически RMI-сервер представляет собой полноценный сервер приложений (СП), который можно использовать как в различных программных комплексах, так и в качестве компонента SOA.

Для централизации всех запросов к RMI-серверу ПК Optcon и для введения дополнительного уровня абстракции с целью увеличить интероперабельность, переносимость и надежность ПК был введен компонент RMI-прокси.

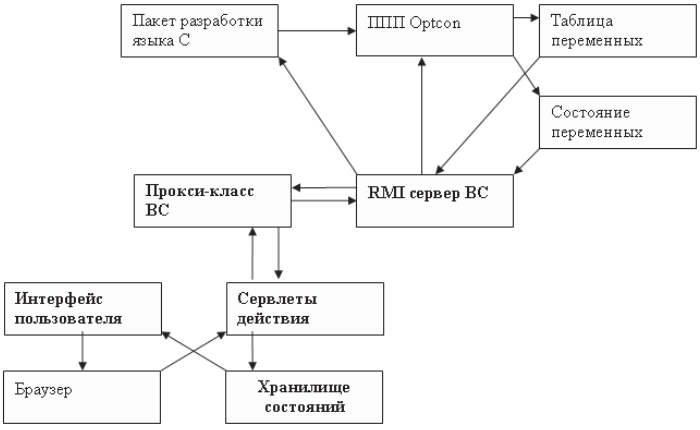


Рис.1. Архитектура вычислительного сервера

RMI-прокси отделяет запросы классов состояний и сервлетов от RMI-сервера. Интерфейс RMI-прокси повторяет интерфейс RMI-сервера, за исключением того, что все его методы являются локальными. Это позволяет, во-первых, централизовано контролировать «не надежный» канал связи с RMI-сервером, а во-вторых, не заботится о деталях реализации протокола взаимодействия ПК Optcon с сервером вычислений. В дальнейшем можно без труда добавить возможность использования вместо удаленного RMI-сервера, локального вычислителя либо реализовать сервер вычислений с использованием, например web-служб, CORBA или любой другой необходимой технологии.

Недостатком использования RMI-прокси является возросшая трудоемкость реализации ПК.

Реализацией конкретных действий со стороны интерфейса пользователя являются сервлеты действий. Сервлет действий ПК Optcon представляет собой Java-сервлет, выполняющийся в контексте сессии или в контексте запроса и вызывающий определенный метод RMI-сервера ПК Optcon, используя RMI-прокси ПК Optcon. Иными словами, сервлеты действий являются фасадами действий для реальных прецедентов.

Так же существуют сервлеты действий, предназначенные для обработки данных в контексте сессии или запроса. Эти сервлеты не являются функциональными сервлетами, но предоставляют определенные сервисные функции.

Например, сервлет построения графиков функций. Вызов этого сервлета не влечет за собой вызов функции RMI-сервера, предназначенной для обработки данных, однако для

построения графиков, сервлет запрашивает текущие данные от RMI-сервера.

Классы состояний являются хранилищем состояний вычислительного сервера и соответствуют объекту модель в паттерне «модель-вид-контроллер». Классы состояний хранят текущие состояния, как отдельной сессии, так и всего контекста приложения вычислительного сервера. Каждому сервлету действий соответствует одно или несколько состояний. Так же от классов состояний зависит текущее отображение интерфейса пользователя.

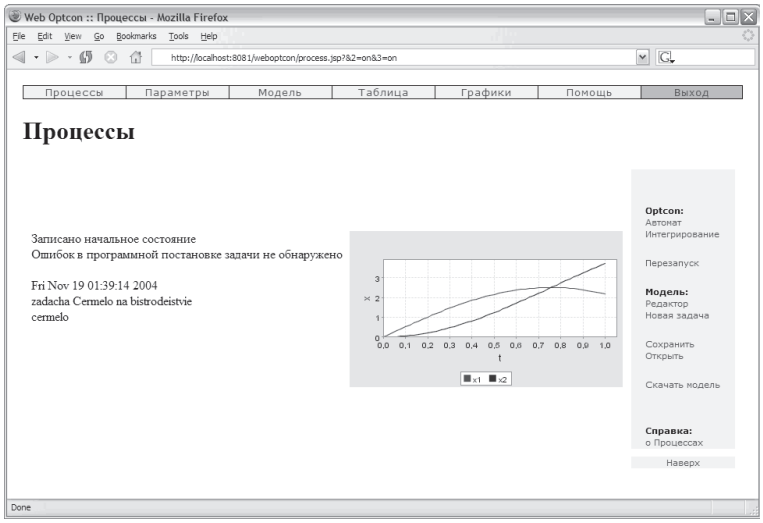


Рис.2. Общий вид интерфейса вычислительного сервера

JSP (Java Server Pages) — технология, позволяющая формировать HTML содержимое на стороне web-сервера с помощью языка Java. В ПК Optcon интерфейс пользователя, объект вид паттерна «модель-вид-контроллер» реализуется с помощью набора JSP-страниц. На JSP-страницы возлагается функции отображения текстовой, табличной и иной информации, создания форм для ввода данных.

Интерфейс пользователя ПК Optcon для удобства разделен на несколько разделов, в которых сгруппированы схожие или близкие по смыслу действия: процессы, параметры, модель, таблица, графики, помощь.

В разделе «Процессы» сгруппированы действия над управлением моделью и информация о текущем состоянии задачи. В разделе «Параметры» — действия с параметрами задачи и информация о них. В разделе «Модель» — информация о текущей модели. В разделе «Таблица» - текущие значения переменных модели. В разделе «Графики» — графическое представление текущих значений переменных модели. В разделе «Помощь» содержится описание работы ПК Optcon и помощь по использованию каждого из разделов.

Интерфейс пользователя выполнен по модульной схеме и в каждом из разделов на соответствующих местах расположены сходные по смыслу объекты. Общий вид интерфейса пользователя приведен на рис. 2.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Болдырев Е.А. Вычислительная инфраструктура научных исследований и подход к ее реализации// Информационные и математические технологии в науке, технике и образовании. — 2005. — ч.1. — С. 65 — 72.
2. The Anatomy of the Grid: Enabling Scalable Virtual Organizations. I. Foster, C. Kesselman, S. Tuecke. International J. Supercomputer Applications, 15(3), 2001. pp. 32-41.
3. Евтушенко Ю.Г. Методы решения экстремальных задач и их применение в системах оптимизации // М.: Наука, 1982. 426 с.
4. Федоренко Р.П. Приближенное решение задач оптимального управления // М.: Наука, 1978.- 488 с.
5. Тятюшкин А.И. Численные методы и программные средства оптимизации управляемых систем // Новосибирск: Наука, 1992.-193с.
6. Горнов А.Ю., Диваков А.О. Комплекс программ «OPTCON» для численного решения задач оптимального управления. Руководство пользователя // Отчет по х/д № 32/90. Иркутск, 1990.- 47 с.
7. Michael C. Ferris, Michael P. Mesnier and Jorge J. Morй NEOS and Condor: solving optimization problems over the Internet ACM Transactions on Mathematical Software // Volume 26 , No. 1 (Mar. 2000), pp. 1 — 18.
8. Батурин В.А., Горнов А.Ю**.,** Массель Л.В. Internet-технология математического моделирования и вычислительного эксперимента для решения задач оптимального управления // Вычислительные технологии", т.7, ч.1. — Новосибирск, 2002.- С. 339-346.

Пашков Н.Н.

УДК 681.514

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ УСТОЙЧИВОСТИ РАЗРЫВНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Известно, что решение проблемы управления состоянием сложных систем зависит от полноты модели управляемого процесса [1]. Особенно острой становится проблема управления процессами или объектами, содержащими нелинейные элементы релейного типа, состояние которых в точках разрыва неопределенно и модель неоднозначна.

В ряде случаев единственным решением задачи перевода таких объектов из одного состояния в другое являются разрывные управления скользящим режимом движения по фазовой траектории, заданной в виде линейной комбинации фазовых переменных [2]. К разрывным управлениям приходят также при решении задач оптимизации, исходя из принципов максимума Понтрягина, динамического программирования Беллмана и в адаптивных системах [3].

Практическая ценность разрывных систем на скользящих режимах определяется их инвариантностью к ограниченным возмущениям в условиях существенной неопределенности модели, линеаризацией и понижением размерности модели объекта. При этом требуемые движения реализуются за конечное время при ограниченных ресурсах управления.

Привлекательность перечисленных свойств и простота их технической реализации в режиме реального времени объясняют актуальность и перспективность применения разрывных систем управления для широкого класса объектов.

Однако, при попытке построить разрывное управление в скользящем режиме возникает ряд теоретических проблем. В первую очередь это связано с неопределенностью поведения объекта в точках разрыва, порождающей множество состояний равновесия, среди которых возможен устойчивый скользящий режим. Поэтому ставится задача: определить условия возникновения устойчивых скользящих режимов в области существования решений разрывной системы управления.

Рассмотрим систему дифференциальных уравнений с разрывной правой частью [4]:

$$\dot{y} = A \cdot y + B \cdot R_{\text{п}} \cdot \text{sign}(v - R_{\text{ос}} \cdot y) + \varphi(y) + \eta(t, f, \xi), \quad (1)$$

здесь $y \in R^n$, $v \in R^n$ - векторы переменных состояния объекта и задающих воздействий; $A \in R^{n \times n}$, $B \in R^{n \times n}$, $R_{П} \in R^{n \times n}$, $R_{ОС} \in R^{n \times n}$ - матрицы объекта, управления, регулятора и обратной связи; $\varphi(y) \in R^n$ - ограниченная нелинейная вектор-функция взаимосвязей; $\eta(t, f, \xi)$ - вектор-функция ограниченных возмущений; f - вектор сигнальных возмущений, ξ - вектор параметрических возмущений.

В реальных системах вектор задающих воздействий v системы (1) и нелинейная вектор-функция взаимосвязей $\varphi(y)$ ограничены: $\sup\|v\| \le \infty$, $\sup\|\varphi\| \le M$. Разрывная вектор-функция $\text{sign}(\cdot)$ для задачи (1) понимается покомпонентно. На рис. 1 представлена структурная схема рассматриваемой системы.

Для разрывной системы управления (1) в области допустимых состояний вторым методом Ляпунова определим условия устойчивости возмущенного движения.

Пусть v^* является программным воздействием, для которого существует возбуждаемое им решение y^* системы (1):

$$\dot{y}^* = A \cdot y^* + B \cdot R_{\text{П}} \cdot \text{sign}(v^* - R_{\text{ОС}} \cdot y^*) + \varphi(y^*) + \eta^*(t, f, \xi).$$

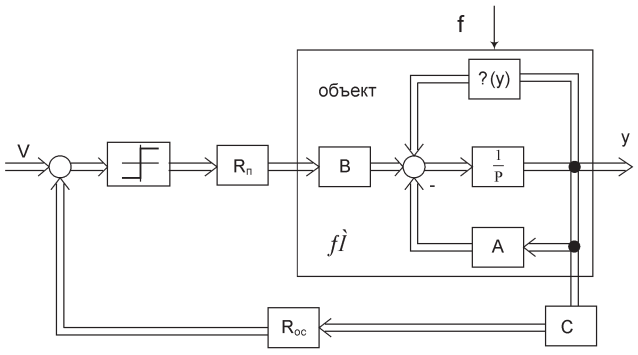


Рис. 1. Структурная схема системы с разрывным управлением

Тогда уравнения возмущенного движения системы (1) принимают вид:

$$\dot{\sigma} = A\sigma + BR_{П}\left(sign\sigma_1 - sign\sigma_2\right) + \delta + \eta, \quad \sigma = \sigma(t) = y - y^{*}, \quad \eta = \eta(t,f,\xi) - \eta^{*}(t,f,\xi), \tag{2}$$

где дополнительно введены обозначения:

$$\sigma_1 = v - R_{oc}y, \sigma_2 = v^{\cdot} - R_{oc}y^{\cdot}, \quad \delta = \varphi(y) - \varphi(y^{\cdot}), \sigma = R_{oc}^{-1}(\sigma_2 - \sigma_1), \tag{3}$$

$$\text{sign}\sigma_1 - \text{sign}\sigma_2 = S.$$

Найдем функцию Ляпунова для оценки устойчивости решений системы (2) в области, ограниченной ресурсами управления.

Рассмотрим множество решений системы (2) в области, образованной декартовым произведением трех множеств:

$$\Omega_H \times U \times I_t = \left\{(\sigma, v, t): \|\sigma\| \le h = const \ge 0, \; v \in U; \;\; t \in I_t, I_t = [t_0, \infty], \;\; t_0 \in R^1\right\}, \tag{4}$$

где Ω_H - n-мерный шар с центром в точке $\sigma = \sigma_1 = \sigma_2 = 0$.

Полная производная квадратичной формы:

$$V = \sigma^{\mathrm{T}} H\sigma \ge 0, \sigma \ne 0, \tag{5}$$

где σ^{T} - транспонированный вектор, H - положительно определенная симметричная матрица, вычисляется по формуле вида:

$$\dot{V} = 2\sigma^{\mathrm{T}} H\dot{\sigma}. \tag{6}$$

Внесем в выражение (5) значения $\dot{\sigma}$ из (2):

$$\dot{V} = 2\sigma^{\mathrm{T}} H[A\sigma + BR_{\Pi}(\text{sign}\sigma_1 - \text{sign}\sigma_2) + \delta + \eta]. \tag{7}$$

Для сокращения записи уравнения (7) введем обозначения:

$$V_1 = 2\sigma^{\mathrm{T}} HA\sigma = 2\sum_{i,j,k=1}^{n} \sigma_i h_{ij} a_{ik} \sigma_k, \tag{8}$$

$$V_2 = 2\sigma^{\mathrm{T}} HBR_{\Pi} S\sigma = 2\sum_{i,j,k,l=1}^{n} \sigma_i h_{ij} b_{jk} r_{kl} \sigma_l, \tag{9}$$

$$V_3 = 2\sigma^{T} H\delta = 2\sum_{i,j=1}^{n} \sigma_i h_{ij} \delta_j,$$

$$V_4 = 2\sigma^{\mathrm{T}} H\eta = 2\sum_{i,j=1}^{n} \sigma_i h_{ij} \eta_j. \tag{10}$$

где $BR_{\Pi} = \left\{b_{jk} r_{kl}\right\}$. Тогда выражение (6) примет следующий вид:

$$\dot{V} = V_1 + V_2 + V_3 + V_4. \tag{11}$$

Известно [5], что для неположительности квадратичной формы V_1 необходимо и достаточно гурвицевости матрицы A:

$$V_1 = \sigma^{\mathrm{T}}(A^{\mathrm{T}} H + HA)\sigma = -\sigma^{\mathrm{T}} Q\sigma, \tag{12}$$

где $A^{\mathrm{T}} H + HA = -Q$ - положительно определенная симметричная матрица.

Неположительность функции V_2, легко обеспечить выбором матрицы R_{OC}, если $B = rankR_{OC} = n$. Обозначим $R_{\text{oc}}^{-1} = \left\{k_{ij}\right\}$ и при $k = j$ вычислим следующую сумму:

$$\sum_{i,j,k,l=1}^{n} \sigma_i h_{ij} b_{jk} r_{kl} S_l = -\sum_{i,j,k,l,m=1}^{n} h_{ij} b_{jk} r_{kl} k_{lm} \times \times (1 - \text{sign}\sigma_{1i} \cdot \text{sign}\sigma_{2l})(|\sigma_{1i}| + |\sigma_{2l}|). \tag{13}$$

Выражение (13) содержит множители, значения которых не отрицательны:

$$(|\sigma_{1i}| + |\sigma_{2l}|) \ge 0, (1 - \text{sign}\sigma_{1i} \cdot \text{sign}\sigma_{2l}) \in [0,2]. \tag{14}$$

Поэтому знак функции V_2 будет определяться свойствами матрицы $(BR_{\Pi})^{\mathrm{T}} HR_{OC}^{-1}$. Пусть матрица $(BR_{\Pi})^{\mathrm{T}} HR_{\text{oc}}^{-1} = \Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \ldots, \lambda_n)$ диагональная, где $\lambda_1, \ldots, \lambda_n$ - собственные значения матрицы Λ. Если собственные числа положительны:

$$\lambda \ge 0, \left(i = \overline{1,n}\right), \tag{15}$$

то по критерию Сильвестра функция V_2 будет неположительна:

$$V_2 = -2\sum_{i,j,k,l,m=1}^{n} h_{ij} b_{jk} r_{kl} k_{lm} (1 - \text{sign}\sigma_{1i} \cdot \text{sign}\sigma_{2l}) \times \times (|\sigma_{1i}| + |\sigma_{2l}|) \le 0, \forall t \in I_t. \tag{16}$$

Следовательно, условия (15) являются необходимыми для неположительности функции V_2.

Оценим поведение функций V_3 и V_4. Поскольку в функции V_1, V_3 и V_4 входит произвольная матрица H, рассмотрим их совместно. Выпишем неравенство Липшица, которому по условию задачи удовлетворяют функции $\eta(t,f,\xi)$ и $\varphi(y)$, входящие в уравнение (1):

$$\|\varphi(y) - \varphi(y^{\cdot})\| \le C_o \|y - y^{\cdot}\| \tag{17}$$

где $\|\cdot\|$ - евклидова норма. С учетом введенной в (2) замены переменных:

$$\varphi(y) - \varphi(y^{\cdot}) = \delta, y - y^{\cdot} = \sigma \tag{18}$$

можно записать условие (17) в следующем виде:

$$\|\delta\| \le C_{\varphi} \|\sigma\|. \tag{19}$$

Аналогично получим оценку для возмущений $\eta(t,f,\xi)$:

$$\|\eta\| \le C_f \|f\| + C_{\xi} \|\xi\|, \tag{20}$$

где $C_{\varphi} = \max\left\|\frac{d\varphi(y)}{dy^{\mathrm{T}}}\right\|$, $C_f = \max\left\|\frac{d\eta(t,f,\xi)}{df^{\mathrm{T}}}\right\|$, $C_{\xi} = \max\left\|\frac{d\eta(t,f,\xi)}{d\xi^{\mathrm{T}}}\right\|$. Из известного в теории положительно определенных квадратичных форм неравенства:

$$\Delta\lambda_{\text{Н}}^{-}\|\sigma\|^2 \le V \le \Delta\lambda_{\text{Н}}^{+}\|\sigma\|^2.$$

Здесь H - матрица, у которой $\lambda_{\text{Н}}^{-}$ - наименьшее и $\lambda_{\text{Н}}^{+}$ - наибольшее собственные числа, с учетом (20), для V_1, V_3 и V_4 следуют оценки:

$$-2\Delta\lambda_A^{-}\|\sigma\|^2 \ge V_1 \ge -2\Delta\lambda_A^{+}\|\sigma\|^2,$$

$$2\Delta\lambda_H^{-}C_\varphi\|\sigma\|^2 \le V_3 \le 2\Delta\lambda_H^{+}C_\varphi\|\sigma\|^2, \qquad (21)$$

$$2\Delta\lambda_H^{-}(C_f\|f\|^2+C_\xi\|\xi\|^2) \le V_4 \le$$

$$\le 2\Delta\lambda_H^{+}(C_f\|f\|^2+C_\xi\|\xi\|^2), \qquad (22)$$

где Δl_A^{-} - наименьшее, Δl_A^{+} - наибольшее собственные числа матрицы A.

Возможность обеспечить $\dot V \le 0$ для всего множества решений позволяет использовать функцию $V>0$ как функцию Ляпунова для определения условий устойчивости возмущенного движения системы (2).

Определим условия, при которых производная функции V неположительна:

$$\dot V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 \le 0. \qquad (23)$$

Если диагональная матрица $(BR_{\text{П}})^{\text{T}} HR_{\text{ос}}^{-1} = \Lambda = \text{diag}(\lambda_1,\dots,\lambda_n)$ удовлетворяет условию (15), то функция V_2 отрицательно определенная. Однако для многосвязных систем требование диагональности матрицы $(BR_{\text{П}})^{\text{T}} HR_{\text{ос}}^{-1}$, как правило, не выполняется. Поэтому рассмотрим случай, когда матрица $(BR_{\text{П}})^{\text{T}} HR_{\text{ос}}^{-1}$ недиагональная:

$$(BR_{\text{П}})^{\text{T}} HR_{\text{ос}}^{-1} = L = \{l_{ij}\}, \left(i,j=\overline{1,n}\right). \qquad (25)$$

Теорема. Неравенства *доминирования* диагонали матрицы L:

$$|l_{kk}| \ge 4\sum_{i,k=1}^{n}|l_{ki}| \left(k=\overline{1,n}\right), \qquad (26)$$

где l_{ki} - элементы k-ой строки матрицы L, являются <u>необходимыми</u> и <u>достаточными</u> условиями неположительности функции V_2.

Доказательство. Непосредственным вычислением получим V_2 в следующем виде:

$$V_2 = 2S^T\left(BR_{\Pi}\right)^T HR_{OC}^{-1}\sigma =$$

$$= -2\sum_{i,j=1}^{n}\left(|\sigma_{1i}|+|\sigma_{2i}|\right)\times\left(1-S_{1i}S_{2i}\right)\times \qquad (27)$$

$$\times\left(l_{ii}+\sum_{i=1;i\ne j} l_{ij}S_jS_i\right),$$

где введены обозначения:

$$sign\sigma_{1i} = S_{1i},\ sign\sigma_{2i} = S_{2i},\ \left(i,j=\overline{1,n}\right),$$

$$\sigma_1^T = [\sigma_{11},\dots,\sigma_{1n}],\ \sigma_2^T = [\sigma_{21},\dots,\sigma_{2n}],$$

$$R_{OC}\sigma = \sigma_1 - \sigma_2.$$

Сомножители S_iS_j и $S_{1i}S_{2j}$ в правой части (27) ограничены сверху по модулю:

$$|S_iS_j| = \left|\left(sign\sigma_{1i} - sign\sigma_{2j}\right)\left(sign\sigma_{1i} - sign\sigma_{2j}\right)\right| \le 4$$

$$\left(i,j=\overline{1,n}\right). \qquad (28)$$

Из (28) следует, что неравенства (26) являются <u>достаточными</u> условиями для того, чтобы функция V_2 была неположительной.

Верхняя и нижняя границы функции V_2 на всей сфере Ω_H, за исключением поверхностей разрыва, соответственно равны:

$$\left.\begin{aligned}\sup_{\|\sigma\|=h} V_2 &= -\|\sigma\|\Delta l^{-}\\ \inf_{\|\sigma\|=h} V_2 &= -\|\sigma\|\Delta l^{+}\end{aligned}\right\}, \qquad (29)$$

где Δl^{+} - максимальное, а Δl^{-} - минимальное числа из всех:

$$\Delta l_k = |l_{kk}| - 4\sum_{i,k=1}^{n}|l_{ki}| \left(k=\overline{1,n}\right)..$$

Если условие (26) не выполняется: $\Delta l^{-} \le 0$, то внутри шара $\|\sigma\| \le h$ функция $V_2 \le -\|\sigma\|\Delta l^{-}$, т.е. ограничена сверху положительным числом. Отсюда следует <u>необходимость</u> условия (26). *Теорема доказана.*

Найдем условия экспоненциальной диссипативности системы (1). Для этого выполним суммирование оценок (21), (22) и (29) с учетом знаков рассмотренных границ изменения функций V_1, V_2, V_3, V_4. После суммирования вынесем за фигурные скобки $2\|\sigma\|^2$ и получим оценку границ изменения производной функции Ляпунова:

$$\left\{\lambda_H^{-}[C_\varphi + \frac{(C_f\|f\|+C_\xi\|\xi\|)}{\|\sigma\|}] - \lambda_A^{+} - \frac{\Delta l^{+}}{2\|\sigma\|}\right\}\|\sigma\|^2 \le$$

$$\dot V \le \left\{\lambda_H^{+}[C_\varphi + \frac{(C_f\|f\|+C_\xi\|\xi\|)}{\|\sigma\|}] - \lambda_A^{-} - \frac{\Delta l^{-}}{2\|\sigma\|}\right\}\|\sigma\|^2. \qquad (30)$$

Известно [5], что неположительности производной $\dot V$ неотрицательной квадратичной формы V достаточно, чтобы движение $\sigma = 0$ было асимптотически устойчивым при любых возмущениях относительно начальных условий:

$$\lim_{h\to\infty}\ \inf_{\|\sigma\|=h} V = \infty. \qquad (31)$$

Точные условия *экспоненциальной диссипативности* с учетом всех ограничений можно получить из (30), если потребовать, чтобы вся правая часть этого неравенства была не больше нуля за конечное время:

$$\lambda_H^+[C_\varphi + C_f\frac{f_{\max}}{h} + C_\xi\frac{\xi_{\max}}{h}] - \lambda_A^- - \frac{\Delta l^-}{2h} \le 0. \quad (32)$$

Предварительно оценим *финитность* разрывного управления системы (1). Упростим задачу, предполагая верным равенство $\eta = \eta(t,f,\xi) - \eta^*(t,f,\xi) = 0$ в системе (2). Из соотношений (29) получим следующие оценки:

$$\|\sigma\|^2 \le \frac{1}{\lambda_H^-}V,\ \|\sigma\| \le \frac{1}{\sqrt{\lambda_H^-}}\sqrt{V},$$

$$\|\sigma\|^2 \ge \frac{1}{\lambda_H^+}V,\ \|\sigma\| \ge \frac{1}{\sqrt{\lambda_H^+}}\sqrt{V}, \quad (33)$$

и запишем неравенства (30) в виде:

$$-\rho_- V + \beta_- V^\mu \le \dot V \le -\rho_+ V + \beta_+ V^\mu, \quad (34)$$

где:

$$-\rho_- = 2\left(C_0\lambda_H^- - \lambda_A^+\right)\frac{1}{\lambda_H^+},\ \beta_- = +\Delta l^-\frac{1}{\sqrt{\lambda_H^+}},$$

$$-\rho_+ = 2\left(C_0\lambda_H^+ - \lambda_A^-\right)\frac{1}{\lambda_H^-},\ \beta_+ = +\Delta l^+\frac{1}{\sqrt{\lambda_H^-}}. \quad (35)$$

$0 \le \mu \le 1$

Замена переменных в (34):

$$z = V^{1-\mu},\ \frac{dz}{dt} = (1-\mu)V^{-\mu}\frac{dV}{dt}, \quad (36)$$

позволяет записать уравнение *системы сравнения* $\left(t \ge t_0,\ z(t_0) = V^{1-\mu}(t_0)\right)$ для функции Ляпунова (5) в виде уравнения Бернулли:

$$\frac{dz}{dt} + (1-\mu)\rho\cdot z = (1-\mu)\beta. \quad (37)$$

Общее решение уравнения (37) равно:

$$z(t) = \frac{1}{\gamma(t)}\left[\int_{t_0}^{t}(1-\mu)\beta\gamma(t)dt + C\right],$$

$$\gamma(t) = e^{\int_{t_0}^{t}(1-\mu)\rho dt}. \quad (38)$$

Постоянная интегрирования C уравнения (38) находится из начальных условий $z(t_0) = z_0$ по выражению:

$$C = z_0. \quad (39)$$

Окончательно решение уравнения Бернулли (37) запишется в виде:

$$z(t) = \left(z_0 - \frac{\beta}{\rho}\right)e^{(1-\mu)\rho(t-t_0)} + \frac{\beta}{\rho}, \quad (40)$$

в силу которого можно утверждать, что система (2), при определенных условиях, может быть *экспоненциально диссипативна*.

Покажем, что система сравнения (40) финитна, т.е. переходит из одного фазового состояния в другое за конечное время. Отметим, что функция $z(t)$ уравнения (40) при $\rho = \rho_+$ и $\beta = \beta_+$ является *мажорантой* системы сравнения для функции V уравнения (5). Из (40), устремляя $z(t)$ к нулю, получим:

$$V(t_a - t_0) = 0,\ t_a \le t_0 + \frac{1}{(1-\mu)\rho}\ln\frac{\beta}{\beta - V^{1-\mu}\rho} \quad (41)$$

и $V(t-t_0) = 0$ при $t \ge t_a$. Финитность рассмотренной функции Ляпунова (5) означает, что через конечный интервал времени t_a, при выполнении условий (32) изображающая точка фазовой траектории разрывной системы (1) будет принадлежать многообразию $\sigma = 0$. Дальнейшее движение будет происходить по многообразию пересечения поверхностей разрыва в скользящем режиме, т.к. по определению область $\sigma = 0$ является центром n-мерного шара:

$$\Omega_H : \sigma = 0 \Rightarrow \sigma_i = 0,\ i = \overline{1,n}.$$

Поученный интервал времени t_a является верхней оценкой времени адаптации системы (1), причем:

$$\lim_{\rho\to 0} t_a(\rho) = \frac{V_0^{1-\mu}}{(1-\mu)\beta},\ t_0 = 0,\ \beta < \infty, \quad (42)$$

следовательно, $t_a = 0$ тогда и только тогда, когда $V_0 = 0$.

Предположим теперь, что для системы сравнения (37) существует $\beta > 0$, удовлетворяющее неравенству:

$$\beta > V_0^{1-\mu}\rho > 0, \quad (43)$$

в котором $0 \le \mu < 1$, ($V_0 > 0$ по определению). Тогда система (2) имеет экспоненциально диссипативный тип устойчивости. Это утверждение есть следствие решения (40) уравнения Бернулли (37).

Область диссипативности D множества решений системы (2) следует из (43):

$$D = \left\{\sigma : \lambda_H^-\|\sigma\|^2 \le \left(\frac{\beta}{\rho}\right)^{\frac{1}{1-\mu}}\right\}. \quad (44)$$

Обобщая условия (26), (32) и (43), имеем неравенство:

$$\frac{\Delta l^-}{2h} \ge \lambda_H^+[C_\varphi + C_f\frac{f_{\max}}{h} + C_\xi\frac{\xi_{\max}}{h}] - \lambda_A^-, \quad (45)$$

которое является необходимым и достаточным условием экспоненциально диссипативной устойчивости системы (1).

В качестве примера применения полученных условий устойчивости выполним расчет параметров разрывной системы управления многосвязным нелинейным объектом (рис. 2).

Пусть уравнения системы рис. 2 имеют вид (1). Определим матрицу регулятора

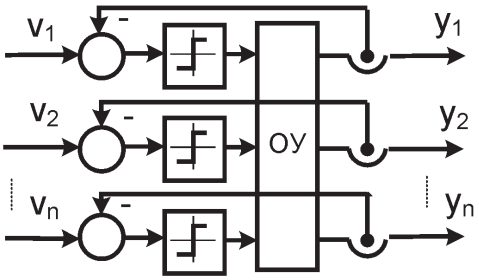


Рис. 2. Схема системы разрывного управления многосвязным нелинейным объектом.

$R_{\Pi} \in R^{n\times n}$ и матрицу обратных связей $R_{\text{ОС}} \in R^{n\times n}$ из условия (45). Вначале по известным техническим требованиям к объекту управления вычислим ограничения:

$$||\delta|| \le C_{\varphi}||\sigma||, ||\eta|| \le C_f||f|| + C_{\xi}||\xi||,$$
$$||\sigma|| \le h = \text{const} > 0,$$

где $C_{\varphi} = \max||\frac{d\varphi(y)}{dy^{\mathrm{T}}}||,$

$$C_f = \max||\frac{d\eta(t,f,\xi)}{df^{\mathrm{T}}}||, C_{\xi} = \max||\frac{d\eta(t,f,\xi)}{d\xi^{\mathrm{T}}}||.$$

Ненулевая матрица H может быть задана произвольно, поэтому зададим ее единичной диагональной соответствующего порядка. Параметры матрицы обратных связей $R_{\text{ОС}}$ определяются коэффициентами передачи датчиков переменных состояния, которые всегда можно нормировать и привести матрицу $R_{\text{ОС}}$ к диагональной единичной форме.

Найдем теперь матрицу регулятора $R_{П}$ в области определения системы:

$$\Omega_H \times U \times I_t = \{(\sigma, v, t): \|\sigma\| \le h = const \ge 0,$$
$$v \in U; t \in I_t, I_t = [t_0, \infty], t_0 \in R^1\}$$

из условий устойчивости

$$\frac{\Delta l^-}{2h} \ge [C_{\varphi} + C_f\frac{f_{\max}}{h} + C_{\xi}\frac{\xi_{\max}}{h}] - \lambda_A^-.$$

Структура матрицы $R_{П}$ согласована со структурой матрицы B. С учетом единичных диагональных матриц H и $R_{\text{ОС}}$ матрица $(BR_{\Pi})^T HR_{\text{ос}}^{-1} = \{b_{ik}r_{kj}\}$, где r_{kj} - элементы матрицы регулятора R_{Π}. Запишем разность $\Delta l_i = |l_{kk}| - 4\sum_{i=1;i\ne i}^{n}|l_{ij}|$ через параметры регулятора:

$$\Delta l_k = \left(b_{ii}r_{ii} + \sum_{i,k=1,i\ne k}^{m} b_{ik}r_{ik}\right) - 4\sum_{k,j=1,i\ne k}^{m} b_{ik}r_{kj}.$$

В результате подстановки выражения $\left(b_{ii}r_{ii} + \sum_{i,k=1,i\ne k}^{m} b_{ik}r_{ik}\right) - 4\sum_{k,j=1,i\ne k}^{m} b_{ik}r_{kj}$ в условие устойчивости (45), имеем систему алгебраических уравнений относительно неизвестных параметров регулятора r_{ij}:

$$\left(b_{ii}r_{ii} + \sum_{i,k=1,i\ne k}^{m} b_{ik}r_{ik}\right) - 4\sum_{k,j=1,i\ne k}^{m} b_{ik}r_{kj} \ge$$
$$\ge 2h[C_{\varphi} + C_f\frac{f_{\max}}{h} + C_{\xi}\frac{\xi_{\max}}{h}] - \lambda_A^-.i,j,k = \overline{1,m}.$$

Таким образом, получены параметрические условия устойчивости в виде системы алгебраических уравнений, которые учитывают реальные ограничения области определения объекта управления. Аналитическая форма алгебраических условий экспоненциально диссипативной устойчивости разрывной системы управления позволяет рассчитывать значения постоянных коэффициентов матрицы разрывного регулятора R_{ef}, обеспечивающего устойчивый скользящий режим во всей области определения объекта управления, что особенно важно для решения инженерных задач синтеза разрывных систем управления нелинейными многосвязными объектами.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Борцов Ю.А., Юнгер И.Б. Автоматические системы с разрывным управлением. — Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние. — 1986. — 168 с.
2. Пашков Н.Н., Юнгер И.Б. Адаптивное управление с использованием скользящих режимов // Корреляционно-экстремальные и адаптивные автоматические системы. — Л.: ЛЭТИ, 1984. — 126 - 146 с. Деп. в ВИНИТИ 30.10.84, № 7001-84.
3. Пашков Н.Н. Алгоритмы адаптивно-модального разрывного управления с эталонной моделью и стационарным наблюдателем.// Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — Иркутск: ИрГУПС. — 2005. — № 6. — С. 62-65.
4. Филиппов А.Ф. Дифференциальные уравнения с разрывной правой частью. — М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы. — 1985. — 224 с.
5. Ляпунов А.М. Общая задача об устойчивости движения. — М.-Л.: Гостехиздат, — 1950. — 387 с.

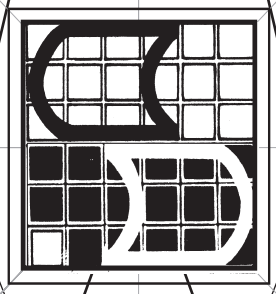
Министерство образования и науки Российской Федерации
Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта

Иркутский государственный университет путей сообщения
Российская инженерная академия

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование



Раздел 3.

Системный анализ и междисциплинарные подходы в исследованиях.

Содержание научного журнала:

Инженерная механика
Транспортные средства
Энергетика и электромеханика
Строительство, материалы и конструкции
Охрана окружающей среды
Автоматизация технологических процессов
Современные технологии
Системный анализ
Моделирование технических систем
Транспортные системы
Энергоснабжение и электромеханика
Управление техническими системами
Информационные технологии

Горбунов В.К., Козлова Л.А.

УДК 338.2:001.895

ПОСТРОЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ КВАЗИИНВАРИАНТНЫХ ИНДЕКСОВ ПОТРЕБЛЕНИЯ

1. Введение.

Используемые в экономико-статистической практике индексы количеств и цен потребления относятся к классу бинарных статистических, рассчитываемых по двум парам многомерных наборов (векторов) "цены-количества соответствующих индексируемым периодам динамики некоторого рынка продуктов (благ) конечного потребления [7], [5]. Эти многочисленные методы представляют субъективизм исследователей и политиков, но игнорируют субъективизм и рациональность потребителей, приспосабливающихся к меняющейся конъюнктуре в соответствии со своими предпочтениями. В условиях экономической нестабильности они дают неприемлемо большие расхождения [5], [1].

Первым шагом построения индексов потребления, учитывающих рациональность потребителей, была работа А.А.Конюса [8] (1924). В ней был предложен "истинный индекс стоимости жизни" (ИСЖ), как отношение стоимостей двух наборов товаров - реального, потреблённого в базовый период при соответствующих ценах, и виртуального, обеспечивающего в новых ценах базовый уровень потребления. При этом уровень потребления измеряется значением функции полезности, представляющей систему предпочтений потребителей. Идея Конюса получила развитие во многих зарубежных работах [16] и привела к созданию нового направления индексологии - теории "экономических" или "аналитических" индексов потребительского спроса.

Однако, несмотря на очевидную прогрессивность этой идеи, аналитические индексы до настоящего времени не вошли в полной мере в статистическую практику и спорадически появляются как объект исследования в отдельных научных публикациях [19], [9], [10]. Мы выделяем две основные причины, препятствующие развитию и внедрению в статистическую практику аналитических индексов, - техническую и методологическую.

Техническая причина заключается в сложности построения аналитических индексов в общем случае. Такие индексы определяются [16], [4] через функцию потребительских расходов, которая представляет минимальные расходы потребителей данного рынка, обеспечивающие при заданных ценах покупку набора товаров, эквивалентного заданному набору [15]. Предпочтения ансамбля потребителей, определяющие наблюдаемый на рынке спрос, должны быть представлены соответствующей порядковой функцией полезности. Такая функция должна строиться по статистическим данным с неизбежными погрешностями. Соответствующая "обратная задача" в полном объёме (построение рационализирующей вогнутой и дифференцируемой функции полезности) достаточно сложна и до настоящего времени методы её решения далеки от завершения [4].

Методологическая причина, сдерживающая развитие аналитического направления, заключается в известной несостоятельности традиционно излагаемой теории потребительского спроса как раздела микроэкономики [15]. Здесь одна и та же модель максимизации функции полезности на множестве товаров ограниченной стоимости применяется как к индивидуальному потребителю, так и к ансамблю потребителей некоторого рынка. Такая схема объясняется желанием построить теорию макрообъекта - рыночного спроса - через теорию микрообъекта - индивидуального потребителя, причём на основе одинаковой аналитической модели максимизации полезности. При этом естественно возник вопрос об аналитических свойствах индивидуальной и коллективной функций полезности, обеспечивающих корректное агрегирование [15]. Ответ был дан в статье У. Гормана 1953 года [14]. Оказалось, что необходимым и достаточным условием корректного агрегирования является

"выпрямление" кривых Энгеля для всех покупателей, причём все индивидуальные прямые Энгеля должны быть параллельными. Аналогичный результат получен в последние годы В.И. Зоркальцевым [6]. Класс соответствующих предпочтений является некоторым обобщением однородных предпочтений, совершенно недостаточным для представления известных свойств наблюдаемого рыночного спроса, установленным на основе анализа торговых статистик (классификация благ как ценных, малоценных, заменителей, дополнителей...).

Также необходимо отметить, что в традиционной схеме агрегирования индивидуальные потребители считаются автономными и независимыми. Но это протеворечит очевидному взаимовлиянию потребителей через обычаи и моду, а также влиянию рекламы и другим эффектам.

Далее, в 70-е годы XX столетия было установлено (теорема Дебре-Зонненшейна-Мантеля [17], [18]), что агрегированный спрос, являющийся суммой индивидуальных спро-сов, которые порождаются различными предпочтениями классического типа (полных, непрерывных, транзитивных,...), может быть произвольной непрерывной функцией, удовлетворяющей расходному тождеству (закону Вальраса). Это, очевидно, также противоречит упомянутым свойствам рыночного спроса. Эти свойства воспроизводятся классической моделью максимизации полезности, которая накладывает жёсткие аналитические ограничения на функции спроса требованием отрицательной полуопределённости и симметричности матрицы Слуцкого [15], [4].

Требование необходимой почти-однородности индивидуальных и коллективных предпочтений, а также эффект Дебре-Зонненшейна-Мантеля, делают несостоятельной традиционную схему построения теории потреблений "от индивидуального потребителя к коллективному" на основе одной и той же аналитической модели максимизации (порядковой) функции полезности. Однако эта несостоятельность не является основанием для отказа от позитивной части классической теории потребительского спроса, состоящей в формализации описания основного объекта теории - рыночного (агрегированного) спроса, представляющего не отдельных потребителей, а их статистически значимые ансамбли, а также эффективный аппарат его качественного и количественного анализа.

Способ освобождения теории потребительского рыночного спроса от описанных противоречий достаточно очевиден [4]. Именно анализ статистических данных, представляющих ансамбли потребителей, привёл классиков теории спроса (Курно, Энгель, Госсен,...) к математической модели максимизации функции полезности и развитию современного аналитического и вычислительного аппарата. Поэтому статистический ансамбль потребителей необходимо взять за априорный объект теории и признать, что для описания индивидуальных потребителей более уместен аппарат дискретных вероятностных процессов. Аналоги использования различного математического аппарата для описания сложных ансамблей и их компонент представляют физические теории сплошных сред. Поведение молекул газов и жидкостей описывается как броуновское движение (дискретный стохастический процесс), а поведение газа и жидкости, состоящих из таких молекул, - детерминированными дифференциальными уравнениями.

Разумеется, любая теория имеет свои границы применения, и функция полезности, "рационализирующая" статистические данные, существует не всегда, особенно в периоды резких социально-экономических изменений. Но в такие периоды, как показывают исследования [5], [1], традиционные бинарные статистические индексы также несостоятельны для адекватной макроэкономической (агрегированной) оценки ситуации на потребительских рынках. Эффективный критерий адекватности рынков конечного потребления классической модели максимизации коллективной функции полезности был получен в 1967 году в работе С. Африата [13]. Эта работа открыла новое плодотворное направление в конструктивной теории потребительского спроса, цель которой - количественное исследование реальных рынков конечной продукции, в частности, построение индексов потребления. На основе этой работы Х. Вэриан развил "непараметрический анализ" потребительского спроса [19], [20]. Этот метод в ограниченном варианте (для однородных предпочтений) использован, в частности, в работах [9], [10] для построения инвариантных индексов потребления [16] методом поэтапного поиска номенклатурных подгрупп, спрос на которыеоднороден4. Положительный, хотя и ограниченный относительно потенциальных возможностей

опыт применения непараметрического метода к реальным данным, приведенный в этих работах, говорит о достаточно широких границах применимости классической модели потребления для построения индексов.

В предлагаемой работе излагается сущность аналитического подхода и непараметрического метода решения обратной задачи потребления, описываются и исследуются квазиинвариантные индексы потребления, введённые в [4] как обобщение инвариантных индексов на случай неоднородных предпочтений.

2. Аналитические индексы потребительского спроса. Аналитические (экономико-теоретические) индексы спроса определяются [16] в рамках классической модели максимизации ординальной функции полезности $u(x)$, определенной в пространстве n товаров R_+^n, при бюджетном ограничении:

$$u(x(p,e)) = \max\{u(x): \langle p,x\rangle = e, x \ge 0\}. \quad (1)$$

Здесь и далее $p>0$ - вектор цен, e - расходы потребителей (точнее, покупателей) данного рынка товаров, $\langle p,x\rangle$ - скалярное произведение, представляющее стоимость сделанных покупок x. При этом неявно принимается гипотеза существования коллективной функции полезности, представляющей усреднённые (и реально взаимодействующие между собой) предпочтения индивидуальных потребителей, и порождающей коллективный отклик на ценовую ситуацию p в виде совокупных расходов e и количеств покупок x, представляемых как отображение (векторная функция) спроса $x(p,e)$. Вопрос об адекватности данной модели конкретному рынку, представленному статистическими данными

$$\{p^t, x^t, e_t = \langle p^t, x^t\rangle : t = \overline{0,T}\}, \quad (2)$$

эффективно решается с помощью приводимой ниже теоремы Африата [13]. При этом выясняется возможность использования монотонно возрастающих и вогнутых функций полезности. Для углублённого анализа спроса (сравнительной статики) требуется также непрерывная дифференцируемость функций полезности до второго порядка.

Базовой функцией для аналитических индексов является функция потребительских затрат

$$e(p,x) = \min\{\langle p,x'\rangle : u(x') \ge u(x), x' \ge 0\}. \quad (3)$$

Эта функция определяет аналитические индексы цен и количеств на статистических данных (2), соответственно,

$$P(p^t,p^s,x) = \frac{e(p^t,x)}{e(p^s,x)},\ Q(x^t,x^s,p) = \frac{e(x^t,p)}{e(x^s,p)}. \quad (4)$$

Индекс Конюса в этих обозначениях суть $P(p^t,p^s,x^s)$ [4].

Качество индексов принято оценивать в соответствии с тестами Фишера [7], из которых основными являются тесты транзитивности, мультипликативности и промежуточности, несовместимые для бинарных статистических индексов [5]. Индексы (4) в общем случае транзитивны и перекрёстно мультипликативны, т.е. $P(p^t,p^s,x^t)Q(x^t,x^s,p^s) = b_t / b_s$. Для них также выполняются односторонние оценки экстремальными элементарными индексами, но свойство промежуточности в общем случае не гарантировано [4].

Для вычисления функции затрат $e(p,x)$, определяющей индексы (4), требуется функция полезности $u(x)$, адекватная данному ансамблю потребителей, представленному статистикой (2). Эта проблема достаточно сложная, так как до настоящего времени не известно эффективных методов построения дифференцируемых функций (полезности) многих переменных со свойствами монотонности и вогнутости по конечному набору значений этих или порождаемых ими функций (спроса). Однако излагаемый ниже непараметрический метод построения функций полезности по данным (2) является основой частичного решения проблемы аналитических индексов - построения инвариантных [16] и квазиинвариантных [4] индексов.

3. Обратная задача теории потребления. Теорема Африата. Обратной задачей для модели (1) называется задача определения функции $u(x)$ такой, что расчётный спрос $x(p,e)$ на статистических значениях аргументов (p^t,e_t) совпадает (с точностью до погрешностей данных) с его наблюдаемыми значениями x^t. Функцию $u(x)$, удовлетворяющую этому условию, принято называть рационализирующей данные (2) [15]. При этом

$$u(x^t) = \max\{u(x): \langle p^t,x\rangle \le e_t, x \ge 0\},\ t = \overline{0,T}$$

Ведём перекрестные стоимости наборов x^s в ценах p^t - «кросс-коэффициенты»

$$e_{ts} = \langle p^t, x^s \rangle, a_{ts} = e_{ts} - e_t, \quad (5)$$

и «числа Африата» $u_t = u(x^t)$, $\lambda_t = \lambda(p^t, x^t)$. Имеет место [13], [4]

Теорема Африата. *Существование непрерывной, монотонно возрастающей и вогнутой функции полезности, рационализирующей торговую статистику (2), эквивалентно положительной разрешимости системы линейных неравенств*

$$u_s - u_t - \lambda_t a_{ts} \le 0,\ s,t = \overline{0,T},\ s \ne t. \quad (6)$$

Для обеспечения положительности решения системы (6) накладываются условия на две компоненты её решений $\{u_t, \lambda_t\}$:

$$\lambda_0 = 1, \quad u_0 = e_0. \quad (7)$$

Структура (6) позволяет сделать это без противоречия, так как эта система алгебраически однородна и для u-чисел $\{u_t\}$ важны не абсолютные значения, а их разности.

Для корректного агрегирования данных о потребительском спросе важно находить группы товаров, спрос на которые описывается моделью (1) с положительно однородной функцией полезности. В работе Вэриана [20] установлено, что в однородном случае выполняются равенства

$$u_t = \lambda_t e_t, \quad (8)$$

и характеристическая система Африата (6) распадается на две эквивалентные системы, определяющие, соответственно, числа $\{u_t\}$ и $\{\lambda_t\}$. Первая из них - u-система

$$e_t u_s \le e_{ts} u_t,\ s,t = \overline{0,T}. \quad (9)$$

Вторая - λ-система

$$\lambda_s e_s \le \lambda_t e_{ts}\ s,t = \overline{0,T}. \quad (10)$$

При этом теорема Африата модифицируется очевидным образом. Для обеспечения положительности решений редуцированных "специальных" (для однородных предпочтений) систем (9) и (10) также используются (по-отдельности) условия (7).

Нахождение чисел $\{u_t\}$ и $\{\lambda_t\}$, удовлетворяющих основной системе неравенств Африата (6) или её специальным вариантам (9), (10), даёт интерполяционные условия для построения функций $u(x)$ и $\lambda(p,b)$:

$$u(x^t) = u_t, \lambda(p^t, b_t) = \lambda_t, t = \overline{0,T}. \quad (11)$$

Как уже отмечено, до настоящего времени не существует эффективных методов построения функций многих переменных с условиями монотонности, вогнутости и дифференцируемости по интерполяционным условиям типа (11). В [13], [20] указаны кусочно-линейные функции полезности, удовлетворяющие условиям (11) и рационализирующие данные (2) в общем и однородном случаях. Такие функции неудобны для построения функции расходов (3), определяющей индексы (4). Для построения инвариантных и квазиинвариантных индексов, однако, достаточно определение чисел Африата $\{u_t\}$ и $\{\lambda_t\}$. Ввиду неединственности решений совместных систем неравенств на выбор этих чисел продуктивно наложить дополнительные условия. Кроме того, следует учитывать неизбежные погрешности данных (2), которые могут быть основной причиной возможной несовместности неравенств Африата.

4. Инвариантные и квазиинвариантные индексы. Известно [16], [4], что в однородном случае индексы (4) зависят только от индексируемых пар (p^s, p^t) или (x^s, x^t) и выражаются через функцию полезности и обратный множитель Лагранжа $\lambda(p)$ задачи (1), где $e=1$, обозначаемый далее

$$z(p) = \frac{1}{\lambda(p)}.$$

Соответственно, однородные аналитические индексы (4) обозначим

$$P_{st} \equiv P(p^t, p^s) = \frac{z(p^t)}{z(p^s)},$$

$$Q_{st} \equiv Q(x^t, x^s) = \frac{u(x^t)}{u(x^s)}. \quad (12)$$

По причине независимости этих индексов цен и количеств от сопряжённых величин (количеств и цен) они названы в [16] инвариантными индексами. Из определений (12) следует, что инвариантные индексы вычисляются по числам Африата $\{u_t, z_t = 1/\lambda_t\}$, определяемым как решения специальных систем Африата (9) и (10):

$$P_{st} = \frac{\lambda_s}{\lambda_t} = \frac{z_t}{z_s}, Q_{st} = \frac{u_t}{u_s}. \quad (12)$$

Инвариантные индексы удовлетворяют всем тестам Фишера, т.е. являются идеальными. Однако, реальные предпочтения потребителей для произвольных, в том числе содержательных для экономического анализа номенклатурных групп, не однородны, следовательно, эти индексы удаётся строить лишь для некоторых групп товаров [9], [10]. В удачном случае полученные инвариантные индексы, отнесённые к базовому периоду, т.е. $\{P_{0t}, Q_{0t}\}$,

можно считать агрегированными ценами и количествами потребления соответствующих товарных групп и продолжить процедуру поиска суперагрегатов, вплоть до получения скалярной пары индексов цен и количеств для исходной группы товаров.

Обобщение инвариантных индексов на общий неоднородный случай предложено в [4]. При этом по *u*-числам u_t формально определяются квазимножители $\hat{\lambda}_t$ и обратные им числа $\hat{z}_t = 1/\hat{\lambda}_t$, обладающие свойством (8):

$$u_t = \hat{\lambda}_t e_t, \text{ или } \hat{z}_t = \frac{e_t}{u_t}.$$

После этого можно определить индексные числа цен

$$\hat{P}_{st} = \frac{\hat{z}_t}{\hat{z}_s} = \frac{\hat{\lambda}_s}{\hat{\lambda}_t} = \frac{e_t u_s}{e_s u_t}, \qquad (14)$$

сохранив определение (13) для индекса количеств Q_{st}.

Индексы цен (14), очевидно, транзитивны, и вместе с индексом количеств Q_{st} они мультипликативны. В случае однородных предпочтений индексы $\left(\hat{P}_{st}, Q_{st}\right)$ совпадают с инвариантными индексами (13), поэтому их естественно называть квазиинвариантными индексами потребления. Свойство промежуточности в общем случае для этих индексов может не выполняться.

За основу определения квазиинвариантных чисел можно также взять лямбда-числа λ_t, введя квази-*u*-числа по формуле

$$\hat{u}_t = \lambda_t e_t.$$

При этом можно определить индексные числа количеств

$$\hat{Q}_{st} = \frac{\hat{u}_t}{\hat{u}_s} = \frac{\hat{\lambda}_t e_t}{\hat{\lambda}_s e_s}, \qquad (15)$$

сохранив определение (13) для индекса цен P_{st}.

Пара индексов $\left(P_{st}, \hat{Q}_{st}\right)$, как и симметричная пара $\left(\hat{P}_{st}, Q_{st}\right)$, транзитивна и мультипликативна. В общем случае они также могут не обладать свойством промежуточности. Их поведение относительно невыполнения этого важного свойства может быть различно как по величине, так и по направлению его нарушения. Поэтому естественно ввести усредненные квазиинвариантные индексы, представляющие среднегеометрические значения соответствующих формул (13), (14) и (15):

$$\overline{P}_{st} = \sqrt{P_{st}\hat{P}_{st}} = \sqrt{\frac{\lambda_s e_t u_s}{\lambda_t e_s u_t}},$$

$$\overline{Q}_{st} = \sqrt{Q_{st}\hat{Q}_{st}} = \sqrt{\frac{\lambda_t e_t u_t}{\lambda_s e_s u_s}}. \qquad (16)$$

Такое усреднение, очевидно, сохраняет свойства транзитивности и мультипликативности и уравновешивает возможные нарушения свойства промежуточности. Представляется интересным исследование квазиинвариантных индексов на модельных и реальных данных.

5. Об алгоритмах решения неравенств Африата. Стандартный подход к решению систем линейных неравенств, основанный на переходе к некоторой задаче линейного программирования (ЛП), решаемой конечными методами, для неравенств Африата (6) и их частных случаев (9) и (10), не эффективен. Эти системы относятся к "высокому" типу (число неравенств равно квадрату половины числа неизвестных), где каждое из неравенств связывает три или две переменные. Для этих систем разработаны эффективные специальные методы [19], [20], ядром которых является алгоритм Варшалла-Флойда для поиска на ориентированном графе кратчайшего пути [11]. Однако эти методы применимы лишь для совместных систем неравенств. Система Африата с реальными данными, определяющими её коэффициенты (5), может быть несовместной. Эта несовместность, или же вырожденность, может быть следствием как неадекватности стационарной модели (1), так и следствием погрешностей исходных данных (2).

Для уточнения причин возможного вырождения системы неравенств необходим более тонкий подход, заключающийся в получении псевдорешения, минимизирующего некоторую невязку системы, и выяснения вопроса, можно ли объяснить полученную несовместность влиянием погрешностей исходных данных? Если да, то модель (1) можно использовать для решения практических задач. При этом полученное псевдорешение (числа Африата), определяет в однородном случае инвариантные индексы (13), и в общем случае - квазиинвариантные (16). Ввиду неединственности решений совместных неравенств, на выбор чисел Африата продуктивно накладывать требование близости получаемых индексов статистическим индексам, используемым на практике. Если невязки неравенств Африата

на полученном псевдорешении выходят за пределы, объяснимые влиянием погрешностей, то модель (1) неадекватна относительно статистики (2).

Для исследования совместности и получения решения или приемлемого псевдорешения мы используем релаксационно-штрафной метод [3], основанный на введении новой переменной - релаксационного параметра r, так, чтобы новая система стала совместной. На первом этапе такому преобразованию подвергается одна из специальных систем , для определённости, (10). Переходя к обратным множителям z_t с условием $z_0 = 1$, получим систему

$$\begin{cases} e_0 z_t - r \le e_{t0} & -e_{0t} z_t - r \le -e_t \\ e_t z_s - e_{st} z_t - r \le 0 & (s,t) = \overline{1,T} \end{cases} \qquad (17)$$

Для этой системы решается задача ЛП относительно переменных $\{z_1,...,z_T,r\}$ с минимизируемым функционалом r. Если минимальное значение r^- достаточно малое, то гипотеза существования однородной функции полезности, рационализирующей данные (2), принимается. По оптимальным числам z_t можно строить числа $u_t = e_t / z_t$, и по формулам (13) - инвариантные индексы $\{P_{st}, Q_{st}\}$.

Однако задача ЛП, решаемая обычно симплекс-методом, дает некоторое угловое решение. Системы Африата, как правило, являются вырожденными из-за существенных погрешностей статданных. При этом их релаксация описанным или другим методом может приводить к неустойчивым допустимым множествам.

Для стабилизации построения индексов можно поставить дополнительную задачу квадратичного программирования (КП) о выборе из совместной системы (17), где зафиксировано $r = r^-$, решения, ближайшего к пробному набору $\{z_t^F\}$, ориентируясь на статистические индексы, построенные по данным (2). Наиболее удобны для этой цели индексы Фишера, вычисляемые по данным (2) по известным формулам [4], [5],

$$F_{0t}^p = \sqrt{\frac{e_{t0} e_t}{e_0 e_{0t}}},\ F_{0t}^q = \sqrt{\frac{e_{t0} e_t}{e_0 e_{0t}}}. \qquad (18)$$

Эти индексы удовлетворяют тестам мультипликативности и промежуточности, но они не транзитивны. Уточнение выбора чисел Африата особенно важно для общей системы (6). Итак, если гипотеза однородности предпочтений отвергается, то аналогичным образом преобразуем общую систему (6) с условиями (7):

$$\begin{cases} u_s \le r + a_{0s} + e_0, & s = \overline{1,T}; \\ -u_t - \lambda_t a_{t0} \le r - e_0, & t = \overline{1,T}; \\ -u_s + u_t - \lambda_t a_{ts} \le r, & s,t = \overline{1,T}, t \ne s. \end{cases} \qquad (19)$$

Здесь также вначале решается задача ЛП относительно переменных $\{u_1,...,u_T,\lambda_1,...,\lambda_T,r\}$ с минимизируемым функционалом r. Если минимальное значение r^- достаточно малое, то гипотеза существования (неоднородной) функции полезности, рационализирующей данные (2), принимается.

Для уточнения выбора решения из совместной системы (19), где $r = r^-$, строим пробное решение на основе формул инвариантных индексов (13), где полагаем $s = 0$ и вместо P_{0t}, Q_{0t} подставляем индексы Фишера (18). При этом получаем

$$u_t^F = e_0 F_{0t}^q,\quad \lambda_t^F = \frac{1}{F_{0t}^p},\quad t = \overline{0,T}. \qquad (20)$$

Для однородной системы (17) полагаем $z_t^F = F_{0t}^p$.

Сформировав это приближение, ставим задачу минимизации функционала

$$\varphi(u,\lambda) = \frac{1}{2}\sum_{t=0}^{T}\left[\left(u_t - u_t^F\right)^2 + \left(\lambda_t - \lambda_t^F\right)^2\right]. \qquad (21)$$

при условиях (19), где $r = r^-$. Аналогичная задача продуктивна и для системы (17).

Эффективным алгоритмом решения поставленных задач КП с "высокими" системами ограничений и малым числом переменных в каждом ограничении является алгоритм нормального решения систем линейных неравенств типа "активных наборов", разработанный в [2].

6. Вычислительный эксперимент. Описанная методика построения квазиинвариантных индексов потребительского спроса была протестирована на модельных примерах и реальной статистике цен на продукты питания в г.Иркутске [5]. В качестве исходных данных использовались помесячные цены 1995 года на три продовольственных товара: хлеб, говядина, молоко. Истинные количества помесячного потребления этих товаров неизвестны и, как и в работах [1] и [5], мы смоделировали правдоподобную динамику, используя приведенные в [12] годовые объемы потребления на данные товары по Иркутску в годы (1995; 1996): хлеб (кг/год) (130; 121); мясо (кг/год) (48; 47); молоко (л/год) (200; 170). Значения, соответствующие

1995 году, разделённые на 12, брались за потребление в январе, соответственно, двенадцатая часть значений 1996 года считалась потреблением в декабре 1995 года. Потребление говядины принято за 20% от потребления мяса. Это даёт следующие граничные значения спроса на хлеб, говядину и молоко: на январь (10,83; 0,80; 16,70) и на декабрь (10,08; 0,78; 14,16).

Месячное потребление моделировалось следующим образом. На хлеб потребление снижалось по геометрической прогрессии с постоянным темпом, обеспечивающим удовлетворение граничных значений (10,83; 10,08). Это даёт показатель прогрессии 0,993. Потребление говядины (xi) и молока (x2) смоделировано по спросу, порождаемому логарифмической функцией полезности

$$u(x)=\alpha_1\ln(1+\beta_1 x_1)+\alpha_2\ln(1+\beta_2 x_2). \quad (22)$$

Соответствующие формулы спроса

$$\begin{cases} x_1(p,e)=\dfrac{\alpha_1\beta_1\beta_2 e-p_1a_2\beta_2+p_2a_1\beta_1}{(\alpha_1+\alpha_2)\beta_1\beta_2 p_1}, \\ x_2(p,e)=\dfrac{\alpha_2\beta_1\beta_2 e-p_2a_1\beta_1+p_1a_2\beta_2}{(\alpha_1+\alpha_2)\beta_1\beta_2 p_2}. \end{cases} \quad (23)$$

Для вычисления параметров функции (22) составлялась система из четырех уравнений, в которой аналитический спрос (23) с заданными для января и декабря ценами и суммарными расходами на говядину и молоко приравнивался к соответствующим граничным значениям, приведенным выше. Система решалась методом наименьших квадратов, в результате получились следующие значения параметров: $\alpha_1=0{,}317$, $\alpha_2=1{,}513$, $\beta_1=218{,}86$, $\beta_2=0{,}713$. Полученная статистика представлена в табл. 1.

На первом этапе решалась задача ЛП для расширенной однородной системы Африата (17). При этом было получено значение невязки $r^-=0{,}006$. Индексы, вычисленные по формулам инвариантных (13), оказались не отличимыми от индексов Фишера $F^p_{1,t}$ и $F^q_{1,t}$ приведенных в табл. 2. Углублённый анализ индексов Фишера, заключающийся в вычислении их помесячных значений $F^p_{t-1,t}$ и последующего перемножения, показывает их нетранзитивность (различие от значения $F^p_{1,12}$ в третьем знаке после запятой). Следовательно, они не являются инвариантными и статистика табл. 1 не может быть рационализирована никакой однородной функцией полезности.

На втором этапе решение задачи ЛП для общей системы (19) дало существенно меньшую невязку $r^-=0{,}0003$. Это позволяет принять гипотезу существования (неоднородной) функции полезности, рационализирующей статистику (2), и построить квазиинвариантные индексы по описанной методике. Для этого решена задача минимизации функционала (21) на решениях системы (19) с $r^-=0{,}0003$. По полученным числам Африата и формулам (16) построены индексы $\overline{P}_{1,t}$, $\overline{Q}_{1,t}$, приведенные в табл. 2 вместе с индексамиФишера и экстремальными элементарными индексами

$$P_t^-=\left\{\min\left(p_i^t/p_i^1\right)\right\},\ Q_t^-=\left\{\min\left(x_i^t/x_i^1\right)\right\},$$
$$P_t^+=\left\{\max\left(p_i^t/p_i^1\right)\right\},\ Q_t^+=\left\{\max\left(x_i^t/x_i^1\right)\right\},$$

нужными для проверки теста промежуточности для новых, квазиинвариантных индексов.

Из табл. 2 видно, что построенные по статистике табл. 1 квазиинвариантные индексы удовлетворяют тесту промежуточности. Как и

Таблица 1

Статистика спроса

	Цены, руб.			Потребление,			
месяц	хлеб	говядина	молоко	хлеб	говядина	молоко	Расход
янв.	1168	6911	1453	10.83	0.792	16.70	42393
фев.	1360	7200	1813	10.76	0.913	16.00	50203
мар.	1508	7894	2800	10.69	1.216	15.04	67835
апр.	1703	9077	2837	10.62	1.073	15.06	70545
май.	1836	12000	2893	10.55	0.848	15.49	74354
июн.	1874	14295	2920	10.48	0.729	15.75	76036
июл.	1944	15799	2939	10.41	0.669	15.90	77544
авг.	2160	16020	2868	10.35	0.642	15.86	78129
сен.	3183	14186	2750	10.28	0.677	15.40	84666
окт.	3175	16000	2843	10.21	0.623	15.47	86365
ноя.	3218	13719	3200	10.15	0.768	14.42	89348
дек.	3500	13416	3200	10.08	0.772	14.16	90949

индексы Фишера, они мультипликативны и, в отличие от них, - транзитивны по построению. Отметим также интересное свойство, проявлявшееся и в других экспериментах: накопленные к концу года квазиинвариантные индексы цен $P_{1,t}$ меньше индексов Фишера $F^{p}_{1,t}$ (здесь начиная с сентября), а соответствующие индексы количеств - больше. Это можно объяснить тем, что квазиинвариантные индексы строятся в рамках модели (1), отражающей (в общепринятом смысле) рациональность потребительского выбора, в силу которой потребители приспосабливаются к росту цен и снижению реальных доходов.

Таблица 2

Индексы Фишера и квазиинвариантные

t	РГ	Kr	Pu	Pr+	Qt	Fit	Qu	Qt
1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	1.04	1.19	1.20	1.25	0.96	0.99	0.99	1.15
3	1.14	1.61	1.61	1.93	0.90	0.99	0.99	1.54
4	1.31	1.71	1.71	1.95	0.90	0.97	0.97	1.35
5	1.57	1.83	1.86	1.99	0.93	0.96	0.94	1.07
6	1.61	1.89	1.92	2.07	0.92	0.95	0.93	0.97
7	1.66	1.95	1.98	2.29	0.84	0.94	0.92	0.96
8	1.85	1.98	2.01	2.32	0.81	0.93	0.92	0.96
9	1.89	2.16	2.13	2.73	0.85	0.92	0.94	0.95
10	1.96	2.23	2.21	2.72	0.79	0.91	0.92	0.94
11	1.99	2.34	2.32	2.76	0.86	0.90	0.91	0.97
12	1.94	2.41	2.37	3.00	0.85	0.89	0.90	0.97

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Айзенберг Н.И. Сравнительный анализ методов расчёта индексов цен. Автореф. канд. экон. наук. ИСЭМ СО РАН, Иркутск, 2000. 23 с.
2. Горбунов В.К. Методы редукции неустойчивых вычислительных задач. Фрунзе: Илим, 1984. 241 с.
3. Горбунов В.К. Релаксационно-штрафной метод и вырожденные экстремальные задачи. -Доклады АН. 2001, Т. 377, No. 5, С. 583-587.
4. Горбунов В.К. Математическая модель потребительского спроса: Теория и прикладной потенциал. М.: Экономика, 2004. -211 с.
5. Зоркальцев В.И. Индексы цен и инфляционные процессы. Новосибирск: Наука, 1996. - 316 с.
6. Зоркальцев В.И. Агрегирование покупателей. - Равновесные модели экономики и энергетики: Тр. Всеросс. конф. и секции Матем. экономики XIII Байкальской межд. школы-семинара „Методы оптимизации и их приложения", Иркутск: Байкал, 3-7 июля 2005 года: Изд-во ИСЭМ СО РАН., 2005, С. 278-283.
7. Кёвеш П. Теория индексов и практика экономического анализа. М.: Фин. и стат., 1990. - 460 с.
8. Конюс А.А. Проблема истинного индекса стоимости жизни. - Экономика и матем. методы, Т.27, 1989 (1924, переиздание), No. 3, С. 435-444.
9. Поспелова Л.Я., Шананин А.А. Показатели нерациональности потребительского поведения и обобщенный непараметрический метод. - Матем. моделирование, 1998, Т.10, No. 4, С. 105-116.
10. Поспелова Л.Я., Шананин А.А. Анализ торговой статистики Нидерландов 1951-1977 гг. с помощью обобщенного непараметрического метода. М.: Изд-во ВЦ РАН, 1998. - 160 с.
11. Романовский И.В. Алгоритмы решения экстремальных задач. М.: Наука, 1977. - 218 с.
12. Регионы России. Социально-экономические показатели. Стат.сб./Росстат. М., 2001. 402 с.
13. Afriat S.N. The construction of utility functions from expenditure data. - International Economic Review, 1967, V. 8, pp. 67-77.
14. Gorman W.M. Community preference fields. - Econometrica, 1953, V.21, p. 63-80.
15. Mas-Colell A., Whinston M., Green J. Microeconomic Theory. New York: Oxford Univ. Press, 1995. - 648 c.
16. Samuelson P.A., Swamy S. Invariant economic index numbers and canonical duality: survey nd synthesis. - The American Economic Review, 1974, V. 64, No. 4, p. 566-593.
17. Sonnenschein H. Market excess demand functions - Econometrica, 1972, V. 40, No. 3, p. 549-563.
18. Hugo F. Sonnenschein. - http://cepa.newschool.edu/het/profiles/sonnens.htm
19. Varian H. The nonparametric approach to demand analysis. - Econometrica, 1982, V. 50, No. 4, p. 945-973.
20. Varian H. Non-parametric tests of consumer behaviour. - The Review of Economic Studies, 1983, V. 50, p. 99-110.

Ворожцова Т.Н.

УДК 004.42

ОНТОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИКРОФОРМАТОВ

Введение. Исследованию возможностей использования онтологий в различных направлениях в настоящее время уделяется достаточно много внимания. На их основе решаются такие задачи, как представление знаний для релевантного поиска и вывода информации; формализация знаний предметных областей и их классификация; организация общей и предметной терминологии; выделение концептуальных знаний и др. Основная цель разработки онтологий — организация и структурирование знаний, а также их приобретение и повторное использование. Использование международных открытых стандартов, а также современных инструментов и технологий Web-программирования на базе использования языка XML и метаданных способствует дальнейшему расширению перспектив применения онтологического подхода.

В Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ) СО РАН ведется работа по созданию IT-инфраструктуры научных исследований с использованием онтологий для описания интеллектуальных ресурсов [1], а также предложено использовать онтологическое описание для моделирования и разработки программных комплексов (ПК) [2, 3]. Использование микроформатов является дальнейшим шагом в развитии онтологического подхода к формализованному описанию ресурсов. В данной статье рассматривается возможность их использования для формирования и структурирования HTML-страниц, предназначенных для вывода информации в HTA-приложениях, используемых при разработке программных комплексов для исследований теплоэнергетических объектов.

Микроформаты и их назначение. Микроформаты становятся современным новым средством представления данных. Фактически они представляют собой специальные элементы языка разметки, позволяющие закодировать то или иное понятие, наиболее часто встречающееся на Web-страницах. Тем самым появляется дополнительная возможность выявления семантики страниц на HTML или XHTML программными средствами. Уже формируются стандарты на такие семантические фрагменты, например, hCard (для представления контактной информации о людях, компаниях, организациях), hCalendar (календарные даты и события), hReview (обзоры продуктов, услуг, бизнеса) и др. [6, 7]. Вид понятия представляется как определенный класс объектов, понятный для браузера. Основное назначение микроформатов — дополнительная формализация для обеспечения работы поисковых программ и других программ обработки информации, в том числе и для автономных приложений.

Моделирование и разработка ПК с использованием онтологий. Специфика проведения исследований в энергетике связана с моделированием энергетических объектов и требует постоянной разработки нового программного обеспечения (ПО), все более усложняющихся программных комплексов. Основной особенностью ПО, используемого в исследованиях теплоэнергетических объектов, является тесная взаимосвязь его структуры с описанием исследуемой предметной области. Как правило, ПК предназначаются для моделирования и расчетов тепловых электрических станций (ТЭС) или теплоэнергетических установок (ТЭУ). Такие объекты имеют сложную структуру, как правило, иерархическую, состоят из большого количества элементов. Алгоритмы математического моделирования базируются на разработках системы декларативного программирования, работы по которой ведутся достаточно давно [4]. Для автоматизации создания моделирующих программ используется комплекс СМПП-ПК [5], с помощью которого можно автоматически генерировать программу расчета сложной ТЭУ по информации об элементах и связях технологической схемы. С использованием этого комплекса выполняются многочисленные оптими-

зационные исследования теплосиловых систем различных типов. Происходит постоянное развитие методик расчетов и усложнение исследуемых объектов, что требует современных подходов к моделированию ПО, в частности, базирующихся на концепции MDA (Model Driven Architecture — архитектура, управляемая моделью), предполагающей зависимость структуры разрабатываемого ПО от предметной области.

В ИСЭМ СО РАН для разработки ПК, предназначенных для моделирования ТЭУ и ТЭС используется концептуальная схема ПК, основанная на распространенном паттерне проектирования MVC (Model-View-Controller — Модель-Вид-Контроллер), позволяющем разделить все объекты проектируемого ПК на отдельные группы, каждая из которых отвечает за свой набор функций. Объединение всех вычислительных модулей реализуется на основе HTA-приложения, которое позволяет организовать гибкий расширяемый интерфейс любого вида с помощью возможностей языка сценариев JavaScript или VBscript. HTA объединяют в себе все возможности Internet Explorer — объектную модель, поддержку протоколов, отображают меню, иконки, панели инструментов, заголовки и другую информацию и могут выполняться как любой исполняемый файл (рис. 1).

Моделирование состава конкретного ПК осуществляется на основе описания реальной структуры моделируемой предметной области, например, описания технических объектов ТЭЦ. Иерархическая структура формируется путем создания дерева каталогов, каждый элемент которого содержит данные о том или ином фрагменте общей модели ТЭЦ и его компонентах. В соответствии с этой структурой программными средствами автоматически создается онтологическое описание моделируемой предметной области, которое представляет собой текстовый файл в формате XML.

Сформированная онтология является базой для формирования всей структуры приложения, в соответствии с ней формируется интерфейс на основе HTA, навигационная структура меню с набором основных команд приложения. Каждый элемент навигационной структуры содержит привязку к соответствующему HTML-файлу, который создается в соответствии с потребностями пользователя и особенностями данного компонента, содержит необходимые данные и отображается в рабочем окне (рис. 2). HTML-формат обеспечивает гибкие возможности как для отображения любой необходимой информации, так и для формирования гипертекстовых переходов и связей с другими компонентами приложения.

Использование микроформатов для представления данных на HTML-страницах. Содержимым рабочего окна могут быть разные компоненты — графические схемы (общая схема ТЭЦ, схема группы турбин, схема турбогенератора и др.), числовые данные в виде таблиц значений параметров расчета, текст, рисунки, гиперссылки, элементы управления (поля редактирования, кнопки и др.). Информация в рабочем окне может формироваться динамически в соответствии с текущей выполняемой командой.

При проектировании HTML-страниц, содержащих данные приложения предлагается использовать микроформаты для формализации наиболее часто используемых видов отображаемой информации. В разрабатываемых ПК для теплоэнергетических исследований такой типичной информацией, требующей отображения, являются гиперссылки, простые текстовые фрагменты, графическая информация и таблицы данных.

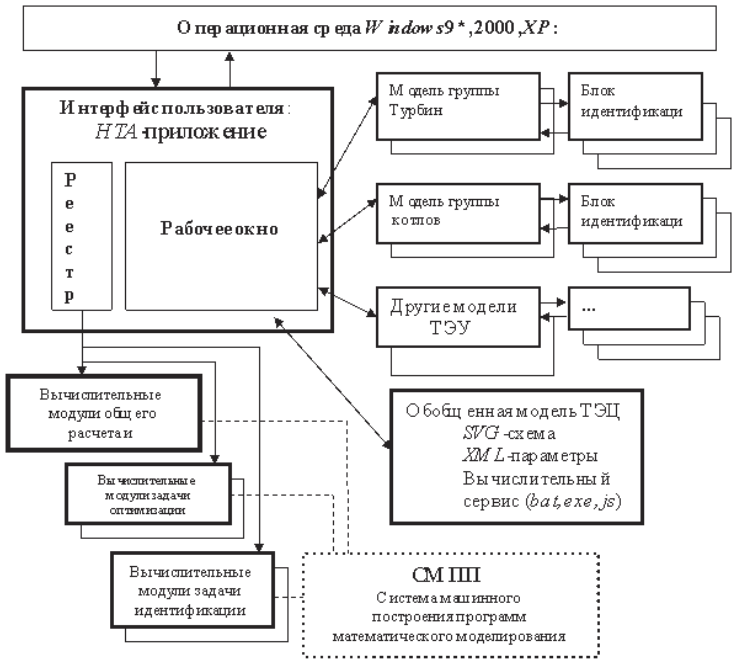


Рис. 1.Структурная схема ПК

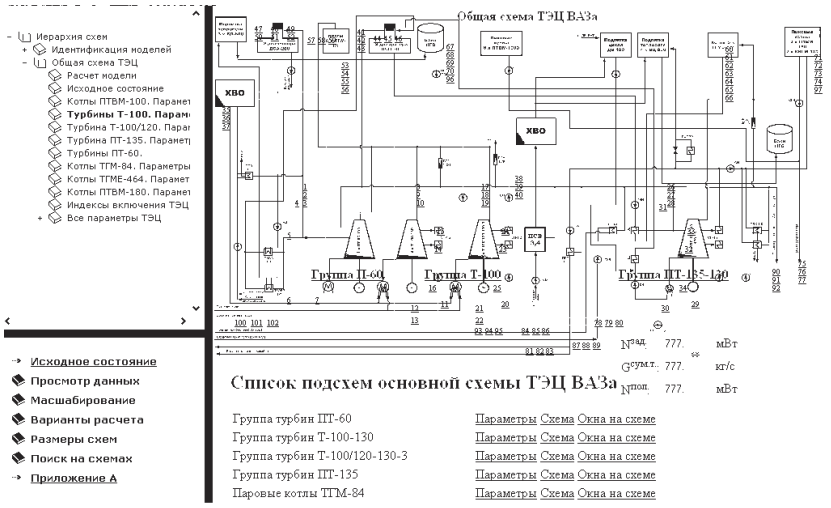


Рис. 2. Фрагмент навигационной структуры и рабочего окна

В Интернет уже получили распространение микроформаты, используемые в ссылках с помощью атрибута **rel**, такие как **rel-directory**, указывающий, что ссылка указывает на директорию или **rel-tag**, показывающий, что ссылка указывает на метку, находящуюся на той же странице. Данные микроформаты показывают связь текущей страницы с той, на которую ссылается. Атрибут **rel** предоставляет широкие возможности для семантического сопровождения страниц, так как для него не существует определенного списка значений и можно использовать произвольные в соответствии с потребностями. Примеры использования на страницах приложения:

1.<link rel="alternate" type="img" title="ТЭЦ" href="img_tec.xml" />.

Данная ссылка описывается с использованием атрибута rel, который указывает, что документ с названием «ТЭЦ» является альтернативным по отношению к текущему, т.е. представляет, например, графическое отображение ТЭЦ.

2.группа турбин Т-100 .

Данное значение атрибута указывает на то, что ссылка является меткой на том же документе.

Существует возможность указывать и обратную связь между страницами с помощью атрибута **rev**. Например, страницы помощи, содержащие подсказки пользователю, целесообразно снабжать ссылками, использующими микроформат, указывающий, что текущая страница является вспомогательной по отношению к той, на которую указывает ссылка для возврата:

возврат на текущую страницу.

Расширяет возможности и использование атрибута class, который может иметь разное назначение : во-первых, для использования стандартным механизмом каскадного стилевого оформления CSS; во-вторых, может быть обработан и трансформирован стандартными средствами XSLT (или специальным программым обработчиком поддержки данного микроформата) для запуска команды операционной системы (типа AT для MS Windows); в-третьих, обладает свойством явной семантической "читабельности" и множественного применения для подготовленного пользователя.

Далее приведен пример микроформата для запуска программного модуля ПК в заданное время [10]:

```
<p class="start">Запуск програм-
много модуля,
 <span class="20080804">4 августа
2008</span>осуществить,
 <span class="193000">19:30</span>.
 </p>.
```

Спецификой разработанного ПК для моделирования ТЭУ являются иерархические связи между моделируемыми объектами, которые необходимо отслеживать. При этом страницы, содержащие графическую информацию, связываются ссылками, обеспечивающими переходы по уровням иерархии, Тот же относится и к страницам, отображающим числовые параметры. По аналогии с универсальными микроформатами можно использовать собственные, дополнительно описывающие, например, взаимосвязи между числовыми и графическими данными одного и того же моделируемого объекта. Возможны и другие варианты использования аналогичных микроформатов, описывающих типовые компоненты представляемых данных, например, для формирования типовых таблиц, содержащих списки редактируемых и не редактируемых параметров и др.

При необходимости работы в WWW распределенные по страницам метаданные в микроформатах могут быть обработаны и представлены в стандартных онтологических форматах OWL (OWL Lite, OWL DL, OWL Full). Ожидается, что ряд стандартных микрофор-

матов и их развитие (например, RDFA, hCard, hCaledar, AtomOWL и др.) будут поддерживаться в стандарте W3C языка HTML версии 5.0.

Заключение. Использование универсальных микроформатов, которые находят все большее применение в Интернет а также разработка собственных мини-структур данных, аналогичных микроформатам, может способствовать лучшему структурированию информации на страницах и обеспечивать дополнительные возможности программной обработки типовых данных для аналогичных страниц и их фрагментов. Разработанная модель ПК является достаточно универсальной, т.к. позволяет создавать программные комплексы для разных предметных областей на основе формализованного описания в виде онтологической модели реальной структуры данных и решаемых задач, включая в свой состав прикладные алгоритмы обработки данных и расчетов, реализованные на разных языках программирования, в виде исполняемых программных модулей. Представление данных в виде HTML-страниц или фреймов с использованием как универсальных, так и специальных микроформатов для формализации типовых компонентов данных, также обеспечивает большую гибкость и возможность динамического формирования данных в зависимости от потребностей пользователя, особенно в случаях совместного использования одних и тех же данных разными приложениями.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Ворожцова Т.Н., Скрипкин С.К. Онтологический подход к моделированию программного комплекса // Вестник ИрГТУ. — 2006. — № 2 (26). — С. 72-78.
2. Ворожцова Т.Н., Скрипкин С.К. Моделирование программно-вычислительного комплекса на основе онтологий // Информационные и математические технологии в науке, технике и образовании / Труды X Байкальской Всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке, технике и образовании». Часть 1. — Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2005. — С. 87-94.
3. Копайгородский А.Н., Массель Л.В. разработка и интеграция основных компонентов информационной инфраструктуры научных исследований // Вест.ИрГТУ. 2006. №2 (26). С. 20-24.
4. Карпов В.Г., Попырин Л.С., Самусев В.И., Эпельштейн В.В. Автоматизация построения программ для расчета схем теплоэнергетических установок // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. — 1973. —№ 1.— С.129-137.
5. Математическое моделирование и оптимизация в задачах оперативного управления тепловыми электростанциями / Клер, Н.П. Деканова, С. К. Скрипкин и др. — Новосибирск: Наука. 1997. — 120 с.
6. Latest microformats news. http://microformats.org
7. Microformat From Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/wiki/Microformats
8. Алексей Копылов. Семантическая сеть, основанная на микроформатах. http://www.gui.ru.copylove/microformats/
9. Юч Огбуджи. Микроформаты в контексте их применения http://www.xml.com/pub/a/2006/04/26/microformats-grddl-rdfa-nvdl.html.
10. Datetime Design Pattern http://microformats.org/wiki/datetime-design-pattern

Козлов В.В.

УДК[556.001.57+574.5.001.57]:51

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ ДИФФУЗИИ РАСТВОРЕННЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ: ИЗМЕНЕНИЕ НАПРАВЛЕННОСТИ ПОТОКОВ И ОЦЕНКА БИОГЕННОЙ НАГРУЗКИ В ПРИДОННОЙ ВОДЕ

1. Введение.

Почти повсеместное обострение экологических проблем в водных объектах делает актуальным исследование возможности для получения количественной величины диффузионного потока растворенных органических веществ из донных отложений [1-3,7,8,11,15-17,20] и оценить его влияние на качество воды водного объекта.

Органические вещества подвергаются биохимической трансформации в водном объекте, сорбируются на взвесях, поступают в донные отложения. Это приводит к уменьшению концентрации в воде органических веществ. С другой стороны это приводит к тому, что донные отложения становятся длительным источником вторичного загрязнения. При этом надо учитывать, что органические вещества подвержены биохимической трансформации, как в воде водного объекта, так и в донных отложениях [2,3,11,15,16].

При оценке и прогнозе процессов распада органических веществ донных отложений, необходимо учитывать величину концентрации растворённого кислорода в придонной воде, которая решающим образом влияет на все процессы биохимической трансформации веществ и скорости этих процессов, и особенно протекающих в условиях большого дефицита растворённого кислорода. В работе [1] дана оценка основных факторов, играющих ведущую роль в изменении интенсивности потребления кислорода донными отложениями (на примере десятилетних наблюдений Можайского водохранилища) в разные сезоны года. При большой изменчивости процесса потребления кислорода донными отложениями отмечена, положительная зависимость от содержания кислорода в придонном (10-см слое воды) во все сезоны года за исключением периодов гомотермии весной и отсутствием устойчивой температурной стратификации в водоёме осенью. Также значимая корреляция интенсивности потребления кислорода с содержанием органического вещества в верхнем слое (0-2см) донных отложений и потреблением кислорода в придонном слое воды. При этом выявлена значимая корреляция интенсивности потребления кислорода донными отложениями с потреблением кислорода в придонном слое воды: так осенью наблюдается прямая зависимость, а летом прослеживается обратная зависимость (т.е. при отсутствии поступления легкоокисляемого органического вещества на дно интенсивность потребления кислорода донными отложениями лимитируется интенсивным потреблением кислорода в придонном слое воды).

1.1. Физико-химическая характеристика донных отложений.

Во взвешенном веществе, сбрасываемом в водные объекты с очищенными сточными водами производств целлюлозно-бумажной промышленности [9], содержится до 35% целлюлозы и до 32% лигнина. Эти трудноокисляемые органические вещества оседают в донных отложениях в виде черной слизистой массы, изменяя естественный состав донных отложений. Продуктами деградации указанных природных полимеров являются токсичные низкомолекулярные органические вещества, попадание которых в водоем приводит к ухудше-

нию его санитарного режима, снижению содержания растворённого кислорода, нарушению биохимических процессов самоочищения.

По данным работы [9], распад регистрируемого по химическому потреблению кислорода (ХПК) крафт-лигнина в сточных водах равен 50% за две недели и 90% за 40 недель. Распад лигнина со стадией отбелки наполовину протекает за одну неделю, а затем ХПК не снижается за 40 недель т.е. практически прекращается распад. Особое беспокойство вызывает наличие в их составе хлорлигнинов. Образуются тысячи хлорорганических веществ, приблизительно 300 из которых были идентифицированы. При этом не менее 97% всего связанного с органическим веществом хлора приходится на неопознанные средне-молекулярные и высокомолекулярные органические вещества, которые разлагаются на хлорированные органические вещества с более низким молекулярным весом, многие из которых являются стойкими токсичными веществами [18,19].

По данным работы [3] органическое вещество донных отложений Байкала обладает относительно высокими запасами легкогидролизуемых форм. Осадки верхнего слоя донных отложений дают в первом гидролизе от 24 до 72% органического углерода, во втором — от 5 до 52%, а в нерастворимом остатке содержание углерода колеблется от 10 до 70%. Отмечается, что важным фактором, определяющим количество легкогидролизуемого органического вещества в донных отложениях, являются условия осадкообразования. При относительно высоких скоростях накопления осадков органическое вещество оседает в донных отложениях, сохраняя при этом способность к биохимическому окислению. Показана пря- мая связь между валовым содержанием орга- нического углерода и абсолютным количеством его легкогидролизуемых форм.

Для оценки допустимой биогенной нагрузки на водоём необходимо знать процесс пространственно временной динамики пятен загрязнения донных отложений на дне водоёмов в районах сбросов сточных вод производств (например: целлюлозно-бумажной промышленности). Анализ показывает, что образуются зоны очень высокого загрязнения (суммарное содержание лигно-гумусовых веществ и целлюлозы в донных отложениях составляет 35 - 40%). Эти зоны антропогенного происхождения достигают в некоторых случаях размеров более 10 - 20 кв. км за 30 — 50 лет работы предприятий[9]. Естественно, что трудноокисляемая органика присутствует в водоёмах и как природный компонент. Даже в олиготрофных водоёмах её содержание может составить несколько миллиграммов в дм^3 [3]. Поэтому поступление ХПК в достаточно большой водоём от сточных вод может быть и не очень существенной в процентном отношении. При этом надо помнить, что в состав комплекса веществ, определяемых по ХПК, входят чужеродные для всех экосистем и трудно удаляемые низкомолекулярные вещества. Трудности организации полноценных натурных наблюдений за такими процессами с целью получения оценки воздействия на экосистему заставляют прибегать к их математическому моделированию [2,7,8,11].

1.2. Постановка задачи.

Донные отложения представляют собой естественную насыщенную водным раствором различных органических и минеральных веществ пористую среду, формирующуюся в водоеме путем последовательного сложения большого количества осаждающихся на дно частиц различных размеров, генезиса и состава. Эта среда ограничено снизу коренным ложем водоема, а сверху — поверхностью раздела с водной толщей - в дальнейшем граница «вода-дно». Границу «вода-дно» для определённости будем считать совпадающей с границей диффузионного концентрационного пограничного слоя [12]. В этом тонком слое («придонная вода» при больших диффузионных числах Пекле), по сравнению с характерными для водного объекта линейными размерами, быстрота изменения концентрации в поперечном к потоку направлении значительно превышает изменения концентрации в продольном направлении.

Поскольку точное количественное описание структуры реальной пористой среды и диффузионного переноса в ней сопряжено со значительными трудностями, при макроскопическом подходе она обычно рассматривается как некоторая фиктивная гомогенизированная среда — континуум. Эффективные параметры данного континуума выбираются таким образом, чтобы обеспечить равенство диффузионных потоков в нем и в реальной пористой среде при равных прочих условиях.

В дальнейшем считаем, что за исключением образования летучих веществ в анаэробных условиях остальные химические реакции, протекающие в двух рассматриваемых условиях, аналогичны. Распад валового органичес-

кого вещества в аэробных условиях рассматривается как реакция первого порядка. Эта относительно простая модель биохимической реакции достаточно точно отражает процесс распада в донных отложениях [16]. Эта модель распада для исходных органических веществ как легкоокисляемых так и трудноокисляемых используется в работах [20], там же описана кинетическая модель регенерации неорганических соединений биогенных элементов в анаэробных (бескислородных) условиях.

В отличие от этого в анаэробных условиях могут протекать реакции двух типов. Кинетика реакций первого типа описывается уравнением Михаэлиса - Ментен, рассматривающим изменение биомассы (функция Моно для концентрации субстрата). Процессы второго типа относятся к реакциям первого порядка характеризующим изменение суммарного содержания летучих веществ. При наличии достаточно большой концентрации субстрата (исходного органического вещества) и при оценке процесса распада в анаэробных условиях будем использовать более простое кинетическое уравнение первого порядка, учитывающее изменение биомассы (вместо уравнения Михаэлиса). В аэробных условиях считаем что, скорость распада растворённого органического вещества пропорциональна содержанию растворённого кислорода [10].

1.3. Описание процесса распада органического вещества. Представим распад органического вещества в донных отложениях, придерживаемся схемы предложенной в работе [11] , как протекающий параллельно и независимо многостадийный гидролиз (распад) нескольких его «кинетических групп», завершающийся образованием неорганических конечных продуктов. Полагаем, что распад отдельно взятой группы удовлетворительно описывается уравнением процесса первого порядка и характеризуется своей константой скорости и исходной концентрацией вещества. Исходное вещество донных отложений (твердое вещество) для отдельно взятой группы и продукты на каждой его стадии распада обозначим , где $i = 0,1,\ldots,n_j$ - порядковый номер вещества (продукта) j - ой группы, а $j = 0,1,\ldots,m$- номер группы. В многостадийном процессе распад $i-1$ - го промежуточного продукта пополняет количество i - го продукта.

Тогда общую схему распада органического вещества донных отложений можно представить следующим:

$$P_{0j} \to P_{1j} \to P_{2j} \to \ldots \to P_{(n_j-1)j} \to P_{(n_j)j} \quad ,$$

где: P_{0j} - исходное органическое вещество j - ой группы, $P_{(n_j)j}$ - конечный неорганический продукт данной группы. Все промежуточные продукты группы образуют растворённое органическое вещество. Тогда $\sum_{j=1}^{m} P_{0j}$ характеризует исходное валовое органическое вещество донных отложений, а величина $\sum_{i=1}^{n_j-1}\sum_{j=1}^{m} P_{ij}$ является суммой растворенных органических продуктов в поровых растворах.

Предполагается, что значительные изменения величины и направления диффузионного потока растворенного органического вещества через поверхность раздела «вода — дно» происходит лишь во время протекания переходных процессов (например: барьерная роль окисленного слоя донных отложений, препятствующая свободному диффузионному обмену растворенными веществами на границе «вода-дно»). Эти переходные процессы обусловлены сменой условий во внешней по отношению к системе «придонная вода — донные отложения» среде. Внешние условия определяют колебания растворённого кислорода в воде водоёма и концентрацию растворенных и взвешенных органических веществ в «придонном слое» воды. Сорбционное равновесие в аэробных и анаэробных условиях устанавливается быстро, и в каждый момент времени текущая концентрация растворённых органических веществ практически равна равновесной (т.к. считаем, что время сорбции — десорбции по сравнению с временем определяющим изменения во внешних условиях пренебрежимо малым). Коэффициент обратимой сорбции удовлетворительно описывается линейным законом Генри и имеет разные значения в верхнем окисленном и нижнем восстановленном слоях донных отложений, а координата границы между слоями является функцией времени.

2. Математическая модель процесса и метод исследования.

Вводится локальная подвижная система координат, жестко связанная с границей раздела «вода-дно». Начало координат совмещено с данной границей, положительная ось 0z направлена вниз, в толщу осадков. Поскольку изменение концентрации на единицу длинны по вертикали в донных отложениях значительно больше изменения величины концентрации по другим направлениям, диффузионный процесс будем рассматривать как одномерный

процесс. В ходе осадконакопления (со скоростью осадконакопления V_{oc}) система координат перемещается вверх параллельно самой себе со скоростью V_{oc}.

2.1. Уравнения молекулярной диффузии в пористой среде.

В случае переменных коэффициентов диффузии, пористости и скорости осадконакопления, с учетом обратимости процессов сорбции и десорбции, для нестационарных процессов при многостадийном распаде в многокомпонентных средах уравнения макрокинетики процессов в донных отложениях, осложненных массопереносом за счет молекулярной диффузии, с обобщением результатов исследований изложенных в работах [7,8,11], запишем в следующем виде:

$$\frac{\partial[G_{ij}(z,t)C_{ij}(z,t)]}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}\left[D_{ij}^{ef}(z,t)\frac{\partial C_{ij}(z,t)}{\partial z}\right]- \quad (1)$$

$$-\frac{\partial}{\partial z}\left[G_{ij}(z,t)V_{oc}(z,t)C_{ij}(z,t)\right]+f_{ij}(z,t)$$

$$i=0,1,\ldots,n_j\ ,\ j=0,1,\ldots,m,\ z\in[0,L],\ t\in[0,T].$$

Соответственно $C_p(z,t)=\sum_{i=1}^{n_j-1}\sum_{j=1}^{m}C_{ij}(z,t)$ - сумма растворенных органических продуктов в поровых растворах, $C_0=\sum_{j=1}^{m}C_{0j}$ - исходное валовое органическое вещество донных отложений. Здесь под $C_{ij}(z,t)$ понимаем концентрацию органического вещества (твердого и растворённого) в пористом осадке выраженного в единицах химического потребления кислорода (мгO_2 / дм$^3_{\text{общ}}$) к единице объёма водонасыщенного пористого осадка. Эффективный коэффициент молекулярной диффузии $D_{ij}^{ef}(z)=D_{ij}^0 p^m(z)$, где $1,3<m<3$. В формулу для эффективного коэффициента молекулярной диффузии входят пористость $p(z)$ и коэффициент молекулярной диффузии D_{ij}^0 растворенного вещества в воде при бесконечном разбавлении [11,14,17]. В работе принято $m=2$.

Поскольку исходное твердое органическое вещество не диффундирует, то $D_{0j}^0=0$ для всех кинетических групп. При значительной скорости сорбционного процесса принимается, что равновесие между жидкой и твердой фазами устанавливается мгновенно и описывается линейной изотермой. Процесс равновесной сорбции описывается функцией $G_{ij}(z,t)=1+K_{ij}^a(z,t)$, где

$$K_{ij}^a(z,t)=\begin{cases}K_{ij}^{a1}, & 0\le z\le z^*(t),\\ K_{ij}^{a2}, & z^*(t)\le z\le L.\end{cases}$$

Здесь $z^*(t)$ толщина (мощность) окисленного слоя донных отложений.

В общем случае функции стоящие в правой части уравнения имеют следующий вид

$$f_{ij}(z,t)=-k_{ij}(z,t)C_{ij}(z,t)+k_{(i-1)j}(z,t)C_{(i-1)j}(z,t)+$$

$$+f_{ij}^0(z,t)$$

и описывает процесс распада органического вещества а также совокупное действие источников — химических реакций, физико-химических и биологических процессов, влекущих за собой изменение во времени концентрации рассматриваемого вещества [9,11]. Скорость распада вещества $k_{ij}(z,t)$ (1 / сут) зависит от содержания растворённого кислорода в донных отложениях и имеет разные значения в аэробной и анаэробной областях донных отложений и «придонной воды». В этом случае константы скоростей многостадийного и многокомпонентного распада веществ $k_{ij}(z,t)$, в зависимости от содержания кислорода (положения границы окисленного слоя осадков) в донных отложениях запишем в виде:

$$k_{ij}(z,t)=\begin{cases}k_{ij}^p C_k(z,t), & 0\le z\le z^*(t),\\ k_{ij}^p\beta_{ij}, & z^*(t)\le z\le L,\end{cases}$$

$$i=1,2,\ldots,n_j-1\quad j=0,1,\ldots,m,$$

$$k_{0j}(z,t)=\begin{cases}k_j^0, & 0\le z\le z^*(t),\\ k_j^0\beta_j^0, & z^*(t)\le z\le L,\end{cases}\quad j=0,1,\ldots,m.$$

где $C_к(z,t)$ концентрация растворённого кислорода в донных отложениях, а безразмерные коэффициенты β_{ij},β_j^0 учитывают разницу в скоростях процессов в аэробных и анаэробных условиях (в реальных условиях для исходного вещества донных отложений пресноводных водоёмов существует приближенная оценка $\beta_j^0\approx 0.5$[11]). Для всех конечных продуктов распада скорость распада $k_{(n_j)j}(z,t)=0$ для всех кинетических групп. Для исходного органического вещества в донных отложениях нет положительных источников, следовательно, $C_{0j}(z,t)=0$ для всех кинетических групп.

Плотность полного потока вещества для каждого продукта в донных отложениях вычисляется по формуле

$$F_{ij}^p(z,t)=-\left[D_{ij}^{ef}(z)\frac{\partial C_{ij}(z,t)}{\partial z}\right]+\left[G_{ij}(z,t)V_{oc}(z,t)C_{ij}(z,t)\right].$$

Суммарный поток всех растворённых органических продуктов распада вычисляется по формуле $F^{p}(z,t)=\sum_{i=1}^{n_j-1}\sum_{j=1}^{m}F_{ij}^{p}(z,t)$. Выражение для полного потока через поверхность донных отложений для каждого продукта $F_{ij}^{p}(t)=F_{ij}^{p}(z,t)\big|_{z=0}$ (на границе «вода-дно» определенной выше).

1. Начальное вертикальное распределение концентрации растворенного органического вещества в осадке $C_{ij}(z,t)\big|_{t=0}=\Psi_{ij}(z)$.

Функция $\Psi_{ij}(z)$ находится из решения задачи параметрической идентификации с привлечением экспериментальных данных для стационарной математической модели [8] или методом установления при численном решении системы уравнений (1).

2. На нижней границе (коренного ложа водоема) антропогенного слоя донных отложений с координатой $z=L$ градиент концентрации, равен нулю:

$$\left.\frac{\partial C_{ij}(z,t)}{\partial z}\right|_{z=L}=0.$$

3. Граничное условие на границе «вода-дно» $C_{ij}(z,t)\big|_{z=0}=C_{ij}^{*}(t)$.

Здесь концентрация $C_{ij}^{*}(t)$ находится из решения уравнений качества воды в водном объекте или заданные функции времени, определяющие колебания концентрации вещества на границе «вода-дно».

2.2. Поглощение кислорода донными отложениями.

В отличие от растворённых органических веществ кислород не имеет положительных источников в толще донных отложений. Он поступает в осадки через поверхность «вода-дно». Изменение содержания кислорода в водах придонного слоя неглубокого водоема вызывают сопряженные колебания концентрации кислорода в поровых растворах верхнего слоя осадков. Это влечет за собой изменение во времени глубины проникновения кислорода в донные отложения и окислительно-восстановительной обстановки в них, что не может не отразиться на течении всего комплекса физико-химических процессов в верхнем горизонте осадков.

Диффузионное проникновение кислорода $C_{к}(z,t)$ в донные отложения неглубокого водоема, сопровождающееся его поглощением, скорость которого пропорциональна его текущей концентрации, запишем в следующем виде [7,11]:

$$\frac{\partial C_{к}(z,t)}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}\left[D_{k}^{ef}(z,t)\frac{\partial C_{к}(z,t)}{\partial z}\right]-$$
$$-\frac{\partial}{\partial z}\left[V_{oc}(z,t)C_{к}(z,t)\right]+\Phi_{к}(z,t). \qquad (2)$$

Функция $\Phi_{к}(z,t)$ в правой части уравнения (2) описывает кинетику реакции органических веществ донных отложений с кислородом и в соответствии с законом действующих масс имеет вид [9,11]:

$$\Phi_{k}(z,t)=-\sum_{j=1}^{m}\left(\sum_{i=1}^{n_j-1}k_{ij}^{p}C_{ij}(z,t)+k_{j}^{k}C_{0j}(z,t)\right)C_{k}(z,t),$$

где k_j^k и k_{ij}^p дм$^3_{общ}$ / (мгO_2 ·сут) константы скорости для исходного и растворённого органического вещества донных отложений при аэробном распаде (реакция необратима). Формально константы скорости k_j^0 и k_j^k связаны соотношением $k_j^k=\alpha_k k_j^0 / C_k^{\cdot}$, где поправочный коэффициент $\alpha_k=C_k^{\cdot}/\left(C_k(z,t)\right)_{ever}>1.0$, выражающий отношение растворимости кислорода в воде $C_k^{\cdot}$ к некоторому среднему значению концентрации кислорода в воде при тех же условиях (при атмосферном давлении и заданной температуре). В модели при проведении расчётов принято значение $\alpha_k=1.0$.

Плотность полного потока растворённого кислорода в донных отложениях вычисляем по формуле:

$$F_{k}^{p}(z,t)=-\left[D_{k}^{ef}(z)\frac{\partial C_{k}(z,t)}{\partial z}\right]+\left[V_{oc}(z,t)C_{k}(z,t)\right].$$

1. В начальный момент времени в донных отложениях задано распределение концентрации растворенного кислорода $C_{k}(z,t)\big|_{t=0}=\varphi(z)$.

2. На нижней границе антропогенного слоя донных отложений с координатой $z=L$ градиент концентрации, равен нулю $\left.\frac{\partial C_{к}(z,t)}{\partial z}\right|_{z=L}=0$.

3. На границе «вода-дно» $C_{k}(z,t)\big|_{z=0}=C_{k}^{*}(t)$, где концентрация растворенного кислорода в придонной воде $C_k^{\cdot}(t)$ находится аналогично $C_{ij}^{*}(t)$ или заданная величина.

2.3. Динамика поверхностного окисленного слоя.

Для оценки динамики (мощности) поверхностного окисленного слоя осадков используем следующие положения. На основании экс-

периментальных исследований показано [11] , что под границей окисленного слоя содержание растворённого кислорода в поровом растворе невелико и составляет около $\tilde{C}_{\min} = 0{,}5\ \text{мг}O_2 \,/\, \text{дм}^3_{\text{пор}}$. На основании этого будем считать концентрацию кислорода на нижней границе окисленного слоя, при прочих равных условиях, практически постоянной. Изменение во времени положения в осадке линии уровня, отвечающей данной концентрации, описывает динамику во времени толщины поверхностного окисленного слоя, обусловленную колебаниями содержания кислорода в придонной воде $H(z,t) = C_{\text{к}}(z,t) - p(z)\tilde{C}_{\min} = 0.$

Уравнение для определения скорости движения нижней границы окисленного слоя, приобретает вид:

$$\frac{dz^{\cdot}}{dt} = -\frac{\left.\dfrac{\partial C_k}{\partial t}\right|}{\left.\dfrac{\partial C_k}{\partial z} - \tilde{C}_{\min}\dfrac{\partial p}{\partial z}\right|_{z=z^{\cdot}}}. \qquad (3)$$

Начальное положение $z^*(t)\big|_{t=0} = z_0^*$ определяется по начальному вертикальному распределению растворенного кислорода $\varphi(z)$.

2.4. Численный метод. В общем случае получим краевую задачу (1),(2) для уравнений параболического типа с граничными условиями на подвижных границах (3) (граница раздела «вода-дно» и граница окисленного слоя донных отложений). Для дискретизации по пространственной переменной используется схема с разностями против потока (называемой также схемой с донорными ячейками или разностные уравнения с положительными коэффициентами) для конвективных членов и центральные разности для диффузионной составляющей [4]. Использование принципа замороженных коэффициентов [4] позволяет раздельно решать задачу для распределения концентрации органических веществ и затем определять положение подвижной границы. На каждом интервале времени $\tau = t_{n+1} - t_n$ коэффициенты, входящие в систему дифференциальных уравнений, вычисляются по значениям искомой функции, вычисленной на предыдущем интервале времени. Для полученной задачи рассматривается один из вариантов итерационных методов с Чебышевским набором параметров (известный также под названием метод Ричардсона) [4]. Считаем, что отрезок времени $[T_0, T_1]$ разбит на интервалы (t_{n-1}, t_n), в пределах которых коэффициенты системы удовлетворяют условиям устойчивости и сходимости. За основу численной реализации задачи на интервале времени $\tau = t_n - t_{n-1}$ берется явная схема локальных итераций ЛИ-М [5,6]. Результаты проведенных расчетов для тестовых примеров показали, что эта схема для параболических уравнений молекулярной диффузии с постоянными коэффициентами является устойчивой, имеет первый порядок аппроксимации по времени, порядок аппроксимации по пространству совпадает с порядком аппроксимации оператора задачи [8].

3. Результаты расчетов для донных отложений.

Рассмотрим упрощенную математическую модель (модельный пример для проведения расчетов и получения оценок, который максимально точно отражает реальную ситуацию). Моделируем процесс как однокомпонентный т.к. для исходного вещества донных отложений по оценке проб твердого органического вещества донных отложений в них содержится более 61% лигнинных веществ. Процесс имеет две стадии распада. Рассмотрим исходные данные для проведения параметрической идентификации скоростей процесса распада.

На первой стадии образуются органические вещества с коэффициентом диффузии $D_1^0 = 2.95 \cdot 10^{-6}\, см^2 \,/\, сек\,(25^\circ C)$. Для сравнения: высокомолекулярное вещество миоглобин имеет коэффициент молекулярной диффузии $D_{mio}^0 = 4.4 \cdot 10^{-7}\, см^2 \,/\, сек\,(37^\circ C)$ по данным работы [10].

На второй стадии образуются низкомолекулярные органические вещества, близкие по молекулярной массе к гидрокарбонат-иону. Коэффициент молекулярной диффузии $D_2^0 = 11.8 \cdot 10^{-6}\, см^2 \,/\, сек\,(25^\circ C)$ [11].

Коэффициент молекулярной диффузии для кислорода принят равным $D_k^0 = 23.0 \cdot 10^{-6}\, см^2 \,/\, сек\,(25^\circ C)$ [17].

Задано изменение концентрации кислорода в придонной воде по закону $C_k^{\cdot}(t) = 9{,}02 \cdot (1 + \cos(\pi t \,/\, 30))\ \text{мг} \,/\, \text{дм}^3$ с отсечением значений больших, чем амплитуда колебаний.

Константа сорбции в верхнем окисленном слое в два раза больше величины сорбции в нижнем анаэробном слое для всех продуктов распада $K_i^a(z,t) = \begin{cases} 10, & 0 \le z \le z^*(t) \\ 5, & z^*(t) \le z \le L \end{cases}$. В расчетах принято, что в анаэробных и аэробных услови-

ях скорость распада исходного органического вещества различна и отличается примерно в два раза. Скорость осадконакопления по оценке мощности слоя донных отложений составила примерно 15 мм в год.

По результатам параметрической идентификации определены константы скорости двухстадийного процесса. Константа скорости для твердого органического вещества $k^0 = 0{,}00042\ 1/\text{сут}$, для растворенных органических продуктов - аэробный распад вещества $k_1^p = 0{,}012\ \text{дм}^3/\text{мг}\cdot\text{сут}$, $k_2^p = 0{,}024\ \text{дм}^3/\text{мг}\cdot\text{сут}$ и коэффициент для анаэробного распада $\beta_1 = \beta_2 = 7{,}5\ \text{мг}/\text{дм}^3$. На рис. 1 показано достаточно хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных в пределах погрешностей измерений 10-15%.

Результаты расчетов представленные на рис. 2 показывают, что во время протекания переходных процессов, связанных со сменой окислительно-восстановительной обстановки (изменение концентрации кислорода в придонной воде), значительно возрастает величина суммарного потока растворенных органических веществ (отрицательные значения на графиках: т.к. ось Z направлена в низ) из донных отложений. Первый пик (значительное возрастание потока) связан с наступлением анаэробных условий. Второй пик менее значительный — поступление кислорода в придонный слой воды. При этом суммарная величина вторичного загрязнения водного объекта возрастает. Поглощение кислорода донными отложениями при этом не превышает 100 мг растворенного кислорода на квадратный метр в сутки.

Рис. 3 показывает демпфирующее влияние «придонного слоя воды» (толщиной всего 0,02м) на донные отложения: источник вторичного загрязнения. Величина максимального потока растворенных органических веществ уменьшается примерно в три раза (следовательно, снижается и биогенная нагрузка на водоем). Поглощение кислорода донными отложениями снижается примерно в два раза. Ситуация более наглядно представлена на рис.1, d, где четко видно, что поведение кривых концентраций в поровом растворе и «придонной воде» отличается именно в этом слое. Градиент концентрации уменьшается.

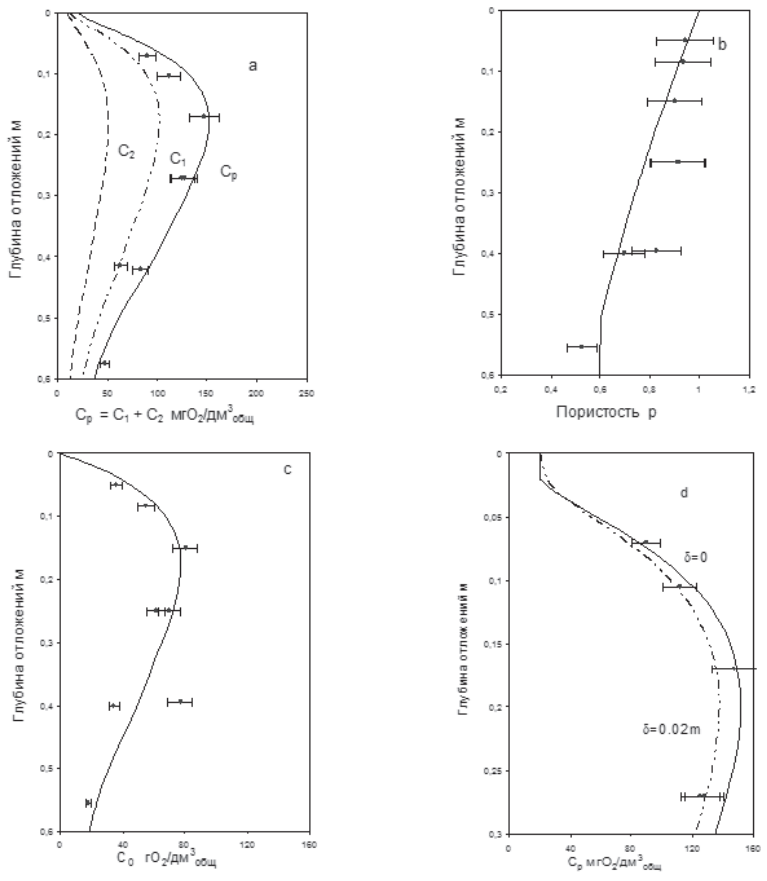


Рис. 1. На графиках (a-d) показано отклонение расчетных (пример модели двухстадийного процесса распада) и экспериментальных данных (относительная погрешность 10-15%) для двух выбранных образцов грунтовых колонок (примерно одинаковых по мощности слоя донных отложений ~ 60-65 см, расстояние между ними ~1200м) взятых в заливе водохранилища [8] На графике (d) дополнительно показано отклонение расчетных от экспериментальных данных, в модели с «придонным слоем»

4. Заключение.

В данной работе с позиций макрокинетики рассмотрены процессы в донных отложениях (естественной водонасыщенной пористой среде с переменной пористостью по глубине осадка) современных водоемов. Получено и исследовано решение задач, описывающих поглощение кислорода донными отложениями, многостадийный распад органического вещества, формирование распределения продуктов распада в поровых растворах. Вместо концепции барьерного окисленного слоя донных отложений, препятствующего свободному диффузионному обмену растворенными

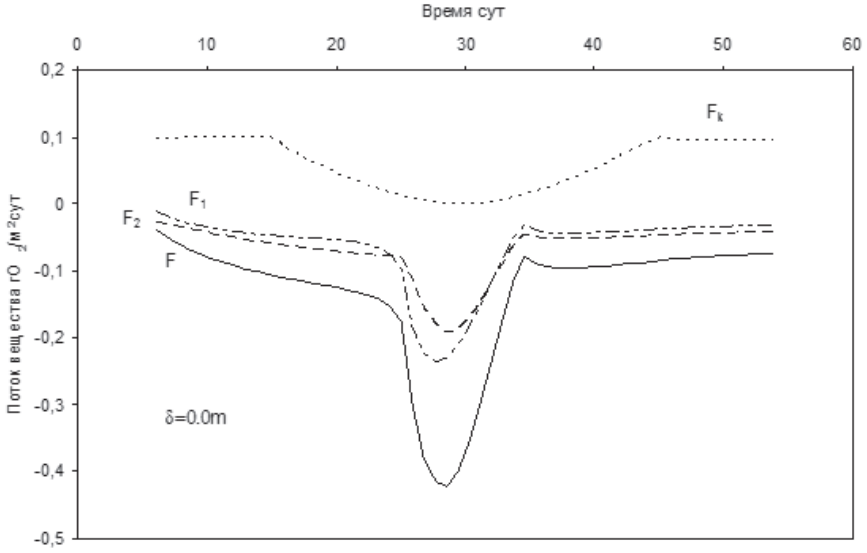


Рис. 2. Величина и направление диффузионных потоков растворенных органических веществ и кислорода на границе донных отложений, толщина придонного слоя воды равна нулю. Расчет выполнен на примере модели двухстадийного распада органического вещества донных отложений

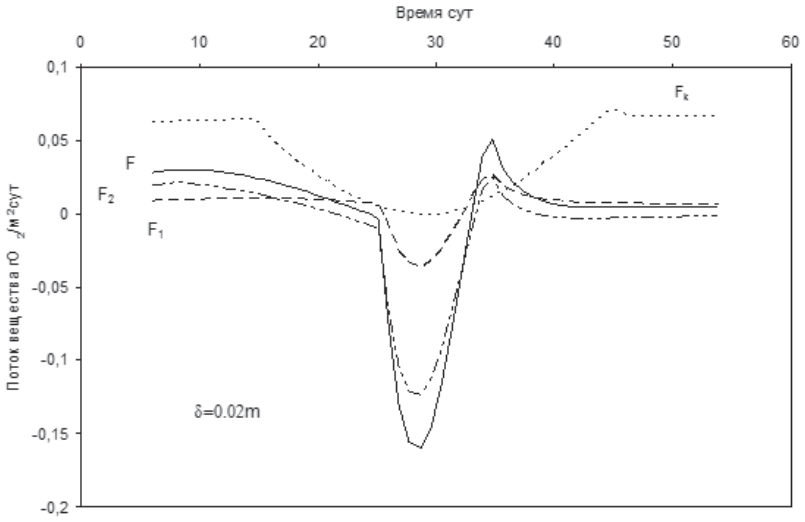


Рис. 3. Величина и направление диффузионных потоков растворенных органических веществ и кислорода на границе «придонного слоя» воды, толщина придонного слоя воды равна 0,02 м. Расчет выполнен на примере модели двухстадийного распада органического вещества донных отложений

веществами с придонными водами, рассмотрено представление о переходных процессах в осадках водоемов с временным катастрофическим дефицитом кислорода. Выполнено описание и исследован процесс формирования диффузионных потоков растворенных веществ, возникающих в осадках неглубокого водоема при квазипериодическом изменении условий на границе раздела «вода-дно» и придонном слое воды. Для получения более достоверной и глубокой оценки возможности (или наличия) вторичного загрязнения, связанного с переходными процессами в современных водоемах, необходимо проводить оценку всего комплекса внешних воздействий на водоём, включая более качественные методы отбора проб придонной воды и донных отложений с ненарушенной структурой. Как показывают результаты расчетов, стационарные модели позволяют провести параметрическую иден-

тификацию и оценить параметры математической модели с привлечением экспериментальных данных. В рамках же нестационарных моделей описывающих переходные процессы необходимо найти такое оптимальное сочетание внешних воздействий, которое позволит достоверно оценить величину максимального потока растворенных органических веществ антропогенного происхождения из донных отложений и оценить максимально возможную биогенную нагрузку на водоём. При дальнейших исследованиях материального обмена в системе «вода-дно» предполагается провести количественные оценки влияния взмучивания и деятельности организмов зообентоса, а также их плотности на поток растворенных веществ, рассматривая их как часть комплекса внешних воздействий на процессы, происходящие в донных отложениях.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Бреховских В.Ф., Вишневская Г.Н., Гашкина Н.А. и др. О сезонной смене приоритетных факторов, определяющих интенсивность потребления кислорода грунтами водохранилища долинного типа. // Вод. Ресурсы. 2003. т.30. №1. С. 61-66.
2. Васильев О.Ф., Воеводин А.Ф. Математическое моделирование качества воды в системах открытых русел. // Динамика сплошной среды. Вып.22, Новосибирск, 1975, С. 73-88.
3. Выхристюк Л.А. Органическое вещество донных осадков Байкала. Новосибирск: Наука, 1980. 80с.
4. Годунов С.К., Рябенький В.С. Разностные схемы. М.: Наука, 1973. 400с.
5. Жуков В.Т. Явно итерационные схемы для параболических уравнений. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. 1993. Вып.4. С. 40-46
6. Зайцев Ф.С., Костомаров Д.П., Курбет И.И. Применение явных итерационных схем для решения кинетических задач. // Математическое моделирование. 2004. Т.16. №3 С. 13-21.
7. Козлов В.В. Разработка и идентификация нестационарной математической модели распространения загрязняющих веществ в водном объекте. // Тр. межд. конф. «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании». Павлодар, 2006. Том I. С. 641-649.
8. Козлов В.В. Разработка и идентификация нестационарной математической модели распространения загрязняющих веществ в водном объекте. Иркутск, 2006. (Препр. РАН. Сиб. отд-ние. ИДСТУ. №1) 46 с.
9. Комплексная переработка отходов производств целлюлозно-бумажной промышленности / Богданов А.В., Русецкая Г.Д., Миронов А.П., Иванова М.А.: Иркутск, Изд-во ИрГТУ, 2000. 227с.
10. Марри Дж. Нелинейные дифференциальные уравнения в биологии. Лекции о моделях.- М.: Мир, 1983.-397 с.
11. Мизандронцев И.Б. Химические процессы в донных отложениях водоемов. Новосибирск: Наука, 1990. 176с.
12. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука. гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. 840 с.
13. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980. 616с.
14. Чизмаджев Ю.И., Маркин В.С., Тарасевич М.Р., Чирков Ю.Г. Макрокинетика процессов в пористых средах (топливные элементы). М.: Наука, 1971. 363 с.
15. Aguilera, D.R., P.Jourabchi, C.Spiteri, and P. Regnier (2005), A knowledge-based reactive transport approach for the simulation of biogeochemical dynamics in earth systems, Geochemistry, Geophysics and Geosystems, 6 (Q07012, doi:10.1029/2004GC000899).
16. Berner, R.A. 1980. Early diagenesis: A theoretical approach. Princeton University Press, Princeton: 256 pp.
17. Lerman, A. 1979. Geochemical Processes: Water and Sediment Environments. N.Y. et al.: Wiley Interscience, p.481.
18. Murray. W.D. and M. Richardson. 1993. "Development of biological and process, technologies for the reduction and degradation of pulp mill wastes that pose a threat to human health." Critical Reviews in Environmental Science and Tachnology. 23(2): 1157-1194
19. Paasivirta, J. 1991. Chemical Ecotoxicology. Lewis Publishers, Chelsea, Michigan, p.127.
20. Regnier, P., P.Jourabchi, and C.P. Slomp (2003), Reactive-transport modeling as a technique for understanding coupled biogeochemical processes in surface and subsurface environments, Netherlands Journal of Geosciences, 82, 5-18.

Корольков Б.П., Корольков П.Б.

УДК 001.18.8

СИСТЕМАТИКА – НЕ ВЕЧНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ, А ВЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ

Журнал «Доклады (Российской) Академии Наук» исключил из рассмотрения статьи по классифицированию и систематике, что может означать одно из двух: 1) непризнание систематики как научного направления; 2) деятельность в этой области считается некоторым эквивалентом «вечного двигателя». Не оценивая первую гипотезу, остановимся на справедливости второй. Под ней можно усмотреть определённый рациональный момент, если принять во внимание почти трёхвековую историю и сложившуюся к началу 21-го века практику развития *биологической* систематики.

В 18-м веке К. Линней ошеломил науку о живых организмах (идущую из глубины веков: Аристотель и др.) предложенной им «системой природы», давшей представление о том, как упорядочить сведения о громадном разнообразии растительного мира. Его идея была немедленно взята на вооружение, распространена на животный мир, а в последующем и на другие царства. Системное видение живой природы, иерархическое её структурирование, таксономическое обособление отдельных групп организмов — всё это открывало радужные перспективы для биологической науки. Многочисленные учёные и научные коллективы принялись за наполнение содержанием предложенной рамочной схемы систематики, которое продолжается по настоящее время, и этой деятельности не видно конца.

Слабая, лишь на уровне идеи, формализуемость биологической систематики, преобладание вербального (описательного) характера таксономии и бесконечные изменения в ранговой иерархии, принадлежности конкретного таксона к той или иной систематической группе, содержания таксонов, нестабильность номенклатуры и т. д. [1-3] — всё это, а также чрезвычайная трудоёмкость и малая перспективность самой систематической деятельности оттолкнули одних исследователей и обеспечили клеймо «вечного двигателя» другим. В смежных областях науки эта ситуация породила скептицизм и апатию в отношении систематики («Если хочешь погубить себя — займись систематикой» - академик Л.И. Мандельштам).

На своём длительном историческом пути систематика делала неоднократные попытки укрепить свою фундаментальную базу и выйти за пределы чистой описательности. Введение Ж.Б. Ламарком учёта фактора историчности существующего биологического разнообразия дало, с одной стороны, существенный импульс систематической деятельности, действующий и в наши дни; с другой стороны, новая возможность породила и хаос сумбурного переплетения систематики и филогении [2, 3]. Количество классификационных работ взлетело до непостижимого уровня, когда разобраться в точках зрения и вариантах всевозможных построений — трудноосуществимая задача. Выходом здесь явилось бы чёткое разделение динамического (эволюция) и стационарного (систематика) аспектов при всей их очевидной взаимосвязанности. Фактическое же смешение — ещё один отталкивающий момент потери ясности.

Большие надежды возлагали на формализацию построения системы с помощью нумерической систематики (таксономического анализа). Отнесение объектов к определённой систематической группе по совокупности выделенных признаков [4, 5] — не лишённая интереса возможность, но к радикальным её отнести нельзя. Разочарование от трудоёмкости и неуниверсальности этого подхода привело, как это часто водится, к саркастическому и уничижительному отношению специалистов [2, 3].

Новую волну надежд биологов на прорыв вербальной блокады систематики породила работа Н.И. Вавилова «Закон гомологических рядов в наследственной изменчивости». Однако эйфория при появлении «своего Менделеева» быстро сменилась очередным разочарованием вследствие нетривиальности извлечения подобных рядов для различных организмов и

их приложения к научной и практической деятельности.

Скромные успехи биологической систематики, трудности на пути создания структурированного разнообразия, сдерживающая реакция научного сообщества, активное отгораживание биологов от остальных наук «уникальностью» объектов живой природы — всё это не способствовало авторитету систематики как научного направления. Больше повезло эволюционному аспекту. Хрестоматийным примером здесь могла бы стать «Периодическая система элементов» Д.И. Менделеева, но её, сугубо эволюционную [6, 7], ошибочно считают образцом *систематики.* В химии были построены и другие ряды эволюции, например, *ряды развития* органических веществ на основе углерода [6].

Ситуация с систематикой и её распространением должна, по нашему мнению, качественно измениться с привлечением концепции синергетики, получившей в конце 20-го века статус нового научного мировоззрения, адекватного непрерывно изменяющемуся миру [8-11]. Синергетика органично вводит в научное познание столь актуальный в наше время междисциплинарный аспект: развитие материального мира происходит спонтанно и единообразно для объектов *любой* природы. Из этого тезиса немедленно следует свойство универсальности всего того, что составляет предмет теории самоорганизации. Биология, как наука о живых организмах, теряет свою гипертрофированную обособленность и вовлекается в единый процесс развития, сохраняя при этом свои специфические черты. Синергетика интегрирует (обобщает) знания в разных областях, приводя их к единому основанию.

Общим признаком *сложных систем* любой природы (живых, косных, искусственных) можно считать их иерархическую организационную структуру. И тогда любой из уровней этой рамочной модели сущего будет служить обобщённым образом того, что есть и что способно к развитию под влиянием внутренних факторов и внешних воздействий. Как философия на качественном уровне, так и синергетика количественно задаёт самые общие закономерности изменений. И та и другая, каждая в рамках своих возможностей, определяет абстрактные модели сложных систем, вносит важнейший вклад в глобализацию познания — универсальность в представление об эволюции сущего.

Связь между эволюцией и систематикой, с точки зрения синергетики, прозрачна: она такая же, как между динамикой процесса развития сложной системы и её квазистационарным состоянием в некоторый фиксированный момент времени. Эта связь формально обеспечивается сечением траекторий исторического (филогенетического) развития, т. е. ветвящегося дерева, плоскостью Пуанкаре и анализом того, что попало в неё. В свою очередь, богатством (разнообразием) объектов любой предметной области как раз и занимается систематика.

Одна из многообещающих возможностей более глубокой формализации в проблемах эволюции и систематики связана с синергетическими свойствами:

а) осуществимости скачкообразных изменений (бифуркационных, сальтационных) под влиянием различных воздействий при наступлении неустойчивых состояний;

б) масштабной инвариантности (скейлинга) иерархической структуры сложной системы на разных уровнях её рассмотрения.

Как отмечено выше, иерархическое представление сложного объекта с целью ухода от «проклятья размерности» использовалось уже Аристотелем и Линнеем, но в каждом случае это была плоскостная матрица — «лестница» рангов разных уровней. Её простота и наглядность подкупает, но на деле охватить сколько-нибудь полно богатство на каждой ступеньке («этаже») такой укрупнённой модели системы не удаётся. По этой причине основное внимание со времён К. Линнея уделяется лишь двум соседним рангам: *вид-род*, с которыми и связана традиция бинарной номенклатуры.

В наших работах [12, 13] сделана попытка более глубокой аккумуляции сведений об объектах природы через переход от плоскостной модели иерархической системы к объёмной, в принципе бесконечномерной, но в первом приближении трёхмерной, сохраняющей свойство наглядности при резком увеличении ёмкости охвата таксонов (или «узелков» развития в модели эволюции). С позиции объёмного представления материального многообразия, а также с учётом темы статьи, сосредоточим внимание на систематическом аспекте анализа развивающегося мира (эволюционному посвящены работы [6, 12]). Для предметности основные положения нашего

подхода будут ниже проиллюстрированы на примере сложного искусственного образования — транспортной отрасли. Её иерархия представлена на рис. 1 в виде традиционного плоскостного таксономического дерева, ранги которого практически совпадают с соответствующей биологической систематикой. Транспорт, как отрасль деятельности человека, является здесь верхним уровнем обобщения. Он включает в себя три *основные* составляющие — транспортные средства, пути и терминалы; каждая подсистема проходит свой путь развития. Итоговую картину на некоторый фиксированный момент времени можно отобразить соответствующей ветвью иерархического дерева.

В рамках статьи из всего разнообразия объектов отрасли рассматривается только подвижной состав железнодорожного транспорта, ветвь которого на плоскостном таксономическом дереве систематики транспортных средств выделена обособленно. Систематика будет ниже целеориентированно развёрнута и привлечена для решения ряда прикладных задач. Подход, выбранный авторами данной работы, позволит решить многие из них простым, долговечным и в то же время единообразным способом.

Математической основой предлагаемой нами объёмной систематики служит дерево (рис. 2). В его узлах помещены *многомерные матрицы*, по осям которых осуществлена необходимая детализация на равноправные структурные единицы. При огромном количестве взаимосвязанных элементов адекватное отображение транспортной системы на соподчинённых рангах должно быть многомерно; таким образом, задаётся вектор построения «естественной системы». Размерность предлагаемой модели какой-либо сферы деятельности ниже ограничена тремя координатами, что обусловлено оптимальным соотношением между наглядностью отображения и количеством информации в нём. В сочетании с матричной формой представления это даёт возможность раскрыть непосредственную взаимосвязь трёх смежных систематических рангов иерархического структурирования. Элементы ранга, т.е. таксоны, обозначаются именами, подбор которых нетривиален. В настоящее время проблема создания уникальной транспортной номенклатуры остаётся актуальной, и решить её возможно на основе международных соглашений.

Итак, в многомерном (трёхмерном) подходе точечное представление таксонов систематики транспорта заменяется матричным. Каждая объёмная матрица объединяет в себе смежные ранги некоторого «трёхэтажного»

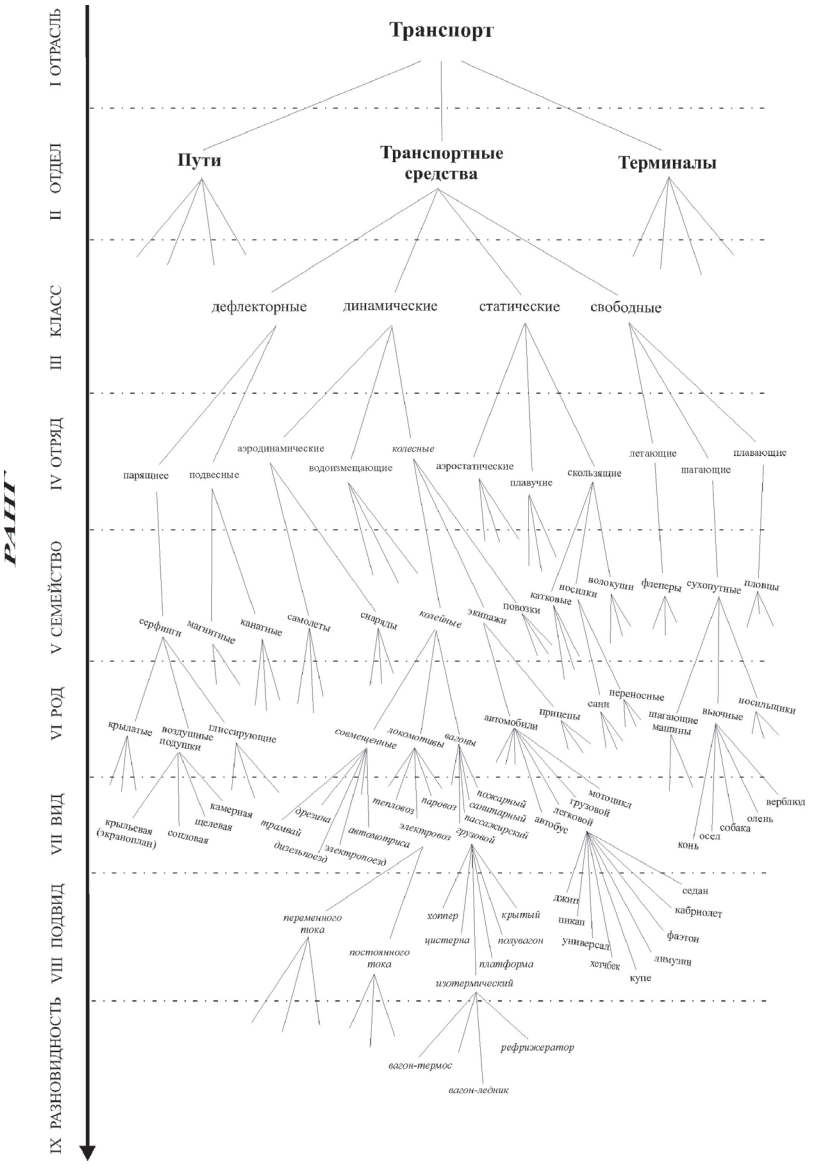


Рис. 1. Плоскостное таксономическое дерево транспортных средств

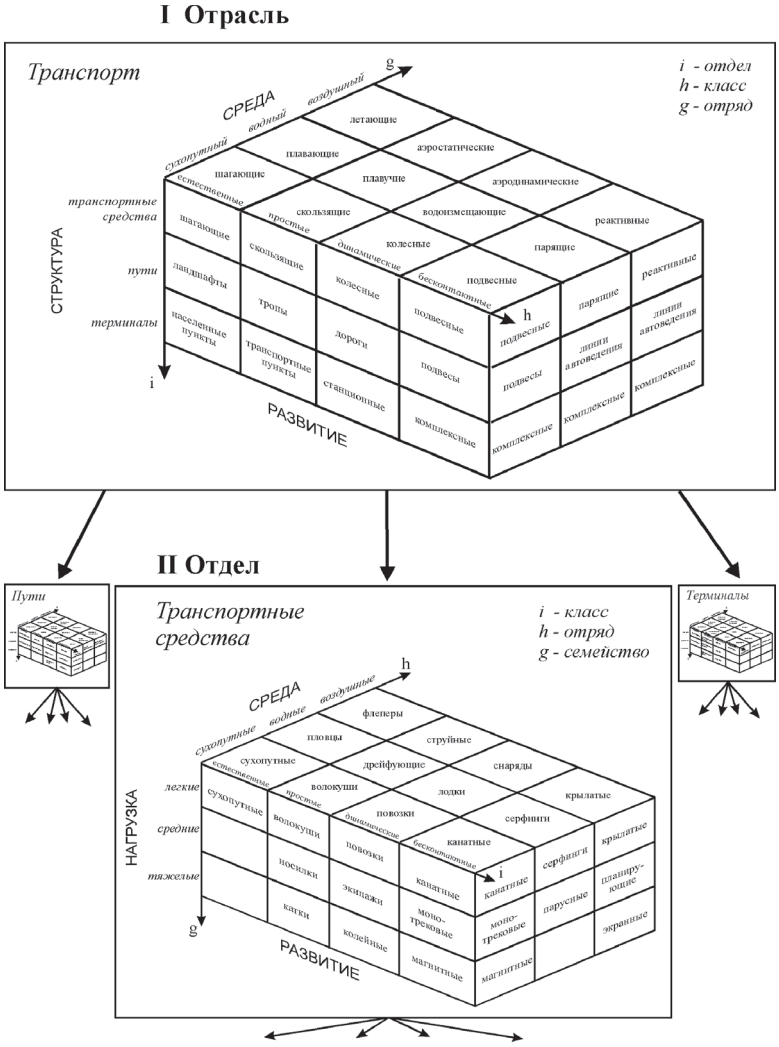


Рис. 2. Трехмерная систематика транспорта

уровня рассмотрения системы. Транспортная система имеет гораздо больше равноправных составляющих, чем приведено значений по каждому из матричных направлений; на наличие и других компонент указывают стрелки по осям. Значения многих ячеек скрыто за лицевыми слоями, но, используя приём сечения матрицы по выбранной оси и координате, удаётся выделить необходимые двумерные *слои.* Сечение исходной матрицы взаимно перпендикулярными плоскостями, дает характерные иерархические *цепочки*, а в предельной ситуации — трёх плоскостей — выделяется желаемый *элемент* уровня.

Вершина ветвящегося графа — дерева транспорта — представлена на уровне I **ОТРАСЛЬ** (см. рис. 2). Необходимая нам матрица, получившая на отраслевом ранге I своё естественное имя *Транспорт***,** образована тремя нижележащими рангами (см. рис. 1). Выделение различных категорий инфраструктуры отрасли внутри горизонтальных слоёв *«ТРАНСПОРТНЫЕ СРЕДСТВА»*, *«ПУТИ»* и *«ТЕРМИНАЛЫ»* привело к появлению трёх новых (дочерних) матриц, берущих начало от материнской матрицы *Транспорт*. В результате такого более детального структурирования появился следующий «трёхэтажный» *уровень* рассмотрения транспорта как отрасли. Он получил название II **ОТДЕЛ**. Структура каждой из его матриц с индивидуальным названием (именем), отвечающим слоям по оси i в исходной матрице I, повторяет материнскую структуру, что, как было отмечено выше, отвечает синергетическому свойству самоподобия материальных систем на любом масштабе их рассмотрения. Ось наиболее крупного из них (ранга III — **Класс)** пометим латинской буквой i; следующий, промежуточный по крупности, ранг (IV — **Отряд**) обозначим как h; наиболее мелкие на данном уровне рассмотрения таксоны ранга V — **Семейство** отложим по оси g. Имена традиционных плоских слоёв, иерархических цепочек и элементарных матриц подобраны так, чтобы придать им вполне определённое смысловое единство.

На новом уровне II, при сохранении обобщённых названий по двум не затронутым делением (декомпозицией) осям каждой из образовавшихся матриц, плоские слои третьей оси i исходной матрицы I после введения обсуждаемой детализации преобразовались из двумерных в объёмные. При этом ось i из категории охвата наиболее крупных таксонов перешла в свою противоположность — наиболее мелких на данном уровне рассмотрения образований. Они были обобщённо названы «*ЛЁГКИЕ*», «*СРЕДНИЕ*» и «*ТЯЖЁЛЫЕ*». Тем самым в объёмную систематику введён нижележащий (пятый) ранг.

Матрицы уровня II **ОТДЕЛ** задают начало своим ветвям пространственного «дерева». Содержание ячеек матриц этого уровня отве-

чает таксонам ранга V — **Семейство**. Избранная нами матрица *Транспортные средства* уровня II снова может быть подвергнута декомпозиции по категориям своей оси i. Эта операция приводит к образованию следующего уровня иерархии III и подключению к двум незатронутым делением рангам (**Отряд** и **Семейство**) нового ранга VI — **Род**.

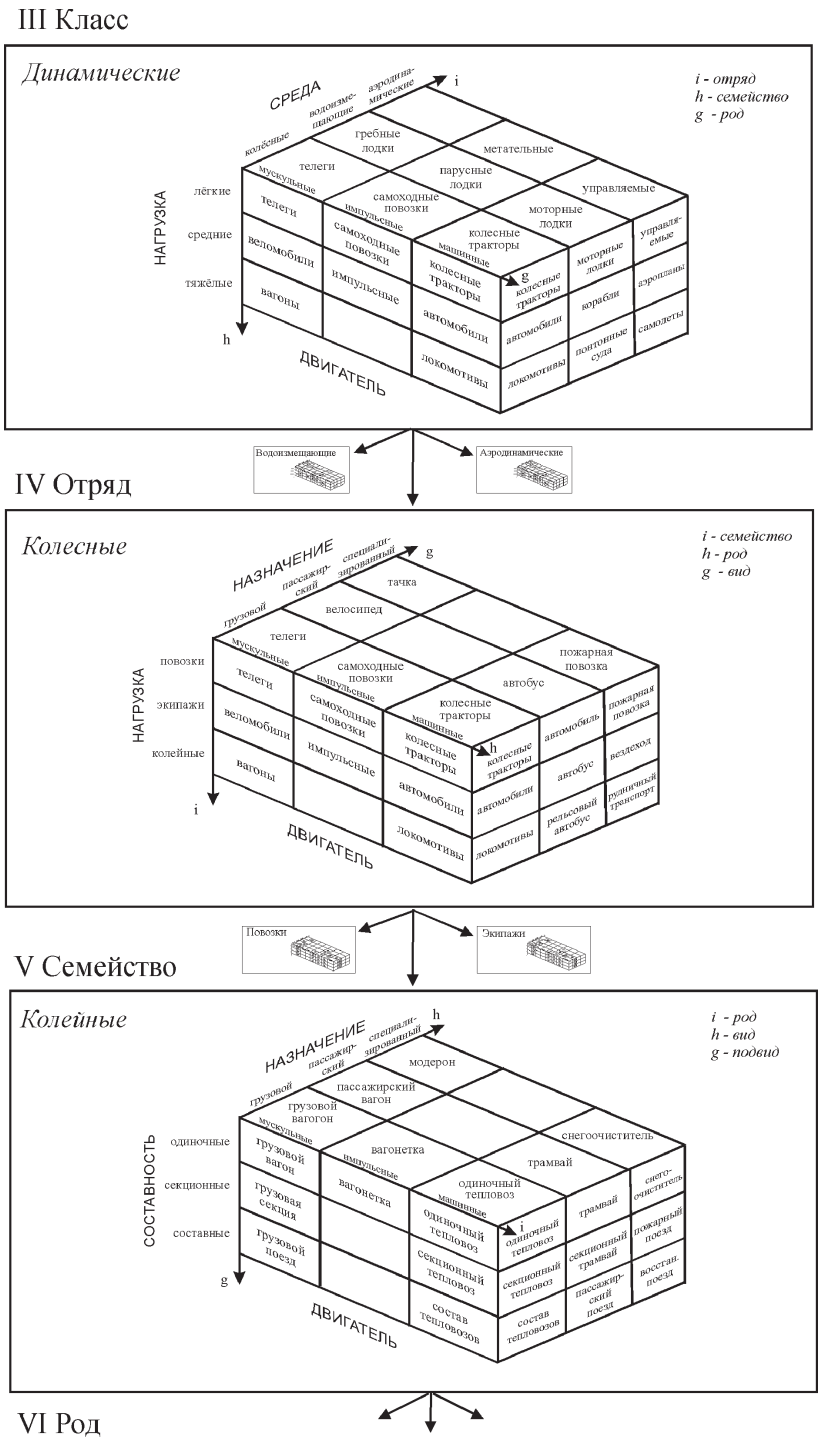


Рис. 3. Ветвь "Динамические транспортные средства"

Формализация в нашей модели связана с введением идентификаторов осей, уровней, матриц и элементов. Графический алгоритм операции *декомпозиции* (дробления) и обратной операции *агрегирования* (укрупнения), описанный в [13], открывает возможность перемещения по иерархическому дереву с одновременной сменой обозначений осей i, h, g таким образом, чтобы на каждом уровне рассмотрения, включающем три «этажа» иерархии, оси i соответствовали бы наиболее крупные ранги, оси h — средние и оси g — мелкие. Чёткое правило преобразования осей (перекодировки рангов) обеспечивает фиксацию местоположения определённого объекта в иерархии и таксономии транспорта с помощью пяти координат (n, m, i, h, g), где n — номер иерархического уровня матрицы, m — номер матрицы на данном уровне, (i, h, g) — место элемента в рассматриваемой матрице.

Последовательное применение алгоритма *декомпозиции* к нижележащим уровням иерархии приводит к интересующей нас ветви дерева «Динамические транспортные средства», изображённой на рис. 3. Здесь выбрано одно из направлений движения от вершины вниз. Последняя из матриц содержит интересующие нас объекты *колейных* (железнодорожных) транспортных средств, но возможна и более глубокая детализация [17].

Обратный процесс *агрегирования*, т. е. перемещения на более высокие уровни иерархии, когда несколько матриц одного уровня образуют одну матрицу той же размерности, что и исходные, но на вышестоящем уровне, может служить тестом правильности преобразований движения вниз при операциях декомпозиции. Однако данный процесс обладает и более ценными возможностями, одна из которых демонстрируется на рис. 4, где осуществлён подъём на более высокую по отношению к уровню **ОТРАСЛЬ** ступень. Здесь

объединены в самоподобную структуру три одноуровневые (отраслевые) матрицы *Транспорт, Промышленность* и *Сельское хозяйство*. Но на продолжении оси i, обозначенном стрелкой, т. е. наиболее общему направлению, дающему самые крупные слои структуры, с равным правом могут располагаться и другие таксоны: *Наука, Культура, Спорт* и т. п. Новая матрица, как ячейка более сложной системы, была названа *Антропосфера*, так как отражает сферу приложения активности человека. Данная матрица объединяет в систему на своём уровне высшие ранги предыдущих систематик (на рис. 4 мы ограничились лишь тремя). Реально антропосфера находится в органической взаимосвязи с разными сферами планеты **Земля**: биосферой, геосферой и др. Так уже первый выход за пределы одной отрасли народного хозяйства (транспорт) показал возможность анализа и других отраслей и сфер посредством перемещения по иерархической структуре и ветвям дерева сколь угодно сложной системы.

Введение многомерности в графическую модель иерархического дерева приводит к системному эффекту эмерджентности, заключающемуся в обретении нового качества — возможности объединения систематик всего сущего. При обнаружении этого уникального свойства — логической взаимосвязи систематик самых разных областей человеческой деятельности — начала просматриваться идея построения *систематики антропосферы*.

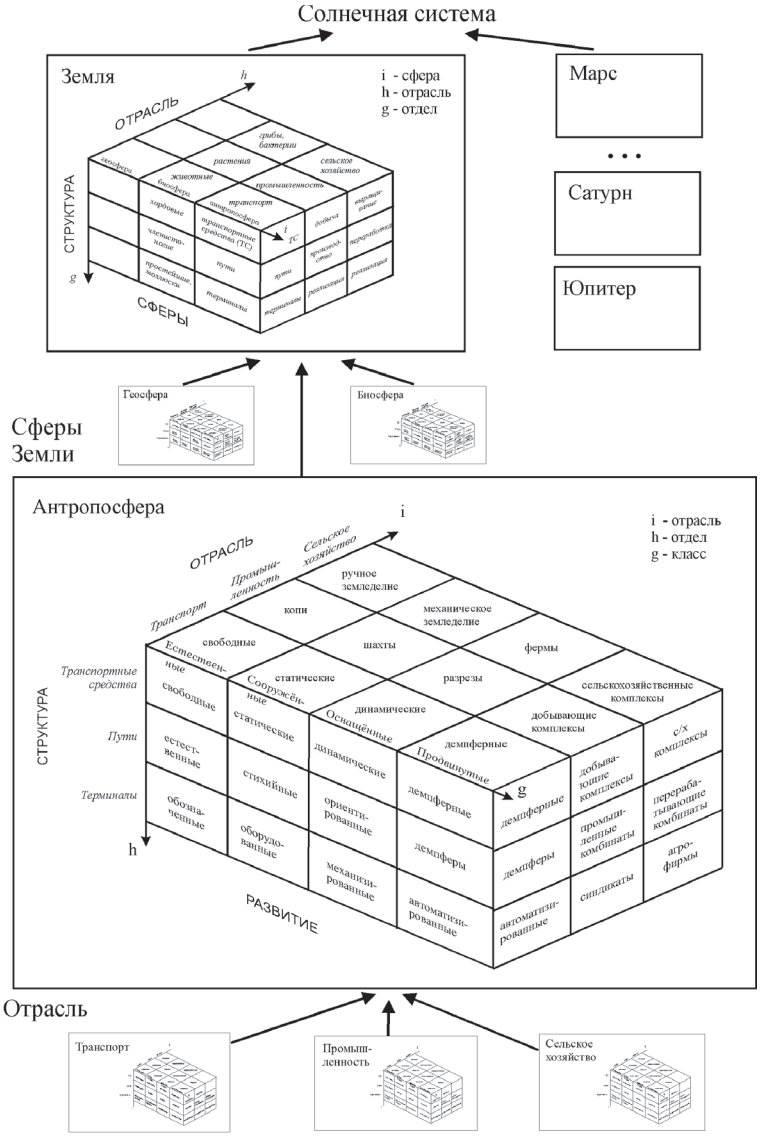


Рис. 4. Иерархическая надстройка дерева систематики транспорта.

В свете новых взглядов на движущие силы развития материального мира [14-16], которые отводят решающую роль влиянию верхних рангов на эволюцию сложной системы, есть смысл продолжить, на основе формализованной операции агрегирования, восхождение по иерархическим этажам к желаемому представлению *метасистем*. На рис. 4 достигнут уровень планеты **Земля**, где равноправные с ней матрицы-планеты — **Марс, Юпитер** и др. образуют уровень **СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ**, а та входит в мегасистему **ГАЛАКТИКА**. Становится очевидным и путь выхода на высший уровень сущего — **ВСЕЛЕННУЮ,** т. е. на Универсум. Системное воздействие на организационную структуру, впервые отчётливо выделенное А.А. Богдановым в его «Тектологии» (1911), в настоящее время оценивается как более сильное, чем филогенетическое и, тем более, дарвиновский естественный отбор через мутации и конкуренцию [14-16].

Надстройка, укрупняющая систематику отрасли, ясно показывает естественный путь прохождения космического влияния на процессы становления многообразия во всех сферах Земли. Таким образом, для крепнущей антидарвинистской концепции подготовлена систематическая почва.

Влияние верхних уровней иерархии распространяется на **все** нижележащие «этажи»

метасистемы, а не только ближайшие. Отсюда выстраивается единообразие побуждающих мотивов развития в материальном мире при сохранении, естественно, и своеобразия, вытекающего из конкретной природы рассматриваемой сложной системы. Становится более понятной универсальность как закономерность, формально фиксируемая синергетикой.

Мы осветили проблему унифицированного построения систематики и проиллюстрировали её решение на примере одной отрасли (транспорта), сузив задачу до систематики железнодорожного подвижного состава [17, 18]. Но пока нельзя указать ни одной другой подобной отраслевой системы, отвечающей в полной мере представленной идее. Их разработка (в случае признания необходимости) потребует значительных, более того — подвижнических, усилий в каждом отдельном случае. И вот тут-то неизбежно встаёт вопрос: а зачем нужна такая систематика и такой ценой? В биологии, понятно, без структурирования и описания живых организмов не обойтись. Поэтому и потребовалась столь длительная и массированная осада проблемы. В других же областях естествознания и техники принято ограничиваться простыми классификационными схемами, решающими частные задачи. На более глубокое освоение отраслевого разнообразия не возникало, похоже, социального (технического) заказа. Представляется, что когда-то всё же следует попытаться сформулировать подобный заказ, предварительно прояснив возможные перспективы использования отраслевой систематики (об этом ниже). Прежде всего, систематика — это не только иерархически выстроенная структура связей и отношений типа равноправия и соподчинения, но и таксономически завершённая, исчерпывающая для конкретных целей наиболее укрупнённая *модель изучаемой системы*. Подобными моделями верхнего уровня общности являются модели философии, синергетики, информатики и т. п. Такие рамочные модели необходимы как нулевое приближение к решению *любой* поставленной задачи, они ориентируют её на тот или иной уровень сложности, дают язык описания и терминологию (номенклатуру) предметной области. Перечисленного (но не исчерпывающего) уже достаточно, чтобы оправдать требуемые усилия по формированию детальной систематики. Ясно, что сказанное звучит не слишком убедительно, нужны хотя бы демонстрационные примеры более органичного, непосредственного решения некоторой прикладной проблемы на базе систематики. В наших работах [17-19] осуществлены первые шаги прикладного характера по использованию сведений непосредственно из отраслевой систематики в задачах

- идентификационного кодирования подвижного состава железнодорожного транспорта;

- создания на базе унифицированного кода *для всего* транспорта единого мирового информационного пространства для организации логистики перевозочного процесса;

- кодирования продуктов сложных отраслей производства — объектов уникального ряда [20], не прекращающих своего жизненного цикла в момент приобретения (как это происходит с изделиями массового спроса, маркируемых штриховыми кодами с целью контроля в сфере распределения).

В основе инвентаризационного шифрования в перечисленных направлениях лежит предложенная нами [17] обобщённая структура 14-разрядного кодового номера, приведённая на рис. 5. В ней в соответствии реалиями рыночной экономики выделены три принципиально разные составляющие:

- *стабильная* систематическая;

- *переменная*, связанная с движением собственности;

	Номер разряда													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Значение разряда	Семейство	Род	Вид	Подвид	Разновидность	Регион мира	Собственник			Номер регистрации в базе данных			Год регистрации	
	I					II				III				

Рис. 5. Обобщённая структура 14-разрядного кодового номера уникального изделия.

- *техническая*, детализирующая до требуемого уровня сведения об изделии. Мнемоническое разделение указанных компонент радикально упрощает использование многоразрядного алфавитно-цифрового кода.

Стабильность *первой части* шифра связана с консервативностью иерархической структуры сложной системы. Цифры, стоящие на начальных пяти позициях, обобщённо кодируют систематические категории конкретной области деятельности. Первый разряд отражает иерархический ранг **Семейство**; конкретно каждое из них маркируется цифрами 0, 1, 2. ..., 9. Вторая разрядная позиция вводит цифру, соответствующую фиксированному рангу **Род**. Подобная привязка осуществляется и для трёх смежных рангов **Вид, Подвид** и **Разновидность**. Таким образом, в обсуждаемом предложении используется лишь средняя часть систематики прикладной области. При необходимости ранговые границы могут быть смещены и раздвинуты в любую сторону.

Задача *второй части* шифра — ввести собственника, который может не раз измениться за жизненный цикл изделия. Здесь предлагается единственной (шестой) позицией выделить *регион мира*, что призвано упростить шифрование фирмы-владельца (на это отводятся три следующие позиции). Разбивка на регионы мира целесообразно производить по уровню их экономического развития, индикатором которого может послужить, например, показатель протяжённости транспортной сети. Для кодирования шестой (и других) позиции шифра можно не ограничиваться десятью цифровыми разрядами, и тогда мы располагаем вариантами 10, 36 и 62 региона мира, добавив к первому десятку по 26 букв латинского алфавита в прописном и (при необходимости) строчном исполнении.

Смысл *третьей части* кода (позиции с 10 по 14) — избавить титульный шифр от значимых для потребителя, но многочисленных технических характеристик, перенося их в электронный каталог собственника и структурировав запись в его Реестре систематическими категориями первой (стабильной) части.

В совокупности все разряды идентификационного шифра призваны задать уникальный (т. е. строго индивидуальный) код изделия, что важно для решения практических задач отслеживание движения собственности в рыночной экономике.

В описанной системе кодирования приняты во внимание легко предсказуемые успехи компьютерных технологий. Уже в настоящее время можно ставить вопрос о создании глобальных (в каждой отрасли) информационных систем (ИС), объединяющих возможности национального уровня. Это могло бы означать появление прообраза «технического интернета», который на начальном этапе обеспечит оперативный уровень движения товаров уникального ряда [20]. Основой построения и взаимодействия национальных и глобальных ИС могут послужить систематические категории соответствующих областей [17]. Внедрение таких ИС — *неотложная задача*, образ же действий в каждой отрасли практически идентичен тем, которые эскизно намечены выше при обсуждении транспортной систематики. В подобной схеме может родиться унификация правил построения отраслевых ИС, что важно в свете концепции стандартизации ISO. Приводимая ниже таблица 1 в качестве примера отображает начальный шаг к решению задачи построения сходных структур и аналогичного наполнения систематик в разных областях антропосферы. Здесь указаны имена вершин и первых однотипных объёмных матриц трёх ветвей деревьев соответствующих отраслей; последующая реализация продемонстрирована выше на примере транспорта.

Перечень возможностей практического использования систематики нельзя считать исчерпывающим. Так для обеспечения нужд бурно развивающихся информационных технологий и интеллектуальных систем во всём мире активно проводятся разработки *баз знаний*. Один из путей осуществления генерации знаний связывают с понятием онтологий [21]. Онтологии — это иерархические концептуальные структуры, обеспечивающие восхождение от конкретных данных к всё более абстрактным. Здесь проглядывает определённый структурный изоморфизм с рамочными моделями иерархических (сложноорганизованных) систем. Но последние в информационном отношении задаются ранговыми категориями систематики. Углубленный поиск может дать выход на объединение возможностей онтологий и систематики.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Корчагин И.А. Систематика высших споровых растений с основами палеоботаники. — СПб: Изд-во СПГУ, 2001. — 696 с.

Таблица 1

Направления в задачах построения сходных структур и аналогичного наполнения систематик

Отрасль	Наименование первых матриц ветвей дерева		
Транспорт	Подвижной состав	Пути	Терминалы
Энергетика	Энергогенерирующе е оборудование	Линии теплотрасс и электропередач	Электростанции (тепло-, гидро-, АЭС и др.)
Растение-водство	Механизмы	Поля	Агро-комплексы
Информатика	Аппаратное и программное обеспечение	Сети передачи данных	Информационные центры
Наука	Научные коллективы	Конференции, книги, журналы	НИИ, университеты
Космос	Ракеты	Траектории, орбиты	Космодромы, орбитальные системы

2. Скворцов А.К. Проблемы эволюции и теоретические вопросы систематики (избранные статьи). — М.: Т-во научных изданий КМК, 2005. — 293 с.
3. Воронин Ю.А. Теория классифицирования и её приложения. — Новосибирск: Наука, 1985. — 232 с.
4. Смирнов Е.С. Таксономический анализ. — М.: Изд-во МГУ, 1969. — 187 с.
5. Корольков Б.П., Комаров А.В. О системе кодирования подвижного состава //Железнодорожный транспорт. — 2004. — № 10. — С. 54-56.
6. Корольков Б.П. Ряды в эволюции структур //Вестник Российской Академии наук. — 1997 —Т. 67. — № 10. — С. 929-935.
7. Иванова В.С. Нелинейная динамика самоуправляемого синтеза наноструктур в физических и биологических системах / В.С. Иванова //Синергетика. Тр. сем. Т. 8. — М.: 2006. — С. 81-89.
8. Волынский А.Л. Самоорганизация материи — универсальное явление природы //Наука в России. — 2002. — № 3. — С. 4-12.
9. Исаева В.В. Синергетика для биологов: вводный курс. — М.: Наука, 2005. — 158 с.
10. Заварзин Г.А. Составляет ли эволюция смысл биологии? //Вестник РАН. — 2006. — Т. 76. — № 6. — С. 522-543.
11. Стёпин В.С. Философия науки. Общие проблемы: Учебник для аспирантов и соискателей учёной степени кандидата наук. — М.: Гардарики, 2006. — 384 с.
12. Корольков Б.П. К проблеме создания универсальной системы эволюции / Б.П. Корольков //Транспорт. Наука, техника, управление. Сб. обзорной информации. ВИНИТИ. — 2002. — № 2. — С.15-18.
13. Корольков Б.П. О построении универсальной систематики //Транспорт. Наука, техника, управление. — 2003. — № 10. — С. 37-44.
14. Черногор Л.Ф. «Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера» как открытая динамическая нелинейная физическая система. (Часть 1). //Нелинейный мир. — 2006. — Т. 4. — № 12. — С. 655-697.
15. Назаров В.И. Старая и новая модели биологической эволюции //Наука в России. — 2007. — № 1. — С. 58-63.
16. Казанцев Ю.В. Связь климата Земли с эволюцией Солнечной системы. — Владивосток: Дальнаука, 2005. — 210 с.
17. Корольков П.Б. Разработка единой системы кодирования подвижного состава железнодорожного транспорта. Автореферат дисс...канд. техн. наук. — Иркутск, 2006. — 24 с. (ИрГУПС).
18. Корольков Б.П., Корольков П.Б. О международной системе кодирования транспорта // Железнодорожный транспорт. — 2006. — № 11. — С. 60-61.
19. Корольков Б.П., Корольков П.Б. Регионы мира в универсальной системе кодирования транспорта // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2006. — №10. — С. 116-123.
20. Корольков Б.П., Корольков П.Б. Проблема универсального кодирования объектов уникального ряда //«Системный анализ в проектировании и управлении». Тр. межд. науч.-практ. конф. Ч.1. — СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. — С. 110-113.
21. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем: Учебник. — СПб: Питер, 2001. — 384 с.

Узунов В.Г., Дьяченко А.А., Спорыхин М.А., Белов И.А. УДК 681

ПРОГНОЗНЫЙ ПОДХОД В ОЦЕНКЕ НАХОЖДЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ТЕКУЩЕМ СОСТОЯНИИ

В работе [1] авторами был рассмотрен вероятностный подход определения среднего времени нахождения транспортной системы (ТС) в текущем состоянии. Этот подход требует знания функции распределения этого времени с точностью до значений ее параметров, что на практике весьма сложно реализовать. Определённые возможности в этом плане имеют прогнозные подходы. Будем предполагать, что по выбранным параметрам состояний нами накоплены статистические данные в виде временных рядов.

Прогнозирование времени нахождения ТС в текущем состоянии с использованием временных рядов, называемых еще предысторией, обладает хорошими прогностическими свойствами при соблюдении основных условий:

а) прогнозная модель является адекватной по некоторому критерию относительно исходных экспериментальных данных;

б) тенденции в будущем соответствуют тенденциям предыстории.

Если эти условия выполняются, то, как правило, используются экстраполяционные модели на основе регрессионных функций [11, 13, 20]

$$y(t) = \Psi(t,\alpha,\beta,...) + \varepsilon(t), \qquad (1)$$

где $\Psi(t,\alpha,\beta,...)$ - выбранная нами функция с неизвестными параметрами $\alpha,\beta,...$; $\varepsilon(t)$ - нормальный стационарный процесс с нулевым средним, описывающим помеху; $\varepsilon(t) \to N(0,\sigma^2)$. Таким образом, делается предположение и о нормальности ошибки, и об однородности дисперсии во времени. Имея временные ряды $(t_i, y_i, i = 1,...,M)$, M - число измерений, по методу наименьших квадратов оцениваются коэффициенты уравнения регрессии (тренда)

$$\tilde{y}(t) = \Psi(t,a,b,...). \qquad (2)$$

Рассмотрим в качестве примера полиноминальную функцию

$$\tilde{y}(t) = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + ... + a_R \cdot t^R, \qquad (3)$$

где R — степень полинома, $a_0, a_1, ... a_R$ — параметры функции.

Выбор модели (2.37) определяется несколькими причинами, основными из которых являются следующие.

1. Анализ программных средств, содержащих прогнозирование реальных показателей, показывает, что на практике используются самые простые модели, часто уравнение прямой или параболы.

2. Мониторинг безопасности ТС находится в начальной стадии развития, а опыт накопления длинных временных рядов пока незначителен.

3. Модель, высокие аппроксимационные свойства которой получены за счет увеличения ее сложности, зачастую имеет неудовлетворительные экстраполяционные свойства.

Остаточное время предлагается оценивать тремя показателями: а) ожидаемое остаточное время; б) гарантированное остаточное время; в) межконтрольный интервал.. Ожидаемое остаточное время определяется как

$$t_0 = t_K - t_M, \qquad (4)$$

где t_M — время последнего контроля; t_K - корень уравнения

$$\tilde{y}(t) = x_n, \qquad (5)$$

здесь x_n – предельное значение параметра состояния для текущего состояния ТС.

Гарантированное остаточное время можно принять в виде

$$t_\Gamma = t_{np} - t_M, \qquad (6)$$

где $t_{пр}$ определяется из уравнения

$$\tilde{y}(t) + t(mS,\gamma) \cdot s \cdot \sqrt{T_t^T (T^T T)^{-1} T_t} = x_n. \qquad (7)$$

Здесь $\tilde{y}(t)$ — расчетное значение показателя в момент времени t; $t(mS,\gamma)$ — квантиль t-распределения при mS степенях свободы и доверительной вероятности γ; s — оценка среднеквадратического значения ошибки; T — матрица (Мхр) значений параметров безопас-

ности; $p = R + 1$ — число коэффициентов в модели; T_t — строка матрицы значений параметров безопасности, в которой вычисляется прогнозное значение показателя; T_t^T означает операцию транспонирования. Межконтрольный интервал

$$t_u = h \cdot t_\Gamma, \qquad (8)$$

где коэффициент $h = 1$, если прогнозная модель адекватна, и $0 < h < 1$, если модель не адекватна; t_r — гарантированное остаточное время.

Показатель (4) оценивает среднее время нахождения ТС в текущем состоянии; показатель (6) оценивает минимальное время нахождения ТС в текущем состоянии; показатель (8) определяет необходимый интервал контроля параметра безопасности по которому ведется оценка времени нахождения ТС в текущем состоянии.

Так как сформулированные выше условия на практике не всегда выполнимы, в работе рассматривается два метода оценки этих параметров:

1) прогнозирование по однородной информации, когда используется только информация временных рядов по параметрам безопасности;

2) прогнозирование по разнородной информации, когда помимо временных рядов используется информация экспертов о поведении ТС в будущем.

I. Прогнозирование времени нахождения транспортной системы в текущем состоянии по однородной информации. Надежность оценки трех показателей остаточного времени нахождения ТС в текущем состоянии зависит от качества прогнозной модели, которая, в свою очередь, зависит от взаимодействия двух факторов: а) адекватности модели; б) статистически значимой степени полинома среди неадекватных моделей. Таким образом необходимо получить адекватную модель или выбрать среди неадекватных моделей ту, которая имеет статистически значимую степень полинома. В связи с этим возникает задача определения степени полинома.

Используем метод целесообразности включения члена t^R [6], уменьшая степень полинома от максимального значения $R = R_m$, по следующей схеме:

а) назначим $R = R_m$;

б) определим значение статистики

где $S_R = B_R^1 (T_R^1 \tilde{X})$; $S_R^1 = \sum_{i=M^1}^{M} (\tilde{x} - \tilde{y}(t_i))^2$, а

B_R - матрица коэффициентов полинома степени R, вычисленных по методу наименьших квадратов, при этом

$$S^{1_R} = S_R - \Big(\sum_{i=M^1}^{M} x_i\Big)^2 \Big/ m^1.$$

Если $F_p > F_{кр} \rightarrow F(1, mS, \alpha)$, то включать член t^R целесообразно и полином степени R используется для определения показателей остаточного времени. Далее определяются доверительные интервалы коэффициентов полинома. Если $F_p < F_{кр} \rightarrow F(1, mS, \alpha)$, то включать член t^R нецелесообразно.

II. Прогнозирование времени нахождения транспортной системы в текущем состоянии по разнородной информации. Предлагаемый в работе [1]. подход имеет, как преимущества, так и недостатки. В качестве последних отметим следующие.

1. Необходимость значительного объема статистической информации по контролю параметров безопасности.

2. Жесткие требования к главной предпосылке надежного прогнозирования — процесс в будущем должен статистически совпадать с предысторией.

В мониторинге часты случаи, когда сведения о значениях показателя в прошлом ограничены, особенно в период начального накопления данных. Поэтому и первое, но особенно второе требование, не всегда выполняются. В связи с этим, предлагается новый подход для прогнозирования остаточного времени, когда помимо статистической информации дополнительно используются экспертные суждения. В практике такие случаи встречаются, когда используется и статистическая информация, и информация экспертов, что называется прогнозированием по разнородной информации [5,9].

Постановка задачи оценки показателей остаточного времени по разнородной информации. При таком подходе для прогнозирования используется не только статистическая, но и экспертная информация, при этом не требуется наличия большого объема информации. Для оценки коэффициентов модели (3) и выбора наиболее адекватной модели применяется метод линейного программирования. Он заключается в решении для каждой из сравниваемых моделей задачи минимизации критерия соответствия статистическим данным при ограничениях, полученных из экспертных суждений. В результате решения задачи линейного программирования находится

наилучшая из сравниваемых моделей различных степеней. Оценка остаточного времени, включающая расчет ожидаемого и гарантированного остаточного времени, межконтрольного интервала, выполняется аналогично классическому подходу (4, 6, 8). отметим, что прогнозирование по разнородной информации предполагает наличие статистической информации по интересующим нас показателям и экспертных суждений о поведении показателей в будущем.

Статистическая информация по интересующему нас показателю может быть представлена в виде

$$X = (x_i, i = 1,...,M), \qquad (9)$$

где x_i — значение показателя в i-ом измерении, M — число измерений.

Что касается экспертных суждений, то они могут быть могут быть представлены в различной форме. Эксперт может высказывать следующие суждения о значении показателя в будущем:

а) о верхней или нижней границах возможных значений показателя;

б) о связи будущих значений с прошлыми;

в) о монотонном возрастании или убывании значений показателя.

Рассмотрим суждения о верхней или нижней границах возможных значений показателя. Каждое такое суждение может быть представлено в виде

$$\beta\tilde{y}(t) \geq \beta\gamma(t), \qquad (10)$$

где момент времени t и величина г задаются экспертом, $t>t_M$. Параметр в зависит от варианта установки границы: $\beta = 1$, если задается нижняя граница значения показателя ($\tilde{y}(t) \geq \gamma$); $\beta = -1$, если задается верхняя граница значения показателя ($\tilde{y}(t) \leq \gamma$ или $-\tilde{y}(t) \geq -\gamma$). В результате можно получить систему неравенств, составленную из всех экспертных суждений

$$\beta_f \tilde{y}(t_f) \geq \beta_f \gamma_f \ (f = 1,...,F), \qquad (11)$$

где F — число экспертных суждений. Будем считать, что экспертные суждения непротиворечивы, то есть существует хотя бы один вектор параметров модели, для которого выполняются все ограничения экспертов.

Если мы точно не можем задать вид прогнозной модели, то необходимо выбрать несколько альтернативных моделей. В качестве прогнозной модели рассмотрим полиномиальную функцию (3) предполагая решить две задачи: задачу оценки коэффициентов полиномиальной функции и задачу выбора наиболее адекватной модели.

Для определения наиболее адекватной модели необходимо выбрать критерий адекватности. При выборе этого критерия можно основываться как на статистической, так и экспертной информации. Если оценку адекватности модели проводить только на основе статистических данных, то критерием адекватности будет степень соответствия наблюдаемых и вычисленных по модели значений. Учитывая, что число измерений M невелико, такой критерий не будет в полной мере отражать адекватность модели.

Дополнительное использование в критерии согласованности модели с экспертными суждениями позволяет выбрать наиболее точную (адекватную) модель, так как экспертные суждения относятся к периоду упреждения. Чем больше модель соответствует этим суждениям о поведении показателя в будущем, тем она точнее описывает этот показатель (при условии, что эксперт верно оценивает тенденции в будущем). Таким образом, критерий адекватности должен учитывать в большей степени соответствие модели экспертным суждениям, чем результатам наблюдений. В конечном итоге задача сводится к выбору из R моделей (3), удовлетворяющих максимально возможному числу экспертных суждений (11) и минимальному отклонению значений по модели от результатов наблюдений (9).

Альтернативные модели должны, в первую очередь, соответствовать экспертным ограничениям, а затем уже и статистическим данным. Поэтому критерием адекватности может служить функция

$$J(z,a) = \sum_{f=1}^{F} z_f + C\sum_{i=1}^{M} \left| x_i - \tilde{y}(t_i) \right|, \qquad (12)$$

где $z = (z_1,..., z_F)$ — вектор булевых переменных, a — вектор параметров модели, C - некоторая малая величина. Переменная $z_f = 0$, если модель удовлетворяет высказыванию f и $z_f = 1$, если не удовлетворяет. Множитель C используется для того, чтобы модели сравнивались сначала на соответствие экспертным суждениям, а потом на соответствие статистическим данным. Изменяя этот множитель, можно увеличивать или уменьшать роль экспертной информации и статистических данных в этом критерии. Для каждой модели нужно решить задачу минимизации (12) (используется метод минимальных модулей, а не метод наименьших квадратов) при ограничениях

$$\beta_f \tilde{y}(t_f) + Kz_f \geq \beta_f \gamma_f, \quad (13)$$

$$z_f \in \{0,1\},\ f = 1,\ldots,F, \quad (14)$$

где K — некоторое достаточно большое число.

Если модель удовлетворяет f-му суждению, то переменная $z_f = 0$. В этом случае будет выполнено неравенство (14) и минимизирован вклад переменной z_f в величину критерия (12). Если модель не удовлетворяет f-му суждению, то для выполнения неравенства (13) необходимо прибавить к его правой части достаточно большое число K, т. к. переменная $z_f = 1$.

После решения для каждой из моделей (3) задачи минимизации (12) при ограничениях (13) и (14), можно выбрать модель, имеющую наименьшее значение критерия (12).

Для решения вышеизложенной задачи, ее необходимо привести к задаче частично целочисленного линейного программирования. Введем вспомогательные переменные

$$r_i = \begin{cases} x_i - \tilde{y}(t_i), x_i > \tilde{y}(t_i), \\ 0, x_i \leq \tilde{y}(t_i), \end{cases} \quad (15)$$

$$s_i = \begin{cases} \tilde{y}(t_i) - x_i, \tilde{y}(t_i) > x_i, \\ 0, \tilde{y}(t_i) \leq x_i, \end{cases} \quad (16)$$

$$i = 1,\ldots,M.$$

Тогда задача минимизации (12) сводится к задаче минимизации

$$\min_{z_f, a_l, r_i, s_i} \sum_{f=1}^{F} z_i + C \sum_{i=1}^{M} (r_i + s_i), \quad (17)$$

при ограничениях (13), (14) и дополнительных ограничениях

$$\tilde{y}(t_i) + r_i - s_i = x_i,\ i = 1,\ldots,M. \quad (18)$$

$$r_i, s_i \geq 0,\ i = 1,\ldots,M. \quad (19)$$

Решив задачу (17) при ограничениях (13), (14, (18), (19) для каждой модели (3), имеем векторы параметров $a = (a_l,\ l = 0,\ldots,R)$ и значения критерия J (17). Модель, имеющая минимальное значение этого критерия, может использоваться для прогнозирования ожидаемого остаточного времени.

Как уже отмечалось, прогнозирование остаточного времени выполняется так же, как и для однородной информации: сначала определяется ожидаемое остаточное время по формуле (4), затем гарантированное остаточное время по формуле (6) и межконтрольный интервал по формуле (8).

III, Алгоритм определения остаточного времени по разнородной информации. Данный алгоритм состоит из следующих этапов:

1) определение набора альтернативных прогнозных моделей;

2) составление и решение задачи частично целочисленного линейного программирования для каждой модели;

3) выбор наиболее адекватной из рассматриваемых моделей;

4) определение трех показателей остаточного времени.

1. Определение набора альтернативных прогнозных моделей. Возьмем полиномиальные функции (3) с первой по четвертую степень:

$$\tilde{y}(t) = a_0 + a_1 \cdot t,$$

$$\tilde{y}(t) = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2,$$

$$\tilde{y}(t) = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + a_3 \cdot t^3,$$

$$\tilde{y}(t) = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + a_3 \cdot t^3 + a_4 \cdot t^4.$$

Практика показывает, что выбор максимальной 4-й степени вполне оправдано.

2. Составление и решение задачи частично целочисленного линейного программирования. Возьмем первую модель (полином первой степени) и реализуем следующие операции:

а.) Используя экспертные ограничения, составляем систему неравенств (13).

б.) Используя статистические данные, составляем систему уравнений (18).

в.) Составляем систему неравенств для вспомогательных переменных (14), (19):

$$r_i, s_i \geq 0,\ i = 1,\ldots,M,$$

$$z_f \in \{0,1\}, f = 1,\ldots,F.$$

г.) Решаем задачу (17) при ограничениях (13), (14), (18), (19), составленных в п. a,b,c .

В результате находим вектор параметров $a = (a_l,\ l = 0,\ldots,R)$ и значение критерия J (17) для модели (3). Пункты a,b,c,d выполняем для каждой модели из п. 1.

3. Выбор наиболее адекватной из рассматриваемых моделей. Выбираем модель, имеющую минимальное значение критерия J (2.46). Эта модель, принимаемая за наиболее адекватную среди рассматриваемых моделей, и будет использоваться для прогнозирования показателей остаточного времени.

4. Определение остаточного времени. Остаточное время оценивается тремя показателями: ожидаемое остаточное время (4), гарантированное остаточное время (4) и межконтрольный интервал (8).

IV. Апробациця разработанного математического обеспечения. Первичная апробация

созданного математического обеспечения была проведена на машинах роторного типа по вибродонным. Подобный тип машин используется в транспортных системах, например, в системах ветиляции тоннелей, в депо, локомотивах и т.д. Для иллюстрации приведем результаты прогнозирования агрегата «Воздушный компрессор ЦК 135/8». В результате сбора данных в период с 01.10.02 по 01.03.03 были получены значения среднеквадратического значения (СКЗ) виброскорости сигналов, представленные в таблице 1 (число измерений M = 17). Общее СКЗ рассчитано по всему вибросигналу, а СКЗ частей по «коротким» сигналам, полученным разделением во времени исходных вибросигналов на 8 частей.

Прогнозирование остаточного времени по однородной информации. При прогнозировании только по однородной информации, были получены результаты, приведенные на рис. 1 и рис. 2.

На рис. 1 представлено:

1) гипотеза об однородности дисперсий по критерию Кохрена подтвердилась;

2) в качестве прогнозной модели выбран полином второй степени

$$\tilde{y}(t) = 2{,}64997 - 0{,}03212t + 0{,}00026t^2, \qquad (20)$$

со значимыми по t-критерию коэффициентами, но гипотеза об адекватности этой модели по F-критерию не подтвердилась;

3) ожидаемое остаточное время (4) относительно даты 01.03.03 равно 55 дней. На дату 01.03.03 текущее состояние агрегата — допустимо, предельное значение СКЗ равно 7,1 мм/с;

4) гарантированное остаточное время (6) равно 44 дня;

5) межконтрольный интервал (8) равен 35 дней (коэффициент неадекватности выбран 0,8);

Таблица 1

Среднеквадратические значения виброскорости сигналов

Дата	Номер дня	СКЗ общее	СКЗ 1 части	СКЗ 2 части	СКЗ 3 части	СКЗ 4 части	СКЗ 5 части	СКЗ 6 части	СКЗ 7 части	СКЗ 8 части
01.10.02	1	2,511	2,522	2,480	2,376	2,547	2,665	2,334	2,422	2,720
08.10.02	8	2,267	2,096	2,592	2,292	2,077	2,272	2,260	2,061	2,436
18.10.02	18	2,577	2,203	2,274	2,815	2,663	2,658	2,312	2,865	2,729
28.10.02	28	1,908	2,195	1,883	1,493	1,846	1,952	1,564	2,020	2,185
04.11.02	35	2,067	2,410	2,132	2,706	1,412	1,905	2,079	1,765	1,860
10.11.02	41	1,562	1,817	1,740	1,356	1,367	1,612	1,661	1,415	1,457
25.11.02	56	1,950	1,874	2,018	1,656	1,834	1,863	1,873	2,432	1,959
01.12.02	62	1,259	1,044	0,904	1,613	1,483	1,367	0,837	1,234	1,368
11.12.02	72	1,701	1,379	1,989	2,054	1,674	1,875	1,291	1,653	1,536
21.12.02	82	1,515	1,057	1,178	1,621	1,926	1,692	1,410	1,354	1,682
02.01.03	94	2,302	2,326	2,473	2,011	2,233	2,150	2,017	2,468	2,658
14.01.03	106	2,008	2,025	1,881	1,933	2,155	2,053	1,999	2,115	1,887
30.01.03	122	2,611	2,291	2,770	2,424	2,705	2,499	3,137	2,376	2,589
02.02.03	125	2,859	2,650	2,824	3,104	2,853	2,896	2,689	3,121	2,699
11.02.03	134	2,884	2,656	3,044	3,100	2,655	3,109	2,641	2,928	2,886
21.02.03	144	3,218	3,641	3,131	3,040	3,038	3,492	3,125	3,288	2,919
01.03.03	152	3,808	3,607	3,977	3,625	4,129	3,706	3,446	4,232	3,665

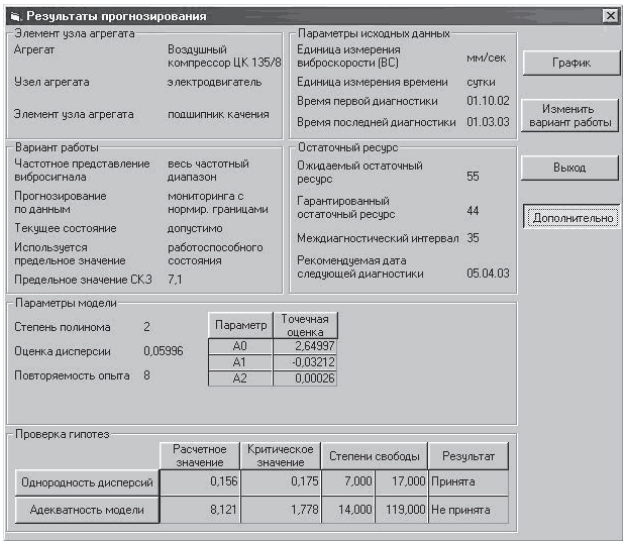


Рис. 1. Результаты прогнозирования

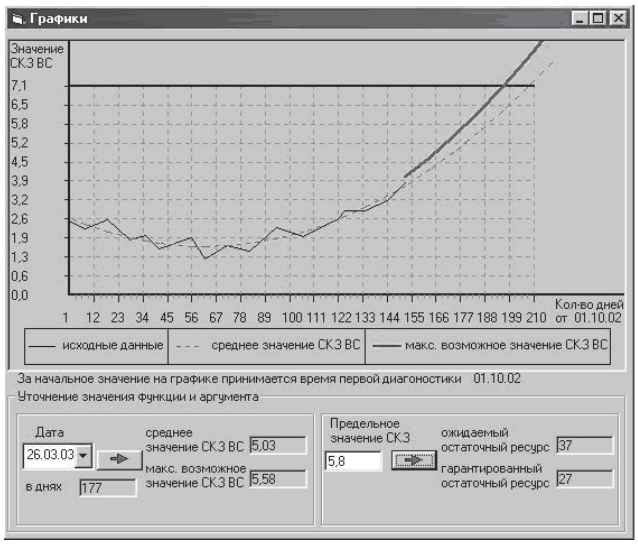


Рис. 2. Графическая иллюстрация

6) время следующей диагностики рекомендуется 05.04.03.

На рис. 2 представлена графическая иллюстрация расчетов. Кроме просмотра графиков, в этом окне существует возможность уточнения значения функции и аргумента. Если ввести значение даты, то можно получить среднее и максимально возможное значения СКЗ виброскорости, соответствующие введенной дате (на 26.03.03 эти значения равны 5,03 и 5,58). Если ввести предельное значение СКЗ виброскорости, то можно увидеть ожидаемое и гарантированное остаточное время (для СКЗ = 5,8 мм/с ООР = 37 дней, а ГОР = 27 дней).

Прогнозирование остаточного ресурса по разнородной информации. В случае однородной информации гипотеза об адекватности модели (20) не подтвердилась, что явилось основанием для приглашения экспертов. Благодаря экспертам стало возможным построить новую прогнозную модель с учетом их мнений. Такой подход может быть назван «прогнозирование по разнородной информации».

Практический интерес представляет рассмотрение двух случаев: 1) эксперты установили ограничение по значению СКЗ на одну дату времени; 2) эксперты установили ограничения на две даты времени.

Случай 1. Эксперты, анализируя исходные данные и учитывая условия работы агрегата в будущем, предположили, что вероятен рост значений СКЗ виброскорости. В качестве контрольной даты выбрана 26.03.03 (177 дней от даты первой диагностики 01.10.02). Ограничение на СКЗ они выбрано - (5,5;6), прогнозное значение по модели (2.49) составляет 5,03 мм/с, что не соответствует суждению экспертов о поведении СКЗ на данный период. Следовательно, необходимо изменить прогнозную модель с учетом их суждения.

Из рассматриваемых полиномиальных функций, выберем полином второй степени, обоснованном на первом этапе. Для разнородной информации при оценке коэффициентов модели необходимо решить задачу частично целочисленного линейного программирования. Решив эту задачу с учетом выбранных ограничений, была получена прогнозную модель

$$\tilde{y}(t) = 2{,}54344 - 0{,}03559t + 0{,}00029t^2, \qquad (21)$$

из которой следует, что:

1) ожидаемое остаточное время (4) равно 46 дней;

2) гарантированное остаточное время (6) равно 34 дня;

3) межконтрольный интервал (8) равен 27 дней;

4) рекомендуемая дата следующего измерения 28.03.03 (на 8 дней раньше, чем при однородной информации).

Графическая иллюстрация данного расчета приведена на рис. 3. В нижней части этого окна приведены дополнительные расчеты СКЗ по дате (26.03.03) и остаточного времени по значению СКЗ = 5,8 мм/с.

Случай 2. В этом расчете сохранено ограничение первого случая, но дополнительно было использовано второе для даты 06.04.03 (188 дней от даты первого измерения). Для второго ограничения значение СКЗ должно

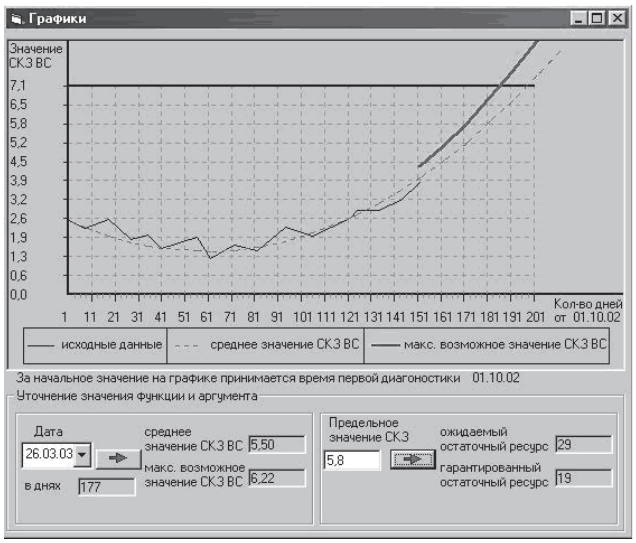


Рис. 3. Графическая иллюстрация, случай 1

находиться в интервале (6,5;7). Решая задачу частично целочисленного линейного программирования с учетом выбранных ограничений, была получена модель

$$\tilde{y}(t) = 2{,}59583 - 0{,}03832t + 0{,}00031t^2, \qquad (22)$$

из которой определяются:

1) ожидаемое остаточное время равно 43 дня;

2) гарантированное остаточное время равно 32 дня;

3) межконтрольный интервал равен 25 дней;

4) рекомендуемая дата следующего измерения 26.03.03 (на 2 дня раньше, чем для первого случая).

Данное исследование показывает, что введение разнородной информации позволяет обосновано изменять сроки ближайшего измерения агрегатов, когда прогнозная модель, полученная по однородной информации нас не совсем устраивает. Определение межконтрольных интервалов весьма важно при проведении мониторинга, когда реализуется стратегия обслуживания оборудования по фактическому состоянию.

1. Таким образом, транспортная система, рассматриваемая как сложная системы, представимая в виде упорядоченной пары: множество подсистем и элементов и множества отношений, позволяет предложить ее формализацию в виде иерархической структуры, содержащей подсистемы, компоненты и базовые элементы. Данная формализация, в свою очередь, позволяет ввести параметры безопасности ТС, которые можно рассчитывать по аддитивной или мультипликативной моделям. Последнее достаточно подробно представлено в работе авторов [22], в которой рассмотрен вероятностный подход определения показателей текущего состояния ТС. Поскольку этот подход требует знания функции распределения времени нахождения ТС в текущем состоянии с точностью до значений ее параметров, что не всегда удаётся, то авторами предлагается методика расчета показателей безопасности экспертным методом. Для определения весовых коэффициентов показателей безопасности предложен метод анализа иерархий, который ориентирован на информацию экспертов с возможностью проверки на непротиворечивость посредством отношения согласованности при высокой строгости дальнейшей математической обработки, базирующейся на методе собственного значения и принципе иерархической композиции. Для получения значений показателей безопасности рассмотрены точечные и интервальные оценки. Интервальные оценки описываются бета-распределением, рассмотрено три варианта создания интервальной оценки в зависимости от информации, которой владеет эксперт.

2. Разработан алгоритм прогнозирования показателей остаточного времени нахождения ТС в текущем состоянии. Остаточное время оценивается тремя показателями: ожидаемое остаточное время (4), гарантированное остаточное время (6) и межконтрольный интервал (8). Показатель (8) оценивает среднее время нахождения ТС в текущем состоянии; показатель (6) оценивает минимальное время нахождения ТС в текущем состоянии; показатель (8) определяет необходимый интервал контроля параметра безопасности по которому ведется оценка времени нахождения ТС в текущем состоянии. Алгоритм прогнозирования показателей остаточного времени нахождения ТС в текущем состоянии создан в двух вариантах:

а) с использованием однородной информации (только статистические данные по предыстории) и метод наименьших квадратов для определения параметров прогнозной модели;

б) с использованием разнородной информации, когда помимо предыстории используется экспертная информация о поведении ТС в будущем; при определении параметров прогнозной модели решается задача частично целочисленного линейного программирования.

3. Разработанный математический аппарат позволяет решать задачу мониторинга транспортных систем и их объектов для обеспечения безопасности функциональной деятельности и оценивать класс текущего состояния ТС, а также выбрать необходимые организационно-технические мероприятия по обеспечению безопасности.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Бешелев С.Д., Гурвич Ф.Г. Математико-статистические методы экспертных оценок. М.: Статистика, 1980. 263 с.
2. Буртаев Ю.Ф., Острейковский В.А. Статистический анализ надежности объектов по ограниченной информации. М.: Энергоатомиздат, 1995. 240 с.
3. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Наука, 1988. 208 с.
4. Галкин А.Г., Ефимов А.В. Надежность и диагностика систем электроснабжения железных дорог. М.: УМК МПС России, 2000. 512 с.
5. Головченко В.Б. Прогнозирование временных рядов по разнородной информации. Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1999. 88 с.
6. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Статистика, 1973. 392 с.
7. Закс Л. Статистическое оценивание. М.: Статистика, 1976. 598 с.
8. Краковский Ю.М., Карнаухова В.К. Методы анализа и обработки данных для мониторинга регионального рынка образовательных услуг. М.: Издательский центр МарТ, 2007. 240 с.
9. Краковский Ю.М. Математические и программные средства оценки технического состояния оборудования. Новосибирск: Наука, 2006. 228 с.
10. Краковский Ю.М., Эльхутов С.Н. Комплексная вибродиагностика оборудования роторного типа // Контроль. Диагностика. 2003, № 8. С. 18-23.
11. Краковский Ю.М., Ситчихина М.В. Прогнозирование остаточного ресурса машин по разнородной информации // Контроль. Диагностика: 2003, № 10. С. 4-8.
12. Краковский Ю.М., Симонов С.В. Программный комплекс гибкого мониторинга роторных машин по виброданным // Контроль. Диагностика. 2002, № 12. С. 51-55.
13. Лукашин Ю.П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования. М.: Статистика, 1979. 254 с.
14. Мониторинг здоровья населения: Теоретико-методологические аспекты / Я.А. Лещенко. Новосибирск: Наука. Сиб. предприятие РАН, 1998. 207 с.
15. Носков С.И., Удилов В.П. Управление системой обеспечения пожарной безопасности на региональном уровне. Иркутск: ИрГУПС, ВСИМВД России, 2003. 151 с.
16. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 320 с.
17. Статистический словарь. М. Финансы и статистика, 1989.
18. Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. Анализ данных на компьютере. М.: Финансы и статистика, 1995. 384 с.
19. Холлендер М., Вульф Д. Непараметрические методы статистики. М.: Финансы и статистика, 1983. 518 с.
20. Четыркин Е.М. Статистические методы прогнозирования. М.: Статистика, 1975. 183 с.
21. Явленский К.Н., Явленский А.К. Вибродиагностика и прогнозирование качества механических систем. Л.: Машиностроение, 1983. 239 с.

Бусыгин В.П.

УДК 330.101

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ПОСЛЕ ДВУХ РЕВОЛЮЦИЙ

Развитие экономики в первой половине прошлого века можно рассматривать как поиск должного компромисса между широтой (многообразием как обсуждаемых социально-экономических феноменов, так и подходов к их анализу) и строгостью (методов такого анализа). Так, в течение первых десятилетий были достаточно широко распространены эволюционные подходы к анализу, эволюционные метафоры, раздавались призывы использовать «биологические, а не механические аналогии», придерживаться стандартов биологической науки и т.д. (см. подробнее, С. Боулс, Г. Гинтис [1], Р. Нельсон, С. Уинтер [3], Minski), подходы институциональной экономики. Но постепенно эти нестрогие подходы и приемы анализа широких (и не всегда четко очерченных) классов социально-экономических взаимодействий уступили место неоклассическому подходу (варианту экономической теории) и прежде всего теории общего равновесия, формализованным методам анализа идеализированных конкурентных рынков.

К середине XX века неоклассическая парадигма и, прежде всего, ее вальрасианский вариант становится господствующей в экономической теории. В 50-60 годах прошлого века эта парадигма достигает высокой степени завершенности, а общая теория экономического равновесия фактически оказывается для многих исследователей синонимом экономической теории в целом.

Продуктивность исследований в рамках данной парадигмы (и тем самым, ее привлекательность) в значительной степени определилась характером лежащих в ее основе предпосылок.

Это, прежде всего, рациональность и симметричная информированность экономических агентов:

- альтернативные варианты выбора (действий, поведения) заданы априорно, и точно известны принимающему решение индивиду;

- действия предпринимаются на основе полной и аккуратной оценки всех последствий таких действий (насколько это возможно на основе имеющейся информации);

-оценка этих действий осуществляется на основе экзогенных предпочтений, определенных вне модели; социальные взаимодействия принимают формы контрактов (полных, достаточно простых типа наличных сделок или сделок спот).

Формально индивидуальное поведение характеризуется как решение оптимизационной задачи экономическим агентом, который полностью (или также как и другие участники сделки) информирован.

Институциональные условия представлены в крайне упрощенном виде (права собственности и институты представлены бюджетным ограничением; время -дисконтирующими множителями и не влияет на предпочтения индивида и т.д.).

Возрастающая отдача от масштаба при любой деятельности или отсутствует, или игнорируется. Технологические характеристики производства, характеристики (да и само количество) товаров, четко определены и общеизвестны.

Другими ключевыми предпосылками являются полнота системы рынков, (иногда и совершенная конкуренция), отсутствие издержек сделок, совершенный инфорсмент прав собственности, условий контрактов.

Субъект экономической деятельности при таком, подходе - небольшая модификация Робинзона Крузо с заменой детерминирующей ситуацию выбора природы на цены, на которые (в условиях совершенной конкуренции экономические агенты не оказывают никакого влияния, что предопределяет нестратегический характер их взаимодействий).

Ситуация характеризуется малообъяснимой (и не объясняемой в ее рамках) дихотомией: одни блага (физические) являются редкими, другие блага (прежде всего общественные-институты (прежде всего рынки), информация) являются свободными (см. подробнее, Bowles [6], Stiglitz [12]).

Связь между понятиями общественного блага и экстерналий не была вполне ясной из-за того, что общественные блага отождествлялись с особыми благами, тогда как экстерналий определялись как побочные продукты решений (действий), предпринятых для обеспечения личной выгоды. Оставалось за рамками модели объяснение, почему одни рынки (рынки «обычных» благ) существуют, а другие (рынки экстерналий) - нет. Более того, явные и неявные (подразумеваемые) предположения теории (прежде всего, отсутствие издержек сделок и полная (симметричная) информированность) не позволяли ни понять, ни объяснить отсутствие таких рынков. На противоречивость посылок (явных и неявных), лежащих в основе традиционного неоклассического подхода к анализу экстерналий, обратил внимание Р. Коуз (Coase [7]). В своей работе «Проблема социальных издержек» он высказал убеждение (по-видимому, вслед за Эджвортом), что в отсутствие трансакционных издержек все выгоды от обмена могут быть исчерпаны в рамках прямых переговоров заинтересованных сторон и при отсутствии организованных рынков.

Итак, хотя теория общего экономического равновесия была первой цельной элегантной и, с формально-логической точки зрения, безупречной теорией функционирования системы взаимосвязанных рынков, за упрощенные предпосылки, лежащие в ее основе, пришлось заплатить очень высокую цену. Теория, как основа анализа многих актуальных проблем современности, прежде всего ситуаций, для которых характерны неполнота системы рынков, их несовершенство, отсутствие ключевых институтов, обуславливающих эффективность рынков, оказалась бесполезной.

Оценки этой парадигмы очень различны, даже у ее оппонентов. Одна из самых критичных - оценка С. Боулса и Г. Гинтиса: кружной путь, который проходить было вовсе необязательно (Боулс, Гинтис [1]).

И, тем не менее, теория общего экономического равновесия предложила стандарты (строгости) анализа социально-экономических феноменов, от которых трудно будет отступить даже адептам альтернативных подходов к анализу4.

Так или иначе, к 70-х годам XX столетия на смену вальрасианской парадигмы приходят несколько исследовательских программ, в основе которых лежит отказ от одного или нескольких предположений вальрасианской парадигмы и «эндогенизация» экзогенных переменных (информированности агентов, предпочтений и т.д.). Многие из них остаются в рамках неоклассической парадигмы, для других характерен более радикальный разрыв с базовыми посылками этой парадигмы.

Так, в 70-х годах XX в. формируется новая парадигма (неоклассической) экономической теории. В ее основе - две революции.

Первая из них - «информационная революция», положившая начало информационной экономической теории, постулирующей асимметричную информированность экономических агентов - участников сделок.

Вторая (и связанная с первой) революция в методах анализа социально-экономических взаимодействий - развитие теории игр. Эта теория сделала возможной замену концепции рациональности «изолированного» индивида на концепцию рациональности индивида, стратегически взаимодействующего с другими (равновесие по Нэшу соответствующим образом специфицированной игры). Благодаря развитию теории игр оказалось возможным отказаться от таких посылок анализа, как совершенно конкурентные рынки, от представления институциональных условий взаимодействия экономических агентов в крайне упрощенном виде, характерном для вальрасианской парадигмы. Стратегическое поведение экономических агентов стало рассматриваться в явном виде: они взаимодействуют друг с другом, а не с «природой» или каким-то параметрически заданным окружением. Таким образом, базовой единицей анализа становится контракт, понимаемый прежде всего как однократная двухсторонняя (добровольная ex ante) сделка, выполнение условий которой ex post обеспечивается третьей стороной (обеспечивающей совершенный инфорсмент и не требующих каких-либо затрат со стороны участников сделки).

Эти две революции сделали возможными попытки пересмотреть и другие положения неоклассической парадигмы путем акцентирования неконтрактной природы большей части социальных взаимодействий, растущейотдачи от масштаба, характеризующей различные социальные феномены.

В рамках новой парадигмы нашли свое объяснение многие парадоксы старой парадигмы, например, почему акции, обеспечивающие лучшую диверсификацию рисков по

сравнению с займами, играют более скромную роль в финансировании инвестиций, почему столь распространены «неэффективные» формы контрактных отношений как издольщина и т.д.

Тем не менее, и новая неоклассическая парадигма не преодолела в полной мере указанной выше дихотомии благ; вне рамок анализа часто остается объяснение становления и развития институциональной структуры, правил экономической игры, на что, собственно, и предъявляется заказ при анализе проблем экономического развития, реформирования экономик. Более того, новая неоклассическая парадигма оказалась основанной, как представляется, на еще более сильных предположениях относительно когнитивных возможностей индивида и поэтому - еще более благодатной целью для ее критиков как «неадекватной задаче исследования поведения экономических агентов в экономике как сложной системе» (См., например, Макашова [2]).

Отсюда внимание к различным вариантам эволюционных экономических теорий, возрождение интереса к неоавстрийской экономической школе, к работам Мизеса, Хайека. А в этих работах - прежде всего, к деталям становления рынков и регулирующих их функционирование институтов, развитию экономического порядка и институциональной среды, соотношению между спонтанностью и сознательными, планируемыми действиями, анализу сравнительной эффективности альтернативных институтов, поддерживающих экономическую деятельность, к междисциплинарному характеру исследования.

Однако, и особенно в отечественной литературе, часто эти альтернативные подходы рассматриваются как (во всем) конкурентные неоклассическому. Но так ли это? Точнее, всегда ли это так?

Представляется, что исследования в разных парадигмах скорее комплементарно, чем конкурентно . Поясним это утверждение.

Представляется, что задачи экономического анализа условно можно разбить на две группы:

- анализ работы существующих механизмов координации поведения субъектов;

- анализ изменений таких механизмов.

Как известно, исследования в рамках неоклассической парадигмы преуспели в решении задач первого типа. Более того, хотя последовательная позитивистская позиция («предпосылки теории не имеют значения, важно только то, насколько ее выводы соответствуют фактам») дает «основание» не интересоваться какими бы то ни было обоснованиями поведенческих предпосылок неоклассической парадигмы (гипотезы рационального поведения), наиболее серьезные исследователи в ее рамках рассматривали неоклассические модели как модели редуцированные, предполагая (надеясь), что эти лежащие в их основе поведенческие предпосылки могут получить строгое обоснование в рамках, в частности, эволюционного подхода (то, что называют «оборонительной» стратегией М. Фридмана, которая представлена в его известном эссе по экономической теории, (Friedman [8]).

Ряд исследователей воспринял такую «оборонительную» стратегию как «намек» на позитивную исследовательскую программу (Р. Нельсон, С. Уинтер [3]) и установили условия (правда, достаточно ограничительные), при которых эти предпосылки можно обосновать на основе некоторого процесса эволюционного типа, тем самым сделав эти модели более обоснованными (надежными) инструментами анализа соответствующих ситуаций. Естественно ожидать, что эти условия выполняются в ситуациях достаточно стационарных, повторяющихся, которые и характерны для проблематики неоклассического анализа.

Во многом положение с рациональностью при стратегическом взаимодействии представляется аналогичным. Так, обычная интерпретация действительно базируется на чрезвычайно сильных предположениях относительно когнитивных способностей индивидов, участвующих в стратегических взаимодействиях. Она исходит из того, что такая игра - модель некой ситуации, которая возникает только один раз; не предполагается, что игроки имеют какой-то опыт похожих стратегических взаимодействий, какую-то информацию, кроме информации, представленной всамой игре (правила функции выигрыша, структура информационных множеств и т.д.; по крайней мере, такой опыт и такая информация в явном виде не учитывается в формировании их ожиданий и поведения). Но вполне возможны и другие интерпретации игры, которые можно рассматривать как вариант «оборонительной» стратегии для концепции стратегической рациональности. Так, например, Осборн и Рубинштейн (Osborn, Rubinstein [11]) при написании своего известного учебника по теории игр опирались на следующую интерпретацию

игры, не «перегруженную» чрезмерными требованиями к когнитивным способностям игроков. «Игроки формируют свои ожидания относительно поведения других участников игры на основе информации о том, как ранее «разыгрывалась» эта игра или подобные ей игры». При этом последовательность таких игр («разыгрываний») можно моделировать на основе одной игры только в предположении, что между отдельными играми нет стратегической связи, которое, представляется несовместимым с предположением о рациональном поведении. Более того, как представляется, в рамках такой интерпретации возможно (при известных условиях) дать эволюционное обоснование поведенческой концепции, на которой основана концепция равновесия по Нэшу. Такого рода обоснование предоставляет концепция эволюционно стабильного равновесия. Этот тип равновесия, представляющего исход процесса эволюционного типа (отбора успешных стратегий поведения). Эволюционно стабильное равновесие часто оказывается равновесием по Нэшу предоставляя обоснование (эволюционного типа) для концепции равновесия по Нэшу. Более того, в случае, когда равновесий по Нэшу в игре много (и поэтому концепция такого равновесия теряет свою прогнозную силу, а значит, и привлекательность), идея эволюционно стабильного равновесия может представить программу усиления концепции равновесия, альтернативную традиционным (и имеющим тот недостаток, что предъявляет еще более сильные требования к когнитивным способностям индивидов).

Однако это не всегда так: эволюционно стабильное равновесие может не быть (и в достаточно «типичных» для экономической теории ситуациях) равновесием по Нэшу.

В этом случае две эти поведенческие концепции оказываются конкурентными и выбор между ними должен производиться на основе каких-то эмпирических исследований.

Ниже мы покажем, однако, что прогноз исхода стратегических взаимодействий, который дает концепция эволюционно стабильного равновесия в рассматриваемых ситуациях, представляется неубедительным.

Эволюционно стабильное равновесие модели рентоориентированного поведения Таллока не является равновесием по Нэшу.

Пусть $v>0$ размер (оценка) ренты всеми игроками (пока будем полагать, что рента для всех одинакова).

Ожидаемый выигрыш игрока i:

$$U_i\left(x_1,...,x_N\right)=v\frac{x_i}{x_i+\sum\limits_{j\neq i}^{n}x_j}-x_i,\ i=1,...,n$$

где v - оценка приза игроком i, x_i - расходы (вклад, взнос) или уровень усилий игрока i. Если расходы всех игроков нулевые, то вероятность выиграть в борьбе за ренту для всех игроков одинакова, а ожидаемый выигрыш $U_i\left(0,...,0\right)=\frac{1}{n}v$.

Равновесие по Нэшу в этой игре - профиль стратегий (набор стратегий, по одной для каждого игрока) $\left(x_1^{\cdot},...,x_n^{\cdot}\right)$ такой, что $U_i\left(x_1^{\cdot},...,x_n^{\cdot}\right)\geq U_i\left(x_1^{\cdot},...,x_{i-1}^{\cdot},x_i,x_{i+1}^{\cdot},x_n^{\cdot}\right)$, для любого допустимого x_i.

Равновесие по Нэшу $x_1^{\cdot},...,x_n^{\cdot}$ в этой модели находится как решение следующих задач: $i=1,...,n$:

$$U_i\left(x_1,...,x_i,...,x_N\right)=v\frac{x_i}{x_i+\sum\limits_{j\neq i}^{n}x_j}-x_i\rightarrow\max_{x_i\geq 0}$$

и имеет вид $x_i=x^{\cdot}=v\frac{n-1}{n^{\cdot}}$, $i=1,...,n$.

Совокупные расходы на борьбу за ренту $nx^{\cdot}=v\frac{n-1}{n}<v$, а значит, в такой постановке рента рассеивается не полностью.

Эволюционно стабильное решение. Определения эволюционно стабильного равновесия различаются в зависимости от деталей ситуации, но в данном контексте представляется оправданным такое определение:

эволюционно стабильная стратегия (ESS) - это стратегия x^{ESS}, при которой для каждого j выполнено соотношение $U_j\left(x,x^{ESS},...,x^{ESS}\right)<U_i\left(x,x^{ESS},...,x^{ESS}\right)$ для всех $i\neq j$ и всех допустимых $x\neq x^{ESS}$, где x - стратегия «мутанта», $U_j\left(\cdot\right)$ - ожидаемый выигрыш мутанта, $U_i\left(\cdot\right)$ - ожидаемый выигрыш немутанта. $\left(x,x^{ESS},...,x^{ESS}\right)$ называют эволюционно стабильным равновесием.

Эволюционно стабильная стратегия x^{ESS} является решением задачи $U_1\left(x,x^{ESS},...,x^{ESS}\right)-U_i\left(x,x^{ESS},...,x^{ESS}\right)\rightarrow\max\limits_{x\geq 0}$ для всех i = 2,...,n. Простые вычисления показывают, что эта стратегия имеет вид $x^{ESS}=\frac{v}{n}$, и не совпадает с вычисленной выше стратегией (равновесной по Нэшу). Заметим, что суммар-

ные затраты популяции на борьбу за ренту не зависят от числа участников $nx^{ESS} = v$, а рента полностью рассеивается.

Эволюционно стабильное равновесие не является равновесием по Нэшу (в олигополии Курно).

В симметричном случае прибыль фирмы i:

$$\pi_i(y) = p\left(y_i + \sum_{j\neq i} y_j\right) y_i - c(y_i),$$

где $p(Y)$ - обратная функция спроса на продукцию отрасли и $c(y)$ - функция издержек фирмы (одинаковая для всех фирм).

Равновесная по Нэшу стратегия y (каждой фирмы) - решение задачи

$$p'(Y^*) + p(Y^*) = c'\{y^*),$$

где Y^* - суммарный выпуск отрасли. Очевидно, что $p'\left(Y^*\right) \neq c'\left(y^*\right)$.

Как и выше, поскольку рост выпуска каждой фирмы не влияет «в первом приближении» на ее прибыль, но снижает прибыль каждого конкурента, равновесие по Нэшу не является эволюционно стабильным.

Эволюционно стабильная стратегия (каждой фирмы) y^{ESS} является решением задачи

$$p\left(y_i + \sum_{j\neq i} y_j\right) y_i - c(y_i) -$$

$$-p\left(y_i + \sum_{j\neq i} y_j^{ESS}\right) y_k^{ESS} - c'\left(y_k^{ESS}\right) \to mas.$$

Поэтому $p\left(Y^{ESS}\right) = c'\left(y^{ESS}\right)\cdot Y^{ESS}$ совпадает с объемом выпуска «конкурентной» отрасли (когда как производители и потребители - «ценополучатели» и цена уравнивает спрос и предложение).

Эволюционно стабильное равновесие в ситуации «Трагедия общины».

Предположим, что каждый из m фермеров имеет свободный доступ к общественному пастбищу. Каждый из них выбирает размер своего стада коров $y_i > 0\left(i = 1,\ldots,m\right)$. Все коровы одинаковы, и одна корова дает φ литров молока, причем это количество зависит от размера всего стада $Y = \sum_{i=1}^{m} y_i$, то есть $\varphi = \varphi\left(Y\right)$. Если фермер имеет y_i коров, то он получает от них $y_i\varphi\left(Y\right)$ литров молока.

Пусть $f\left(Y\right) = Y\varphi\left(Y\right)$ - зависимость общего надоя молока со всего стада (как функция от его размера). Предположим, что $f\left(0\right) = 0$, $f'\left(..\right)$ положительна и убывает. Убывание $f'\left(..\right)$ отражает падающую эффективность (истощение луга). Пусть цена молока равна p, стоимость одной коровы равна c, тогда индивидуальная прибыль i-го фермера при данных стратегиях y_{-i} (размере стада прочих фермеров) равна

$$\pi_i\left(y_i, y_{-i}\right) = py_i\varphi\left(y_i + \sum_{j\neq i} y_j\right) - cy_i =$$

$$= p\frac{y_i}{y_i + \sum_{j\neq i} y_i} f\left(y_i + \sum_{j\neq i} y_j\right) - cy_i.$$

Равновесие при свободном использовании луга - это равновесие по Нэшу соответствующей игры, т. е. набор стратегий $\bar{y}_i$, удовлетворяющих следующим условиям:

$$\bar{y}_i \in \arg\max \pi_i\left(y_i, y_{-i}\right).$$

Если же вести выпас как единое предприятие, то оптимальным будет общий размер стада $\hat{Y}$, максимизирующий совокупную прибыль от выпаса

$$\hat{Y} \in \arg\max\left\{f\left(Y\right) - cY\right\}.$$

Предположим, что $m > 1$, и равновесие $\left(\bar{y}_i\right)$ и оптимальный размер стада $\hat{Y}$ существуют. Тогда -

$$\bar{Y} = \sum_{i=1}^{m} \bar{y}_i > \hat{Y},$$

т. е. свободный доступ к общинному пастбищу приводит к избыточному размеру стада. Действительно, условия первого порядка для внутреннего (в смысле $\bar{y}_i > 0 \forall i$) равновесия по Нэшу имеют вид

$$p\left(\frac{\bar{Y} - \bar{y}_i}{\bar{Y}^2} f\left(\bar{Y}\right) + \frac{\bar{y}_i}{\bar{Y}} f'\left(\bar{Y}\right)\right) = c,$$

суммируя которые, получаем

$$p\left(\frac{m-1}{\bar{Y}} f\left(\bar{Y}\right) + f'\left(\bar{Y}\right)\right) = mc.$$

С другой стороны, условия первого порядка для оптимального размера общественного стада $\hat{Y}$ (при $\hat{Y} > 0$) имеет вид

$$p\left(f'\left(\hat{Y}\right)\right) = c.$$

Преобразуя эти два соотношения, получаем

$$m\left(f'\left(\hat{Y}\right) - f'\left(\bar{Y}\right)\right) = (m-1)\left(\frac{f\left(\bar{Y}\right)}{\bar{Y}} - f'\left(\bar{Y}\right)\right) > 0.$$

Поскольку $f'\left(..\right)$ убывает, то $\bar{Y} > \hat{Y}$.

Неоптимальность равновесия объясняется тем, что когда фермер максимизирует свою прибыль, он не учитывает своего влияния на прибыль других. Действительно, воспользовавшись тем, что при $y_i > 0$

$$\frac{\partial \pi_i}{\partial y_j} = p\frac{y_i}{Y}\left(f'(Y) - \frac{f(Y)}{Y}\right) < 0 \text{ при } i \neq j$$

и, учитывая характеристику равновесия

$$\frac{\partial \pi_i}{\partial y_j} = 0,$$

получим, что в точке равновесия выполняется соотношение

$$\sum_{j=1}^{m} \frac{\partial \pi_i}{\partial y_j} = \frac{\partial}{\partial y_i}\sum_{j=1}^{m} \pi_j > 0.$$

Это означает, что фермер мог бы увеличить общую прибыль, сократив свое стадо и используя пастбище менее интенсивно. И наоборот, фермер мог бы, «немного» увеличив размер своего стада, снизить прибыль всех других фермеров. Заметим, что его прибыль при этом в первом приближении не изменилась бы. Т.е. здесь мы имеем тот же эффект, что и в двух других рассмотренных выше примерах.

Таким образом, эволюционно стабильное равновесие и в этой игре не является равновесием по Нэшу. Нетрудно видеть, что в этом случае, однако, в отличие от приведенных выше примеров, эволюционно стабильная стратегия зависит от величины общины:

$$p\frac{f(Y^{ESS})}{Y^{ESS}} = \left(\frac{m}{m-1}\right)c.$$

Продемонстрированный эффект носит весьма общий характер и встречается в ситуациях загрязнения среды, совместного использования всех видов общих ресурсов (дорог, мест отдыха, ...). И во всех этих ситуациях мы будем наблюдать расхождение между (одинаково привлекательными) двумя концепциями равновесия.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. С. Боулс и Г. Гинтис Валърасианская экономическая теория в ретроспективе. Москва: Истоки, ИД ГУ ВШЭ, 2006, С. 301-338.
2. Н. Макашова Эволюционные идеи в экономике: история и современность. Москва: Истоки, ИД ГУ ВШЭ, 2006, С. 6-10.
3. Р. Нельсон и С. Уинтер Эволюционный подход в экономической науке. Москва: Истоки, ИД ГУ ВШЭ, 2006, С. 53-90.
4. Т. Сэндлер Экономические концепции для общественных наук, перевод с английского. Москва: Весь Мир, 2006. - 462 с.
5. Ф. Хайек Контрреволюция науки (Этюды о злоупотреблениях разумом). http: //www.bertarium.ru/bertarium/contrrev.
6. S. Bowls Microeconomics (Behavior, Institution, and Evolution), Russel Sage Foundation, New York, Princeton University Press, Princeton and Oxford, 2004. - 620 c.
7. R. Coase The Problem of Social Cost. - Journal of Law and Economics, 1960, v. 3, No. 1.
8. M. Friedman Essays in Positive Economics. University of Chicago Press, 1953. 511 p.
9. F. Hayek The Use of Knowledge in Society. - American economic Review, 1945, September, vol. 35. pp. 72-86.
10. B. Hehenkamp, W. Leininger, Possajermikov Evolutionary rent-seeking - CESifo Working Paper, No. 620, December 2001. 72 p.
11. M. Osborn and A. Rubinstein. A Course in Game Theory - The MIT Press. 417 p.
12. J. Stiglitz The Contributions of the Economics of Information to Twentieth Century Economics- Quarterly Journal of Economics, 115(4), November 2000, pp. 1441-78.
13. O. Williamson The New Institutional Economics: Taking Stock, Looking Ahead. -Journal of Economic Literature, 38 (3), September 2000, pp. 595-613.

Массель Л.В., Бахвалов С.В., Бахвалова З.А. УДК 378.001.57

ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СУБЪЕКТОВ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО КЛАСТЕРА

Введение. Современная ситуация в области подготовки специалистов характеризуется как разобщенностью учреждений профессионального образования, так и слабыми связями их с организациями-работодателями. Фактически отсутствуют, за редким исключением, устойчивые цепочки «школа - среднее специальное учебное заведение (ССУЗ) - высшее учебное заведение (ВУЗ)». Динамика современной жизни, а особенно динамика развития информационных технологий приводят к тому, что более инерционный учебный процесс не всегда успевает за всеми нововведениями. Результатом является все возрастающее недовольство работодателей качеством подготовки специалистов. В то же время зачастую отсутствуют четкие требования работодателей к квалификации выпускаемых специалистов, и, как следствие, четкие критерии оценки компетенции выпускаемых специалистов.

Проблема усугубляется тем. что современные реалии требуют при оценке компетенции специалистов руководствоваться не только профессиональными стандартами, но и критериями Болонского соглашения, которые включают такие компетенции, как: коммуникация на родном языке, коммуникация на иностранном языке, математические навыки, базовые навыки в естественных науках и технике, навыки в области информационно-коммуникационных технологий, навыки непрерывного обучения, навыки межличностного общения, правовая компетенция, предпринимательские способности.

Таким образом, становится очевидной проблема взаимодействия между учреждениями профессионального образования и организациями-работодателями, которые образуют образовательный кластер. Вместе с тем, организация взаимодействия между субъектами образовательного кластера, подготовки и переподготовки как педагогических работников образовательных учреждений, так и управленческих кадров находятся на начальной стадии своего развития. Это требует активного развития взаимодействия образовательных учреждений для расширения доступности образовательных услуг, предоставления потребителям этих услуг разнообразных образовательных программ, технологий и инструментария обучения, вовлечение и передача в единое образовательное пространство информационных ресурсов образовательных учреждений всех уровней.

Для поиска путей решения названных проблем Иркутским государственным техническим университетом (ИрГТУ) по заказу Федерального агентства образования в 2007 г. был выполнен проект «Разработка и апробация модели сетевого взаимодействия учреждений профессионального образования в интересах работодателей макрорегиона (на примере Дальневосточного и Байкальского регионов)» [1]. В статье рассматривается методологический подход, лежащий в основе выполнения проекта.

Концептуальная модель взаимодействия. На рис. 1 представлена концептуальная модель взаимодействия организаций - работодателей и учреждений образования с учетом научно-технического прогресса. Модель включает два цикла, усиленные обратной связью. Левый цикл иллюстрирует, что используемая практика работы, поддерживаемая имеющимися специалистами, определяет потребности развития, которые формулируются, с одной стороны, как требования к появлению специалистов новых специальностей, а с другой, как новая практика выполнения работ. С появлением новых специалистов и технологий новая практика становится действующей (обратная связь). Правый цикл показывает, что учреждения профессионального образования, которые готовят специалистов, с одной стороны, должны выходить к работодателям с предложениями о подготовке новых специалистов

имодернизировать учебный процесс в соответствии с требованиями работодателей.

Специалисты новых специальностей внедряют современные технологии, обеспечивающие переход к новой практике работы. Со временем новые специальности -заменяют устаревшие специальности в системе профессионального образования. Следует отметить, что эта модель пока является скорее идеальной, но, тем не менее, это то взаимодействие, к которому должны стремиться все участники процесса.

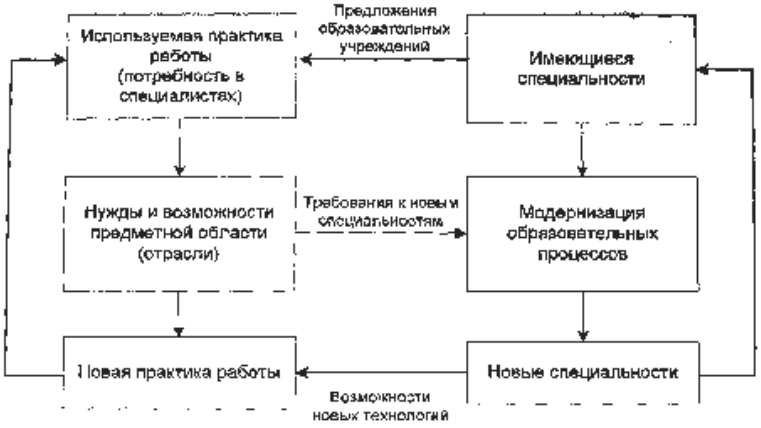


Рис. 1. Концептуальная модель взаимодействия организаций-работодателей и учреждений образования с учетом научно-технического прогресса

Перспективная модель сетевого взаимодействия. В ходе выполнения проекта была проанализирована существующая модель сетевого взаимодействия учреждений профессионального образования, организаций-работодателей и предложена следующая перспективная модель (рис.2), устраняющая недостатки существующей.

В модели выделен образовательный кластер, объединяющий основные типы субъектов информационного взаимодействия. Вне кластера выделены типы координаторов. В соответствии с предлагаемой моделью в зависимости от статуса участника выделяются следующие типы субъектов информационного взаимодействия:

координатор (Минобрнауки России, Рособрнадзор, Рособразование, отраслевые министерства или региональные административные структуры) оказывает управляющее воздействие на систему в соответствии со своими функциями, а также размещает и модифицирует информацию на одном из узлов ядра, является потребителем информации;

- головные вузы и вузы-координаторы осуществляют размещение, модификацию и потребление информации:

вузы регионов размещают (через вуз-координатор) и потребляют информацию;

юридические и физические лица (в первую очередь промышленные предприятия, средние специальные учебные заведения и

Рис. 2. Перспективная модель сетевого взаимодействия учреждений профессионального образования, организаций-работодателей и координаторов

профильные школы) являются потребителями информации.

В основе предлагаемой модели сетевого взаимодействия лежит принцип децентрализованной распределенной сети. В рамках системы взаимодействия выделяется ряд узлов, образующих ядро системы. Каждый узел ядра содержит полную копию информации по всем направлениям обучающего процесса. Все узлы ядра идентичны по своему информационному наполнению.

Предлагаемая перспективная модель сетевого взаимодействия вузов имеет следующие достоинства: высокая отказоустойчивость (при отказе информационного узла ядра системы вся информация остается доступной); многонаправленность передачи ресурсов; возможность легкого доступа к информации для всех участников взаимодействия; идентичность технической реализации для каждого узла (тиражируемость программного обеспечения); масштабируемость (возможность включения в систему взаимодействия новых узлов без перестройки системы); распределение ответственности между узлами за принятие решений по размещению информационных ресурсов, их хранение и предоставление. В качестве трудностей в реализации модели можно отметить следующие: высокие требования к пропускной способности каналов передачи данных в случае интенсивного обмена информацией между узлами; высокий уровень требований к аппаратной части узлов ядра системы; жесткие требования к структуризации (систематизации) информации. Вместе с тем предлагаемая перспективная модель сетевого взаимодействия оптимально соответствует условиям реализации сетевого взаимодействия на основе информационно- коммуникационных технологий вузов-участников.

Фрактальная модель сетевого взаимодействия. В качестве первого этапа решения проблемы взаимодействия организаций - работодателей и учреждений профессионального образования предложено информационное моделирование, а именно разработка фрактальной модели сетевого взаимодействия, которая интегрировала бы ряд информационных моделей, отражающих разные аспекты взаимодействия и информационные процессы в рассматриваемой сфере. Она базируется на фрактальной стратифицированной модели информационного пространства (ФС-модели), предложенной в [2|. ФС-модель графически отображается в силе совокупности вложенных сферических оболочек - слоем, каждый из которых объединят множество однотипных информационных объектов. Каждый слой, в свою очередь, может быть расслоен. Вводятся отображения слоев F (теоретически может быть выполнено отображение из любого слоя в каждый, при условии сохранения инварианта - значимых свойств информационных объектов). Для удобства работы с ФС-моделью представлена вырезка в виде конуса, в котором показаны выделенные слои (рис. 3).

Основные слои ФС-модели, представленные на рис. 3: Si — координаторы процессов подготовки и использования специалистов, S2 - учреждения профессионального образования, S3 - организации-работодатели;. Слой S2, в свою очередь, может быть стратифицирован на слои ВУЗов, ССУЗов, профессиональных училищ (ПУ), школ; слой S3 - на слои промыш-

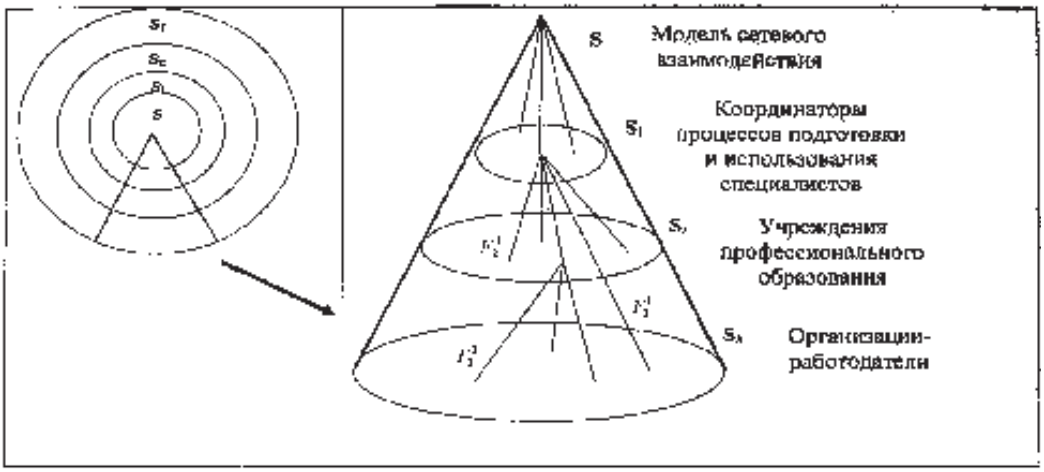


Рис.3. Фрактальная стратифицированная модель сетевого взаимодействия.

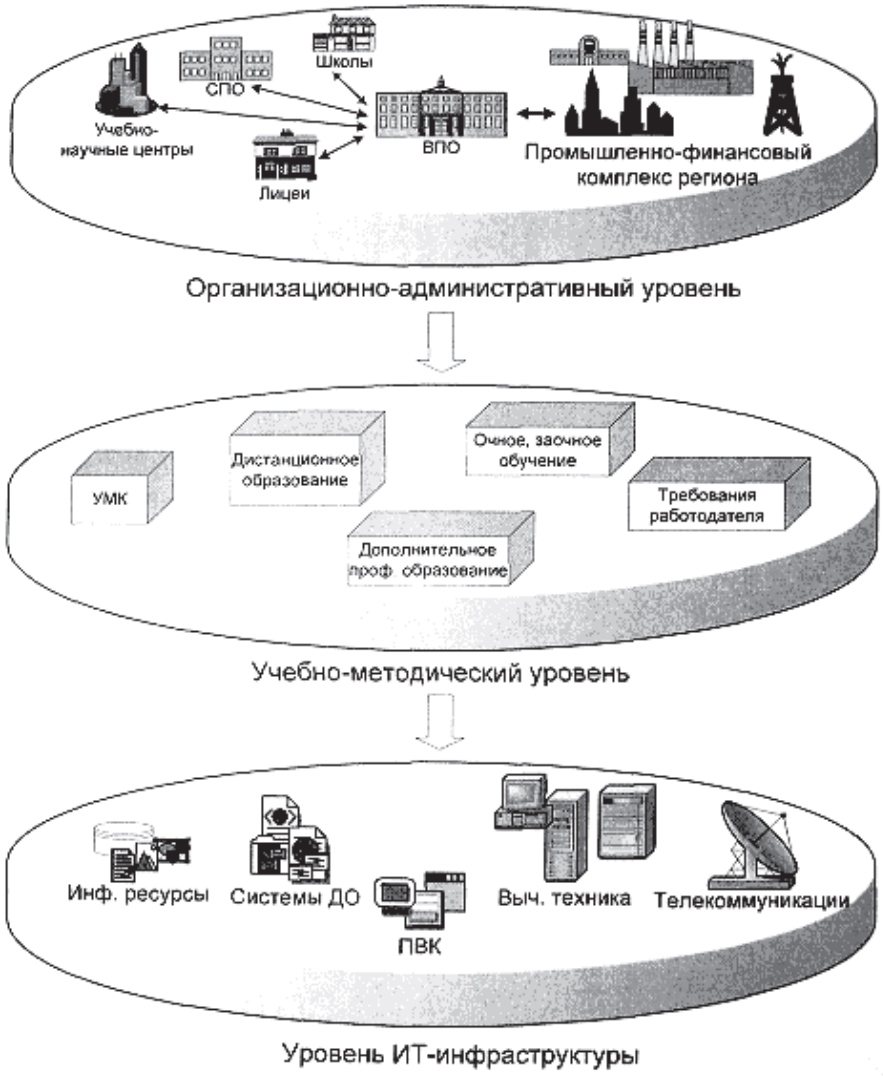


Рис. 4. Уровни онтологического моделирования

ленных и научных предприятий, каждый из которых, в свою очередь, разбивается на слои административных единиц и (или) предметных областей (отраслей). Порядок разбиения может быть любой. Можно начать с выделения слоя административных единиц (территорий), в нем будут выделены слои промышленных и научных предприятий, которые затем классифицируются по отраслям, или начать с выделения слоя отраслей, в котором будут выделены слои административных единиц и т.д. В слое S| выделяются министерства и организации, связанные с образованием, отраслевые министерства и региональные властные структуры.

Онтологическое моделирование. Для описания слоев предлагается использовать онтологии - один из современных подходов к представлению знаний. Онтологии включают концепты (информационные объекты), отношения между ними и их интерпретацию.

Предложено выделить три уровня онтологического моделирования: организационно-административный, учебно-методический и уровень ИТ-инфраструктуры (рис. 4). Один из примеров онтологии - онтология промышленных предприятий Иркутской области - приведен на рис. 5.

Разработана система онтологии, в которой выделены следующие типы онтологии: онтологии отраслей; онтологии предприятий по отраслям; онтологии учреждений профессионального образования; онтологии специальностей, требуемых отраслями (предприятиями); специальностей, выпускаемых учреждениями профессионального образования и т.д. Онтологии могут быть построены до любого

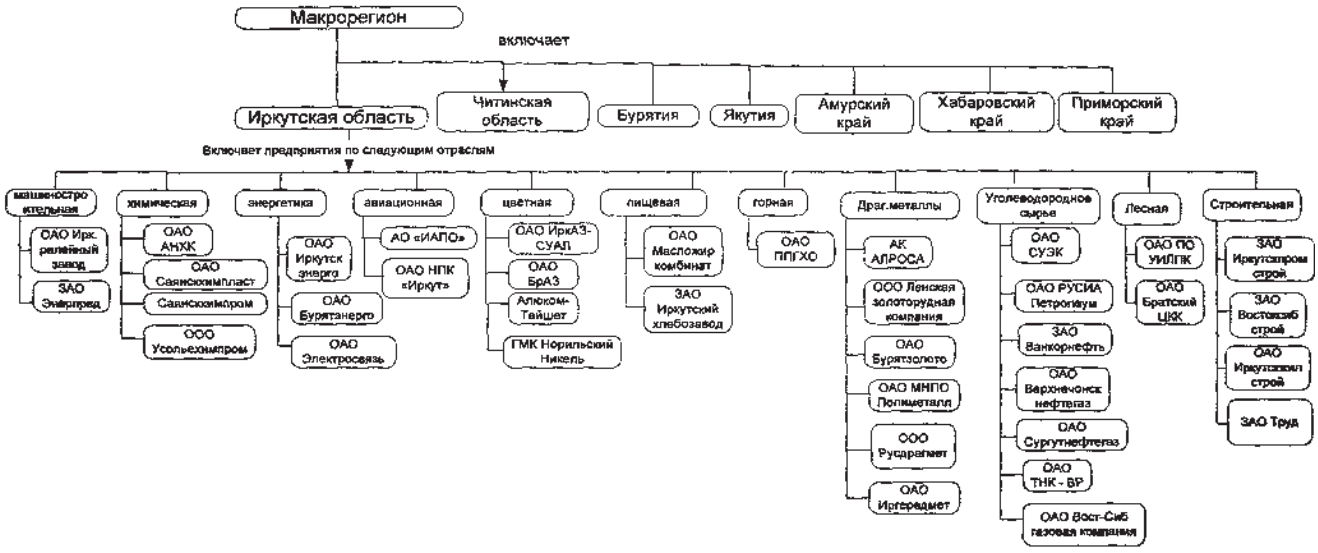


Рис. 5. Онтология промышленных предприятий Иркутской области

уровня детальности, включая онтологии профессиональных стандартов предприятий (отраслей), государственных образовательных стандартов, учебных планов и т.д. Подробнее онтологическое моделирование в рамках данною проекта рассмотрено в [3].

Мифологическое моделирование и моделирование бизнес-процессов. На фоне анализа возможных подходов к информационному моделированию наиболее целесообразным для решения поставленной задачи было принято использование мифологического моделирования и моделирования бизнес-процессов.

Причинами такого выбора являются относительная простота этих подходов, возможность графического представления, понятного пользователям (неспециалистам в области информационных технологий) и наличие доступных и легко-осваиваемых CASE-средств для построения этих моделей (в первую очередь ErWin и BpWin). Другой причиной являются первоочередная необходимость разработки типовой структуры баз данных субъектов образовательного кластера и потоков данных, циркулирующих между ними. Для решения первого вопроса необходимо разработать типовые мифологические модели данных субъектов образовательного кластера, для решения второго вопроса - выполнить анализ бизнес-процессов этих субъектов. В соответствии с ФС-моделью, приведенной на рис. 1, выполнена стратификация слоя S2 (учреждений профессионального образования), который, в свою очередь, разбивается на слои ВУЗов, средних специальных учебных заведений (ССУЗ), профессиональных технических училищ (ПТУ), школ; для каждого из этих слоев построена типовая мифологическая модель. Подробно мифологическое моделирование в рамках данного проекта рассмотрено в [4]. Пример одной из типовых инфологических моделей приведен на рис. 6.

Анализ бизнес-процессов типовых субъектов образовательного кластера включает выявление: исходной информации и источников ее поступления; результирующей информации и мест ее назначения (передачи); управляющей информации (органов, откуда она поступает); ресурсов реализации бизнес-процессов (как людских ресурсов, так и технических и программных средств). На рис. 7 приведен пример диаграммы бизнес-процессов деятельности кафедры, как базового подразделения технического ВУЗа.

В рамках проекта была разработана методика проведения информационного обследования с целью сбора данных для конкретизации моделей. В соответствии с этой методикой был выполнен сбор информации о крупных промышленных предприятиях макрорегиона, позволяющей выявить их потребности в специалистах конкретных специальностей; выполнен сбор информации об образовательных учреждениях макрорегиона, предоставляющих специалистов по требуемым специальностям. С использованием собранной информации построены онтологии слоев ФС-модели, инфологические модели субъектов образовательного кластера и модели бизнес-процессов образовательного учреждения. Рассмотрена

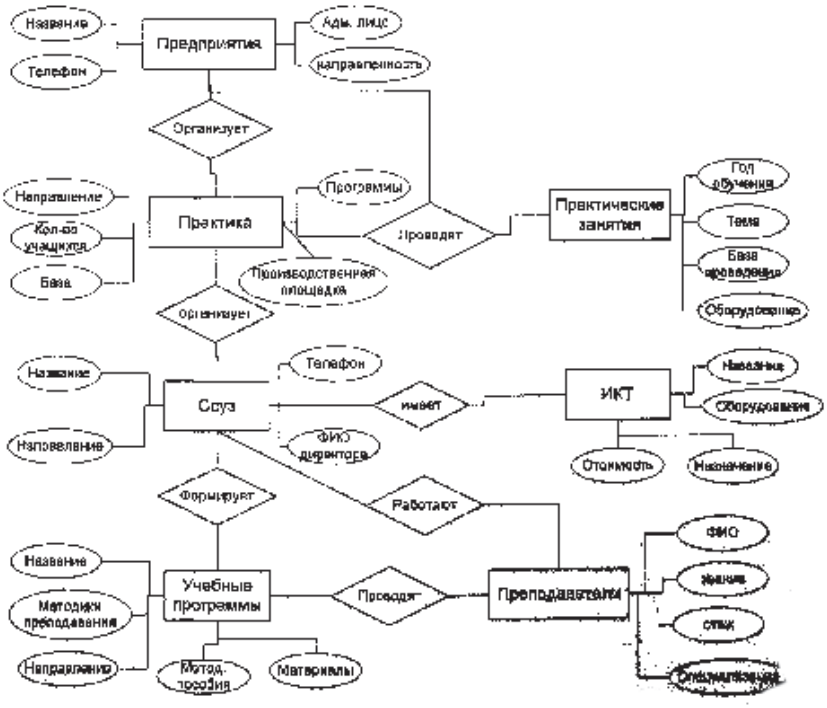


Рис. 6. Типовая мифологическая модель среднего специального учебного заведения.

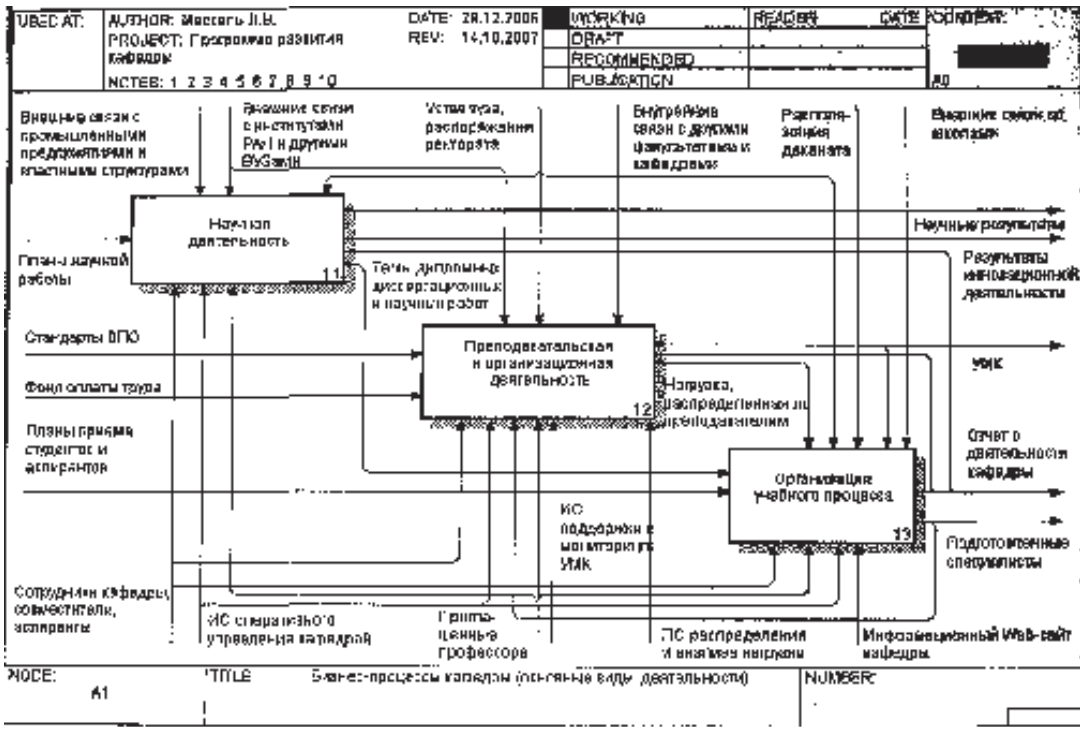


Рис. 7. Декомпозиция первого уровня бизнес-процессов деятельности кафедры.

целесообразность и возможность внедрения компетентностной модели специалиста, учитывающей требования Болонского соглашения [5].

Заключение. В рамках рассматриваемого проекта выполнен анализ современных подходов к информационному моделированию и инструментальных средств их поддержки, выбраны подходы, наиболее адекватные поставленной проблеме, предложена методология разработки, базирующаяся на фрактальном подходе к моделированию, разработан ряд инфо-логических и онтологических моделей и моделей бизнес-процессов. Выполнен первич-

ный сбор информации, на основе которой реализована конкретизация типовых информационных моделей. Сформулированы рекомендации по применению и развитию модели сетевого взаимодействия, которые могут быть использованы при определении задач последующих этапов выполнения проекта.

Основными из этих рекомендаций являются следующие:

1. Тиражирование предложенных методик построения инфологических и онтологических моделей и моделей бизнес-процессов субъектов образовательного кластера.
2. Применение методики информационного обследования с целью сбора информации для заполнения баз данных.
3. Разработка методики адаптации и применения компетентиостной модели специалиста, учитывающей требования работодателей.
4. Применение модели сетевого взаимодействия для разработки и отладки технологии взаимодействия между учреждений профессионального образования и организациями-работодате лям и.
5. Разработки ИТ-инфраструктуры для поддержки модели сетевого взаимодействия.

Важными составляющими такой ИТ-инфраструктуры являются Информационная инфраструктура и Телекоммуникационная инфраструктура. Упомянутые выше базы данных в этом случае будут компонентами Информационной инфраструктуры. При реализации ИТ-инфраструктуры могут быть использованы подход к созданию и инструментальные средства поддержки ИТ-инфраструктуры научных исследований и образования [6], которые разрабатываются совместно сотрудниками Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск) и ИрГТУ. Разработка ИТ-инфраструктуры поддержки модели сетевого взаимодействия может стать одним из следующих этапов развития данного проекта.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Горленко А.М., Бахвалов С.В., Бахвалова З.А., Массель Л.В., Трипутина В.В., Мака-гонова Н.Н. Модель сетевого взаимодействия учреждений профессионального образования и организаций-работодателей // Труды XIII Байкальской Всероссийской конференции, ч. II.- Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2008. С. 42-49.
2. Массель Л.В. Фрактальный подход к построению информационных технологий // В кн.: Криворуцкий Л.Д., Массель Л.В. Информационная технология исследований развития энергетики.- Новосибирск: Наука, 1995. - С. 40-67.
3. Массель Л.В., Бахвалова З.А., Макагонова Н.Н, Трипутина В.В. Онтологическое моделирование субъектов образовательного кластера // Труды XIII Байкальской Всероссийской конференции, ч. П.- Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2008. - С. 120-128.
4. Массель Л.В., Бахвалова З.А., Трипутина В.В., Макагонова Н.Н. Инфологическое моделирование субъектов образовательного кластера // Труды XIII Байкальской Всероссийской конференции, ч. П.- Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2008. С. 92-97.
5. Берестнева О.Г. Системные исследования и информационные технологии оценки компетентности студентов //Автореферат диссертации на соискание ученой степени докт. техн. наук.- Томск: ТПУ, 2007. - 24 с.
6. Массель Л.В. ИТ-инфраструктура научных исследований и открытая образовательная среда// Вестник ИрГТУ.- 2005.- №4 - С. 9 -15.

Мухопад Ю.Ф., Суржик В.В. УДК 62-501.12; 533.6.013; 629.7.022

ПЕРСПЕКТИВА РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ЕВРО-АЗИАТСКОГО КОРИДОРА

Базовым стержнем транспортной системы любой высокоразвитой страны является железнодорожный транспорт. В среднем на 1 тыс.кв.км в США приходится 22,7 км. железных дорог, в Японии — 73,1 км, в Германии 124,8 км., а в России 5,1 км. И в то же время плотность железных дорог Сибирских регионов и Дальнего Востока в России в 8-10 раз ниже чем в европейских регионах. Поэтому стратегический курс развития транспортной системы для России (равно как для Китая и др. стран Азии) не может быть заимствован от западных стран. Для поддержания транспортной связи с отдаленными пунктами для России необходимо решить проблему круглогодичного использования в первую очередь речной системы на базе новых концепций с использованием современных и перспективных транспортных средств. Использование только одного железнодорожного пути через всю Россию от Дальнего Востока, через Сибирь и Европейскую часть решает задачи межгосударственных перевозок, а при весьма слабом развитии автомобильных дорог, не позволяет решить в комплексе задачу транспортных перевозок к удаленным регионам Сибири, тундровым зонам Севера и труднодоступным береговым зонам Дальнего Востока. А именно в этих зонах и расположены наиболее масштабные залежи углеводородного сырья, и других полезных ископаемых. Авторы считают, что важнейшим звеном интеграции и развития всей транспортной системы России является использование нового вида транспортных средств. Органическое включение в транспортную сеть страны экранопланов позволит по новому решить комплекс проблем, в частности:

– обеспечить круглогодичное транспортное сообщение к труднодоступным населенным пунктам и месторождениям сырья;

– снять экологические проблемы так как при движении экранопланы не воздействуют на сушу и водные пространства, а также не оставляют термокарстовых следов в зонах вечной мерзлоты (в отличие от вездеходов);

– сократить на несколько порядков возможные затраты на комплексное развитие и интеграцию транспортной сети, так как не потребуется создание виадуков, насыпного автомобильного полотна, равно как и углубления рек (только на углубление рек Западной Сибири для обеспечения судоходства требуются сотни миллиардов рублей);

– ускорить товарооборот и доставку сырья к промышленным зонам его переработки;

– решить комплекс социальных проблем отдаленных регионов;

– решить вопросы кратчайшей доставки бригад и материалов при решении проблем в условиях возникновения чрезвычайных ситуаций;

– развитие экранопланостроения, как нового вида наукоемкой продукции позволит поставить новые задачи и одновременно решить вопросы развития машиностроения на базе нанотехнологий. Позволит поднять индустрию создания новых материалов в промышленности слаборазвитых регионов, так как строительство экранопланов вместимостью 15-20 пассажиров по силам освоить малым судостроительным заводам Сибири, практически прекратившим свою деятельность в перестроечный период. В последние годы объем финансирования научных исследований в большинстве ВУЗов, Сибири существенно снизился, в то же время более двух третьих научного потенциала сосредоточено в ВУЗах. Развитие экранопланостроения ставит задачи «загрузки» научного потенциала Сибирского региона, для решения комплекса задач таких, как:

– развитие интеллектуальных информационных технологий для более точного решения вопросов опознавания образов навигации, оптимальной структурной организации и

обеспечения безотказности систем управления;

– развития двигателестроения нового поколения, превышающего по тяге авиационные двигатели, и превосходящие их по уровню надежности, экономии энергоресурсов, срокам эксплуатации, габаритным показателям и др.;

– использование новых видов топлив для двигателей новых поколений, не загрязняющих атмосферу;

– развитие новых подходов в области аэродинамики с учетом экранирующей поверхности, оценки влияния различной балльности взволнованной поверхности;

– развития новых подходов в конструировании речного и морского судостроения;

– создания датчиков информации нового типа, масштабирующих и функциональных преобразователей интерфейсных систем обработки информации;

– создание дистанционно-управляемых измерительно-информационных систем регистрации процессов в реальном масштабе времени и др. [1,2,3].

Внедрение пассажирских судов на подводных крыльях (СПК) в конце прошлого века коренным образом модифицировало пассажирские перевозки, сделав их привлекательными для пассажиров и рентабельными для государства. За пятьдесят лет, прошедшие с момента массового внедрения на морском и речном флотах пассажирских СПК, по проектам нижегородского центрального конструкторского бюро по СПК построено более 2000 судов типа «Ракета», «Метеор», «Комета» и других и более 3000 катеров на подводных крыльях типа «Волга». В настоящее время с особой остротой стоит вопрос развития перевозок в регионах где есть большие и малые реки и где они пересекаются с железнодорожными и автомобильными магистралями. Логическим развитием судов на подводных крыльях являются суда на динамической воздушной подушке или экранопланы, которые будут особенно перспективными для организации круглогодичных скоростных грузопассажирских перевозок по рекам имеющим малые глубины фарватерного хода и перекаты.

Байкальские Экономические Форумы (БЭФ), проходившие в Иркутске в 2004 г. и в 2006 г., убедительно показали необходимость создания в стране глобальной транспортной системы, объединяющей все существующие виды транспорта в единую функциональную систему для обеспечения национальной безопасности и для решения экономических и социальных проблем. Эти же проблемы несомненно волнуют не только Россию, они актуальны и для любой страны.

Следует отметить, что в Европе и особенно России наступила эпоха возрождения внутреннего водного транспорта. Это определяется в первую очередь тем, что перевозки одной тонны груза по воде в 25 раз требуют меньше затрат энергии чем автомобильный транспорт, а также снижается экологическая безопасность, шумовые и зрительные помехи. Однако проигрыш в линейной скорости водного транспорта автомобилям и железнодорожному транспорту является существенным моментом снижающим его быстрое развитие.

Все эти факторы по другому должны быть оценены по отношению к экранопланам, средняя скорость которых составляет 150-650 км/ч. Низкая стоимость, высокая экономичность, круглогодичность эксплуатации, экологическая чистота, потребность в минимальной инфраструктуре определяют его существенное преимущество перед другими традиционными видами транспорта. Экранопланы в 2-3 раза экономичнее самолетов, вертолетов и аппаратов на воздушной подушке. При этом экранопланы второго поколения (смотри статью в этом сборнике) обладают режимом самостабилизации что определяет их повышенный уровень безопасности и комфортности за счет отсутствия качки от воздействия волн и атмосферных возмущений. Плавучесть, остойчивость и непотопляемость экранопланов соответствует требованиям, предъявляемым к кораблям. Реки России имеют естественные ограничения по срокам навигации, в отличие от рек Европы и США на которых навигация круглогодичная. В северных, Дальне-Восточных и Сибирских регионах ледостав прерывает судоходство на значительный период, в то время как для экранопланов гладкая поверхность замерзших рек и водоемов представляет собой удобную транспортную сеть для доставки грузов в отдаленные населенные пункты к местам добычи углеводородов и других природных ресурсов.

Создание и объединение транспортных потоков экранопланов с автомобильными и железнодорожными магистралями может стать могучим стимулом развития неосвоенных регионов, позволит организовать контейнерную доставку грузов «от двери до двери» и обеспечит национальную безопасность страны.

Для оценки эксплуатационных свойств экранопланов представляет интерес отзыв генерального конструктора КБ им Сухого М.П.Симонова: «Мне приходилось участвовать в испытаниях или быть пассажиром многих транспортных средств: наземных, воздушных, водных, но я никогда не ощущал такой восторженности как на экраноплане». Эти слова он произнес после полета на экраноплане «Орленок». Неизгладимые впечатления от экранного полета придают особую привлекательность этому новому виду транспорта особенно для туристов. В технике же, как правило, положительное эмоциональное восприятие соответствует ее высокому техническому уровню и большой экономической целесообразности.

Особый интерес к данному виду транспорта проявляют все морские и островные страны. Социальный эффект от внедрения экранопланов в жизнь переоценить трудно, и он состоит в следующем:

— может быть обеспечено круглогодичное использование водных путей страны.

— будет дан толчок более быстрому освоению малодоступных районов и их социальному развитию;

— будет обеспечено надежное пассажирское и грузовое сообщение в той части страны, где его сейчас практически нет.

Сертификацию экранопланов класса СДП планируется вести по нормам морского регистра. Коммерческий результат от внедрения экранопланов класса СДП в транспортную систему может превзойти любые смелые прогнозы. Возможная схема применения экранопланов в транспортной системе:

— экранопланы взлетного веса от 1 до 30т могут выполнять экскурсионно-туристические, санитарные и почтовые рейсы, доставку грузов в трудно доступные регионы, разведку полезных ископаемых, спасательные операции; «экономическая» высота полета — 0,7-3 метра;

— экранопланы взлетного веса от 30 до 150т могут выполнять: экскурсионные и грузопассажирские перевозки, разведку полезных ископаемых и рыбных запасов, операции по спасению терпящих бедствие на воде; «экономическая» высота полета — 3-7 метров;

— экранопланы взлетного веса от 150 до 500т могут выполнять: межконтинентальные грузовые и грузо-пассажирские перевозки, спасательные операции на воде и перевозку негабаритных, сыпучих и жидких грузов, а также экранопланы можно использовать в качестве мобильных баз-складов и центров; «экономическая» высота полета —7-12 метров;

— экранопланы взлетного веса от 500 до 1000т и выше могут использоваться: для межконтинентальных грузовых и грузо-пассажирских перевозок, для перевозки тяжелых негабаритных грузов, «экономическая» высота полета — 12-20 метров.

Для решения комплекса научно-прикладных задач наилучшим образом может быть использованы интеллектуальные возможности Сибирского и Байкальского центров академии инженерных наук России, технологической академии и других научно-производственных коллективов.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Суржик В.В., Мухопад Ю.Ф., Орлов И.И. (2006). Экранопланы в условиях сибирского климата. Труды III Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата. Часть VI., Якутск, Российская Федерация. С. 10-20.
2. Суржик В.В. (2004). О возможности внедрения в транспортную систему экранопланов компоновочной схемы «Утка». Геополитические и социально-экономические проблемы создания международных транзитных тран-спортных коридоров. Колл. монография: Авт. коллектив: Хоменко А.П., Елисеев С.В., Каштанов Ю.Б. и др. - Иркутск. 2004. Том 2. - С. 383-386
3. Мухопад, Ю.Ф. Экранопланы — перспективный транспорт для просторов Сибири / Суржик В.В., Мухопад Ю.Ф., Орлов И.И. // Современные технологии, системный анализ, моделирование. - 2006. - №3(11). С. 144-150.

Резник Ю.Н., Байбородин Б.А., Сапожников А.А. УДК 621.01(07)

КРИТЕРИИ И ИНСТРУМЕНТЫ КАЧЕСТВА В ЗАДАЧАХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ

Управление качеством является новым шагом в развитии предприятий. И это не формальное внедрение каких—то способов, приемов или схем, так как современное управление качеством — это новый подход ко многим вопросам, новое понимание сути процессов, философия качества. Один из базовых принципов управления качеством состоит в принятии решений на основе фактов. Наиболее полно это решается методом моделирования процессов, как производственных, так и управленческих инструментами математической статистики. Однако, современные статистические методы довольно сложны для восприятия и широкого практического использования без углубленной математической подготовки всех участников процесса. В конце восемидесятых годов прошлого века были сформулированы семь простых в использовании наглядных методов анализа процессов. Это следующие инструменты:

- многоступенчатое голосование,
- матрица по выбору темы,
- контрольный лист,
- проверочный лист,
- стратификация,
- график Парето,
- матрица постановки задачи,
- диаграмма Ишикавы.

При всей своей простоте инструменты качества сохраняют связь со статистикой и дают профессионалам возможность пользоваться их результатами, а при необходимости - совершенствовать их. Укажем, каковы основные цели применения этих инструментов качества:

- блок-схема процесса (flowcharting) - что делается?
- контрольные листы (check sheets) - как часто это делается?
  гистограммы - какова вариация?
- диаграммы рассеяния - каковы зависимости (корреляция) между сравниваемыми параметрами?
- диаграммы расслоения - как составляются данные?
- ранжирование Парето - выявление главной проблемы?
- причинно-следственный анализ, включая мозговой штурм - каковы причины проблемы?
- диаграммы силового поля ("да - нет") - что мешает или помогает решить проблему?
- кривые ранжирования неявных факторов - какие факторы являются наиболее важными?
- карты контроля и управления процессом - какие возникают отклонения и как их контролировать?

Известно, что наряду с «старыми инструментами качества» существуют «Семь новых инструментов качества».-Наиболее часто они находят применение при решении проблем, возникающих на этапе проектирования, в отличие от «7 инструментов», находящих наиболее частое применение на этапе производства. Эти новые инструменты особенно подходят для совершенствования качества путем улучшения процесса проектирования. Укажем цели применимости этих инструментов.

1. Диаграммы сходства (группирования) - Affinity diagrams - сбор информации и ее группирование по признаку природной связи (форма мозгового штурма).

2. Диаграммы логических связей (Interrelationship diagrams) - при анализе сложных проблем.

3. Сетевая диаграмма/граф (Systems flow/tree diagram) - для систематического расположения действий всего диапазона для достижения цели.

4. Матричные диаграммы (Matrix diagrams) - ядро построения таблиц или дома

качества при развертывании функции качества, в форме столбцов и строк.

5. Матричный анализ данных (Matrix data analysis) - двумерный анализ свойств сравниваемых продуктов.

6. Карты программы принятия решения (Process decision programe chart) - отображение каждого события, начиная от формирования проблемы и кончая ее решением.

7. Стрелочная диаграмма (Arrow diagram) - сетевой график достижения цели.

Отметим, что существуют инструменты качества, не вошедшие в обе вышеуказанные «семерки».

1. FMECA (Failure mode, effect and criticality analysis) - анализ отказов и степени их влияния при создании продукта, услуги или процесса. Назначение - снизить вероятность отказа наиболее критических компонентов.

2. QFD-анализ (Quality Function Deployment) - метод проектирования продукта или услуги, основывающийся на требованиях потребителя и осуществляемый группой разных специалистов организации. Метод переводит требования потребителя в соответствующие технические требования продукта.

3. SPC-методы (Statistical Process Control) - методы статистического контроля и управления процессами: выборочный статистический контроль, статистическое управление процессами. SPC-методы -не только инструмент, но и стратегия снижения рассеяния параметров качества.

Наряду с указанными выше инструментами качества развиваются как статистические инструменты качества методы прогнозирования, в т.ч. методы, основанные на анализе трендов. Задача прогнозирования — предсказание будущих значений временного ряда на основании прошлых наблюдений. При этом, можно выделить две разновидности решаемых задач:

а) недетерминированый общий закон изменения прогнозируемого процесса;

б) общий закон изменения прогнозируемого процесса известен, однако неизвестны характеризующие его параметры.

Первый тип задач целесообразно решать при помощи трендового прогнозирования, второй — при помощи минимизации целевой функции, описывающей закон изменения процесса с использованием специальных алгоритмов[1].

Перечисленные инструменты контроля качества — наиболее важная составляющая комплексной системы контроля TQM. При этом решается задача прогнозирования — предсказание будущих значений временного ряда на основании прошлых наблюдений, что требует формализации и математического моделирования технологических процессов; разработки методов и критериев оптимизации технологичности конструкции изделий, структурной и параметрической оптимизации процессов на базе компьютерных технологий; создания технологических банков данных и баз знанийтиповых машиностроительных производств.

Автоматизация технологической подготовки производства изделий машиностроения на основе CAD/CAM-методов включает решение ряда сложных науно-технических проблем.

1. Создание оптимизированных технологических процессов изготовления ультрапрецизионных деталей (нанотехнологий), маложестких деталей, деталей сложной формы и больших габаритов, деталей из труднообрабатываемых материалов и монокристаллов, высокоскоростных технологических процессов лезвийной обработки, технологических процессов упрочняющей обработки, процессов автоматизированной сборки изделий.

2. Разработка методов проектирования и реинжиниринга машиностроительного производства на основе системотехники.

Для общей оценки качества машины большое значение имеет ее работоспособность, под которой понимается такое состояние изделия, при котором оно способно выполнять заданные функции, сохраняя значения заданных параметров в пределах, установленных нормативно-технической документацией. В связи с этим одной из основных характеристик современных машин является их надежность.

В процессе изготовления изделия реализуются качества, которые заложены в конструкторской документации при проектировании этого изделия. При производстве изделия основным критерием оценки его качества является степень соответствия фактических технико-экономических параметров и характеристик как готового изделия, так и его отдельных частей тем характеристикам, которые заложены в проектной документации.

При этом на качество изделия влияет качество его проектирования.

При проектировании (разработке) изделия конструктор руководствуется следующими положениями. Изделие должно обладать:

- достаточной прочностью и жесткостью;
- возможно малым весом и малым износом трущихся частей;
- стабильностью зазоров, не подверженных вредным влияниям изменения размеров в зависимости от изменения температуры;
- простотой, дешевизной, возможной быстротой изготовления всех узлов и деталей изделия;
- возможностью удобной сборки, разборки и доступностью всех частей для ухода и ремонта;
- возможностью удобства транспортировки, монтажа, наладки;
- безопасностью для работающих людей и окружающей природы.

Если конструктор (разработчик) заложил в проектную документацию все функциональные, количественные и качественные характеристики в полном соответствии с требованиями заказчика, можно ли считать ее, безукоризненно выполненную, качественной?

Изготовитель всегда имеет свой интерес и свою выгоду, так как вся техника и вся торговля построена на коммерческих началах. Поэтому он всегда имеет склонность исполнить работу возможно дешевле, использовать имеющуюся у него оснастку, инструмент, оборудование и квалификацию работников. Конструктор же, разработав прекрасную документацию изделия, которое может быть хорошо воспринято рынком, выполнил ее без учета возможностей производителя. Тогда производителю для реализации этой документации может потребоваться дополнительное количество приспособлений, инструментов, шаблонов, калибров, штампов и прочего, а также масса дополнительного времени, так что изделие обойдется дорого и конкурировать ему с тем, который выпускает изделие, достаточно близкое к разработанному, будет невозможно и может привести к его краху.

Под уровнем качества изделия понимают сравнительные характеристики количественных, качественных и функциональных параметров нового изделия с такими же параметрами существующих аналогов или изделий, выполняющих аналогичные функции [2]. Объектом управления качеством проектирования являются функциональные, качественные и количественные параметры и характеристики, влияющие на совершенство конструкторско-технологической документации в сочетании с экономической оценкой этих характеристик конкретным производителем.

При оценке качества проектирования приходится учитывать не только сравнительные характеристики разрабатываемого изделия, но и условия производства, оснащенность производителя оборудованием, приспособлениями и прочим, включая квалификацию работников применительно к вновь разрабатываемому изделию.

Качество изделия как совокупность свойств закладывается в процессе научных изысканий, конструкторских и технологических разработок, создается в процессе производства, а проявляется при эксплуатации. В процессе эксплуатации качество изделия обычно имеет тенденцию к его ухудшению за счет физического и морального износа, а также изменения конъюнктуры рынка. Поэтому к критериям оценки качества часто добавляют время, в течение которого изменение качества изделия должно оставаться на уровне, приемлемом для заказчика или условий рынка.

Таким образом, при проектировании изделия целесообразно оценивать желаемый (верхний) и допустимый (нижний) уровни качества. Эта оценка позволяет разработчикам выбирать наиболее рациональные и приемлемые технические и технологические решения для реализации заданной функции качества изделия в конкретных производственных условиях. Нижний уровень определяется из неудовлетворенных требований покупателя или заказчика. Верхний уровень определяется существующим на сегодняшний день техническим развитием и возможностями исполнителя. При определении нижнего уровня качества уточняются функциональные возможности будущего изделия, его качественные и количественные характеристики, устанавливается уровень важности или значимости отдельных характеристик или параметров внутри каждой группы характеристик. Кроме того, необходимо согласовать с заказчиком критерии оценки качества объекта, такие как допустимая надежность, долговечность, обслуживаемость, стоимость и пр., а также приоритеты критериев оценки или рассмотреть наиболее целесообразные варианты этих приоритетов.

Выбранные качественные и количественные характеристики с уровнем их важности, а

также принятые критерии оценки с их приоритетами позволяют выразить в количественной форме нижний уровень качества изделия, который определяет границу, ниже которой не следует опускаться, поскольку этот уровень отвечает требованиям и ожиданиям заказчика (покупателя).

Верхний уровень, к которому должен стремиться разработчик, может оказаться нежданным для заказчика (покупателя). Оценка верхнего уровня производится на основании изучения патентных материалов, соответствующей технической литературы, передовых образцов техники, оборудования и технологии. Проводя патентные исследования и изучая аналоги, можно наметить уровень качества, к которому следует стремиться при разработке конкретного изделия, исходя из достигнутого технического уровня.

Повышение и обеспечение качества машин — проблема комплексная и многоплановая. Технология изготовления деталей и изделий занимает в этой проблеме определяющее место, так как именно через нее реализуются новые прогрессивные конструкторские разработки, она непосредственно влияет на качество отдельных деталей и изделий в целом.

Основными параметрами, через которые технология изготовления деталей влияет на их качество, являются точность обработки и состояние поверхностного слоя. В этих областях накоплен большой экспериментальный материал и выполнены серьезные теоретические разработки, которые служат базой для создания рациональных технологических процессов изготовления деталей различных классов из металлических и неметаллических материалов. Однако актуальность исследований точности обработки и состояния поверхностного слоя за последние годы не только не уменьшилась, а еще более возросла. Основными причинами этого являются:

1. повышение требований к качеству машин, в первую очередь к их надежности и долговечности;

2. усложнение условий работы машин в связи с интенсификацией их режимов и повышением рабочих параметров (применение высоких температур и давлений, вакуума, агрессивных сред, радиационного облучения и т.п.).

Все более широкое использование высокопрочных, жаропрочных и жаростойких сталей и сплавов, материалов со специальными свойствами, монокристаллов на титановой, никелевой или кобальтовой основе, сплавов вольфрама, молибдена, ниобия и других, которые обладают повышенной чувствительностью к состоянию поверхностного слоя.

Обеспечение качества изделий и эффективности машиностроительного производства возможно только на основе создания интенсивных оптимизированных компьютерных технологий.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Лонцих П.А.Обеспечение качества и управление динамическими процессами технологических систем.- Ростов-на-Дону, 2003.- 236 с
2. Азаров В.Н., Лаохин Ю.Л. Интегрированные информационные системы управления качеством. М.: «Европ. Центр по качеству».-2002,-64с.

Сольская И.Ю., Федорова Е.А.

УДК 658.32:656.2Д318

ПОВЫШЕНИЕ КВАЛИФИКАЦИИ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРСОНАЛОМ КАК ЭЛЕМЕНТ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА

Одним из важнейших положений Болонской декларации является положение об исключительном значении качества образования.

Определение качества образования как основы развития общеевропейского пространства высшего образования предполагает создание набора согласованных стандартов, процедур и руководящих принципов для обеспечения качества.

Кроме того, необходимо включить в национальные системы по обеспечению качества образовательных услуг:

- определение обязанностей участвующих органов и учреждений;
- оценивание образовательных программ и вузов;
- аттестацию и аккредитацию.

Таким образом, каждый вуз несет ответственность за реализацию ключевых факторов качества образования, а именно:

- качество содержания образования, т.е. качество ГОС ВПО и качество конкретных образовательных программ, построенных на их основе; положительную мотивацию обучающихся;
- качество методического и материально-технического обеспечения образовательного процесса;
- качество профессорско-преподавательского состава; положительную мотивацию персонала; качество технологий обучения;
- качество технологий тестирования и проверки знаний и навыков студентов; качество общего менеджмента вуза.

Предполагая, что главным процессом в системе высшего профессионального образования является образовательных процесс, то для его реализации справедливы общие требования, т.е. процесс необходимо:

- разработать,
- документировать,
- внедрить,
- поддерживать,
-улучшать его результативность.

Однако, улучшать результативность процесса возможно только при наличии ее (т.е. результативности) оценки, формируемой заказчиком - работодателем. При этом и сама процедура внешней оценки качества образовательных услуг требует аналогичных мероприятий по реализации, а также мониторинга своего состояния (рис. 1, элемент С1).

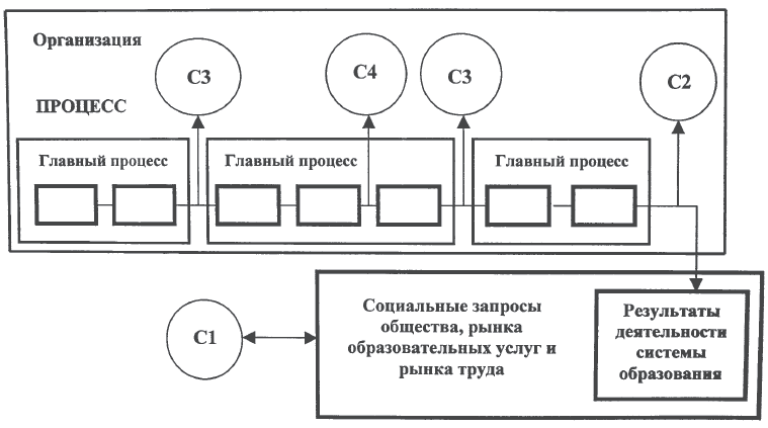


Рис. 1. Система мониторинга процессов

Разработка мер по оценке результативности образовательного процесса предполагает наличие структур (или структуры), отвечающих за управление персоналом на предприятии - заказчике (работодателе).

Для системы железнодорожного транспорта такой структурой является служба управления персоналом. Одной из задач такой службы является подготовка, переподготовка и повышение квалификации кадров всех уровней: от рабочих, специалистов до руководителей и резерва руководящих кадров. Кроме того, линейные предприятия имеют свои кадровые подразделения, в составе которых работают инженеры по подготовке кадров структурных подразделений ОАО «РЖД», выполняющие аналогичные функции.

Во время учебы в ИрГУПС - вузе, подведомственном Министерству транспорта РФ, студент (особенно если речь идет о студентах, обучающихся в рамках целевой профессиональной подготовки кадров) овладевает знаниями и навыками не только по основной образовательной программе, но получает, как правило, одну из рабочих специальностей, определенные навыки менеджерской, экономической, правовой деятельности в объеме программ повышения квалификации (от 72 до 100 часов) в студенческом деловом центре (СДЦ) и центре оценки и мониторинга персонала (ЦОМП) университета, а также имеет возможность получить второе высшее (параллельное) образование.

Таким образом, со стороны заказчика - работодателя должна формироваться интегральная внешняя оценка качества подготовки специалистов, включающая не только качества высшего (первого) образования, но и всего спектра образовательных услуг, представляемых университетом.

Для адекватной внешней оценки качества образования специалисты по управлению персоналом - инженеры по подготовке кадров - должны не только заниматься оценкой результатов реализации отдельных образовательных программ, но и с интегральной оценкой качества всего результата образовательного процесса, включающего все реализуемые формы и методы обучения и воспитания.

Поскольку ответственность за обеспечение качества лежит непосредственно на каждом из учебных заведений, решать проблемы, связанные с обеспечением необходимого качества, формированием системы менеджмента качества и сертификацией такой системы каждый вуз должен независимо от своей специфики и внешнего окружения. К числу таких актуальных проблем, к которым традиционно относят: стратегическое планирование деятельности вуза, мониторинг выполнения плана, анализ достигнутых результатов; формирование портфеля учебных программ и специальностей; оптимизация управления ресурсами (персонал, инфраструктура, финансы и т.д.); внедрение методик оценки качества образовательных услуг, необходимо добавить проблему поддержки процесса формирования интегральной внешней оценки качества.

Одним из важнейших направлений решения этой проблемы является обучение (или повышение квалификации инженеров по подготовке кадров по программам, учитывающим важность решения этой проблемы также и в свете масштабности мероприятий по формированию системы менеджмента качества в ОАО «РЖД». В институте дополнительного образования (ИДПО) ИрГУПС разработана и реализована такая программа (табл. 1), ориентированная также на реализацию кадровых аспектов Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года [1,2] и других программных документов.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Стратегическая программа до 2010 года и основные направления открытого акционерного общества «Российские железные дороги» на период до 2015 года. - 42 с.
2. Давыдов А.В., Овсянников А.С., Маложон И.М. Мотивация и оплата труда в рыночной экономике. Новосибирск: Наука, 2004. - 204 С.

Таблица 1

Тематический план повышения квалификации инженеров по подготовке кадров структурных подразделений ОАО РЖД по программе «Совершенствование системы подготовки кадров в рамках корпоративной стратегии ОАО «РЖД»

1. Стратегическая задача развития кадрового потенциала ОАО «РЖД»
1.1 Общие положения системы подготовки кадров на ОАО «РЖД».
1.2 Стратегия кадрового потенциала ОАО «РЖД» до 2010 года.
1.3 Совершенствование системы взаимодействия ОАО «РЖД» и образовательных учреждений по подготовке кадров для системы железнодорожного транспорта
2. Нормативная база системы образования Российской Федерации
2.1 Нормативные документы системы образования (Закон о высшем образовании и системе ДПО)
2.2 Новое в трудовом законодательстве. Правовое регулирование трудовых отношений.
3. Обучение и профессиональная переподготовка в системе управления персоналом
3.1 Система образования и повышения квалификации. Профориентация.
3.2 Развитие кадрового потенциала. Управление резервом на замещение.
3.3 Педагогика в системе профессиональной подготовки.
3.4 Психологические аспекты образования взрослых.
4. Психология и социология трудовых отношений
4.1 Мотивация и стимулирование в системе подготовки кадров.
4.2 Современная концепция менеджмента качества - качество персонала.
4.3 Социально - психологические аспекты трудовых отношений.
4.4 Молодые специалисты. Управление карьерой.
4.5 Методы определения кадровых потребностей.
5. Современные методы организации учебного процесса
5.1 Возможности дистанционных методов обучения при повышении квалификации и профессиональной переподготовке специалистов.
5.2 Использование ЕКАСУТР в планировании и организации обучения руководителей, специалистов и рабочих кадров.

Иванов А.Г., Бахвалов С.В.

УДК 681.142.2

ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕДИЦИНСКОЙ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Проблема профессиональных нейроинтоксикаций (ПНИ) у работников химических промышленных предприятий в Иркутской области актуальна и имеет социально-экономическую значимость. Существующие методики диагностики и прогнозирования ПНИ нуждаются в совершенствовании автоматизированной инфраструктуры, реорганизации процессов обработки информации, во внедрении программных методов и средств обеспечения поддержки регистрационных и аналитических задач. Для решения означенной проблемы НИИ медицины труда и экологии человека (МТ и ЭЧ) ВСНЦ СО РАМН г. Ангарска и Иркутский Государственный Технический Университет (ИрГТУ) объединили усилия и приступили к научно-исследовательской работе, целью которой является разработка и выбор формальных методов и средств поддержки интеллектуальных процессов диагностики и прогнозирования ПНИ у работающих, создание проекта комплексной информационно-аналитической автоматизированной медицинской системы (ИАС), реализующей информационную технологию, предложенную в [1], а также создание научного прототипа экспертной системы (ЭС), обеспечивающего поддержку принятия диагностических решений в рамках проблемы. Исследования проблемной области, специфики предполагаемого режима эксплуатации ИАС, сбор и анализ требований к системе позволили выработать ряд опорных решений в определении архитектуры программного обеспечения комплексной ИАС.

Решение задачи построения архитектуры комплексной медицинской ИАС основывается на внешнем нормативном описании системы и включает идентификацию ряда подчиненных решений, связанных с разработкой статической и динамической структурных моделей, с приведением совокупных ограничений, накладываемых на ПО, модульной декомпозицией, моделей взаимодействия уровней и компонентов, и другого.

Проектируемая ИАС является многопользовательской. На этапе анализа выявлены следующие функциональные роли [1]:

1. Врач-профпатолог - специалист, выполняющий подготовку предварительных диагностических заключений по ПНИ;

2. Клиницист - узкий специалист, выполняющий узконаправленное исследование здоровья пациента и устанавливающий частный диагноз в соответствующей области;

3. Когнитолог - инженер по знаниям, создает и поддерживает базу знаний ЭС; выполняет извлечение и формализацию знаний экспертов;

4. Инженер-математик — данные специалисты выполняют верификацию поставляемых в ИАС данных, а также их статистическую обработку, применяют математические методы анализа медицинских данных;

5. Специалисты в области гигиены труда (Врачи-гигиенисты) — выполняют анализ и оценку условий труда и быта работающих, поставляют данные в ИАС;

6. Невролог-профпатолог поликлинического отделения - врачи клиники НИИ МТиЭЧ выполняющие скрининговое обследование работающих, подготавливают и передают в ИАС предварительные заключения о состоянии здоровья работающих;

7. Системный администратор — выполняет постоянную техническую поддержку ИАС, оказывает пользователям помощь при работе в ИАС;

8. Разработчик — создает, модифицирует и поддерживает ИАС на уровне кодов приложений и объектов баз данных;

9. Эксперт в области профпатологии нервной системы — привлекается в качестве источника эвристических знаний для ИАС.

10. Социолог — выполняет оценку социально-бытовых условий жизни и социально-психологических характеристик работников;

Пользовательский состав условно разбивается на два класса: *непосредственные* (1-4, 7,8) — взаимодействующие с программной средой ИАС и обеспечивающие прикладные сервисы ИАС и *внешние* (5,6,9,10) — взаимодействующие с ИАС через непосредственных пользователей для предоставления медицинских производственно-гигиенических, социологических данных.

Результаты проведенного анализа требований к ИАС, а также полученных на их основании функциональных и эксплуатационных спецификаций, позволили зафиксировать ряд фундаментальных требований к программной архитектуре ИАС:

– *Использование многослойной ярусной архитектуры для программной системы*, каждое из приложений которой включает либо использует ряд изолированных уровней кода с восходящей вертикальной зависимостью.

– *Возможность параллельного исполнения программ*, жизненный цикл основного комплекса которых определяется и управляется контейнерами сервера приложений. При этом целесообразно отображение данного требования в модели MVC (Model-View-Controller, Модель-Вид-Контроллер) [2];

Также сформулирован ряд общих требований к программной реализации, создаваемой ИАС: *стандартизация решений*; м*асштабируемость*; г*ибкость (*замена компонент одного программного слоя или яруса не должны влечь необходимости внесения изменений в компоненты других слоев); *конфигурируемость*, в т.ч. способность к легкому изменению состава компонент, в том числе без останова сервисов и приложений, в «горячем» режиме; у*правляемость* (архитектура ИАС должна всегда оставаться доступной для контроля, учета, планирования); о*беспечение кросс-платформенности системы*; о*беспечение надежности системы* на уровне архитектуры системы; о*беспечение производительности системы* (за счет поддержки распределенных вычислений и многопоточности); п*оддержка защиты информации (ЗИ).* Архитектура должна способствовать реализации методов ЗИ.

На основании сформулированных требований в качестве основной программной технологии для ИАС выбирается технология Java2 от компании Sun Microsystems, в качестве архитектурной платформы - J2EE (Java 2 Enterprise Edition), на сегодняшний день имеющая статус одного из признанных мировых стандартов в области разработки сложных корпоративных приложений. Архитектура системы, созданной на J2EE, способна полностью удовлетворять сформулированным требованиям [3]. Кроме этого, достоинствами платформы J2EE, являются: полная документированность, наличие ряда базовых программных средств — серверов приложений, интегрированных сред разработки, компонентных контуров — приобретение и использование которых не влечет прямых финансовых затрат, и, вместе с тем, обеспечивает независимость разрабатываемых приложений от аппаратно-программных платформ.

Для построения основной серверной программной инфраструктуры аналитических и регистрационных приложений ИАС было выбрано следующее базовое программное обеспечение:

– Базовый набор java-разработки JDK (Java Development Kit) v5.0 Update 15, в составе имеющий виртуальную java-машину (JVM — Java Virtual Machine), необходимую для работы всей java-инфраструктуры ИАС;

– Сервер приложений JBossAS v4.2.0.GA, предназначен для развертывания функциональной и представительной логики приложений ИАС; характеризуется открытым кодом (Open Source) и общественной лицензией (GPL — General Public License)

– Сервер баз данных Oracle 10g XE (свободно распространяемая версия), предназначен для хранения медицинских, гигиенических, производственных данных, вовлеченных в информационные процессы ИАС;

В качестве контура повторно используемых компонентов определяются:

– средство JBoss Seam 2.0.1 GA — каркас, предоставляющий компонентную модель для использования в приложениях JBossAS на любом из ярусов системы.

– J2EE-совместимый каркас GWT (Google Web Toolkit) framework, предназначенный для разработки графических интерфейсов корпоративных приложений на основе технологии AJAX (Asynchronous JavaScript and XML).

Для компоновки API (Application Programming Interface, интерфейс прикладного программирования) ядра ЭС используются два базовых программных продукта:

–Jess (Java Expert System Shell) Rule Engine v7.0p1 — полнофункциональная оболочка экспертной системы, продукт компании Sandia National Laboratories], включающий набор функциональных классов

Java, расширение JessDE для платформы Eclipse, предоставляющее визуальную оболочку для разработки и тестирования базы знаний; Jess Rule Engine может быть использован как самостоятельное приложение, и как набор Java API для интеграции во внешний код Java.

– NPX FuzzyJ Toolkit v1.10 — система Java API для представления и управления нечеткой информацией, реализующая аппарат нечеткой логики и нечетких множеств Л.Заде

Для поддержки процессов разработки и сопровождения ИАС выбираются:

– Среда разработки Red Hat Developer Studio v1.0.0 CR1, основанная на платформе Eclipse, интегрированная с сервером JBossAS.

– Eclipse-совместимое средство функционального расширения JessDE, предоставляющее визуальное среду для разработки и поддержки базы знаний;

– Eclipse-совместимое средство функционального расширения GWT Designer, предназначенное для разработки и поддержки графических пользовательских интерфейсов.

Рассмотрим распределение функций, выбранного программного обеспечения по ярусам, разрабатываемой системы. При этом выделяются ярусы: представления и клиентского уровня, функциональной логики, интерфейсов ядра подсистемы ЭС, доступа к данным.

Результаты анализа требований к ИАС, а также исследование специфики ее проектируемых функций, позволили сформулировать для пользовательских интерфейсов ряд обобщенных нормативных характеристик:

• *Функциональное соответствие решаемым задачам*. Даже поверхностный анализ активности пользователей в ИАС определяет достаточно сложные сценарии их взаимодействия с программной средой, что требует разработки графического интерфейса с событийной моделью адекватной сложности;

• Стандартность и типизация. Архитектура и дизайн интерфейсов для всех медицинских приложений к ИАС, охватывающие ее клиентский и представительский уровни, объединены определенным типовым решением, универсальной технологией, принятой в качестве внутреннего стандарта.

• *Прозрачность и дружественность*.

• *Интерактивность в режиме реального времени*.

Анализ приведенных выше и иных смежных требований позволяет определить следующие решения. Основной технологией взаимодействия между клиентским и представительским ярусами ИАС определяется AJAX, использующая протоколы http и https для организации передачи асинхронных сообщений между клиентом и сервером веб-приложения. Особенность AJAX состоит в отказе от прямого http-диалога веб-обозревателя и веб-сервера, и замене его использованием объекта XMLHTTPRequest, предоставляемого моделью обозревателя и управляемого кодом JavaScript на стороне клиента. Данный код и составляет высококачественный пользовательский интерфейс, предоставляющий пользователю развитую событийную модель, обеспечивающий непрерывность его работы и организующий все взаимодействия с серверной частью путем отправки запросов XMLHTTPRequest и обработки откликов сервера в функциях обратного вызова.

Для практической реализации AJAX-интерфейсов был выбран инструмент GWT, позволяющий выполнить цикл разработки кода уровней клиента и представления, включая отладку и тестирование, на языке Java2, в выбранной визуальной среде разработки. Развертывание включает компиляцию клиентской части из Java2 в JavaScript и HTML. Серверная часть — удаленный GWT-сервис - формируется в виде jar-библиотеки, содержащей Java-класс сервлета, отвечающего за взаимодействие между процессами соответствующего приложения на уровне функциональной логики и соответствующим клиентским интерфейсом.

На рис. 1 приводится модель, комбинирующая представление процесса компиляции и развертывания GWT-программы, а также логической организации удаленного GWT-сервиса и взаимодействия между клиентским и представительским уровнями.

На ярусе функциональной логики в соответствие каждой прикладной функции, выявленной в областях применения ИАС для пользователей разных типов, ставится подмножество сеансовых компонентов на сервере приложений, образующих соответствующий сервис пользователя. В основе каждого такого сервиса находится центральный сеансовый компонент с поддержкой состояний (EJB3 stateful session bean), обеспечивающий базовую логику сервиса и сохранение контекста между клиентскими соединениями. Запросы пользователя о реализации специфической логики приложений, такой, как, например, многомерный анализ медицинских данных для

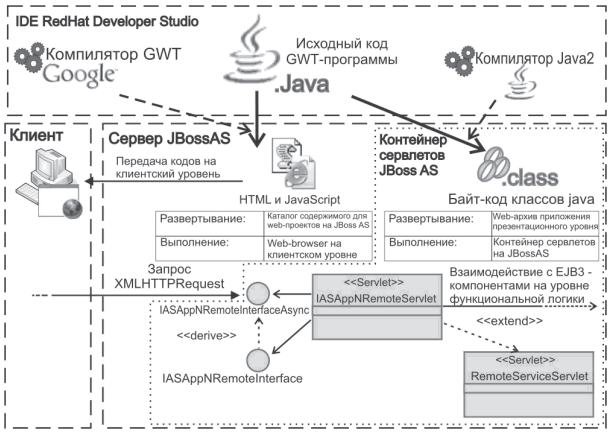


Рис. 1. Концепция архитектуры клиентского и представительского ярусов ИАС

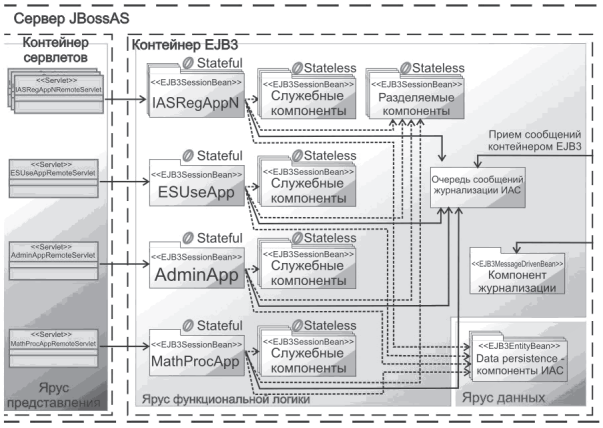


Рис. 2. Концепция архитектуры яруса функциональной логики ИАС

пользователя группы 4, выполняются обращением к библиотекам компонент, расширяющих функциональность базового сервиса и реализуемых в виде сессионных компонентов без поддержки состояний (EJB3 stateful session bean). Доступ к компонентам-сущностям (EJB3 entity beans) уровня постоянства данных (data persistence) выполняется из центрального сессионного компонента для каждого из прикладных сервисов. Доступ к каждому их сессионных компонентов уровня логики обеспечивается соответствующими сервлетами удаленных GWT-сервисов представительского яруса. Для сессионных компонентов применяется управление жизненным циклом от контейнера.

Пользователь-администратор, помимо Web- и JMX (Java Management Extension)-консолей, также использует специальный сервис, который включает необходимую функциональность для управления доступом пользователей ИАС к различным ее процессам, компонентам и сервисам, и реализует иные административные задачи. Кроме того, как видно из рис. 2, разграничение доступа к компонентам сервисов поддержано на уровне архитектуры ИАС: пользователь каждого типа может использовать только соответствующий набор компонентов.

Сверху вниз следуют цепочки компонентов для комплекса приложений медиков - узких специалистов, врача-диагноста ПНИ, системного администратора и пользователей группы математической обработки. Интерфейсы и сервисы в ИАС инженера по знаниям и разработчика компонуются базовыми приложениями.

Все события в ИАС регистрируются для нужд администрирования. Управляемый JMS (Java Message Service)-сообщениями компонент журнализации регистрирует в системном журнале сообщения, посылаемые сеансовыми stateful-компонентами в специальную очередь. Передача сообщений управляется EJB3-контейнером.

Классы, задействуемые приложением экспертной системы (далее ЭС) включаются в состав ear-архива комплекса приложений ИАС и развертываются на сервере JBoss AS в качестве API, составляющего функциональное ядро ЭС. Подсистема, компонуемая классами Jess Rule Engine и NRC FuzzyJ Toolkit, представляется завершенным, полнофункциональным решением для API обсуждаемой ЭС в силу следующих свойств[4]:

- Согласно определению задач, возложенных на компонент ЭС и реализуемых на уровне функциональной логики в ИАС, каждая из таковых получает в соответствие исчерпывающий набор функций, реализованный программно, в классах API;

- Предлагаемые средства изначально совместимы на уровне API и внутренних объектов, и предназначены для работы — концептуально — в одной проблемной области, и — программно и логически - в системной взаимосвязи;
- Объекты API предлагаемых средств возможно использовать в качестве единого интерфейса к ядру ЭС, включая ссылки на соответствующие классы в код приложения уровня бизнес-логики. На рисунке 3 приводится модель организации единого API ядра для ЭС.

Программный аппарат применения нечеткой логики и нечетких множеств, предоставля-

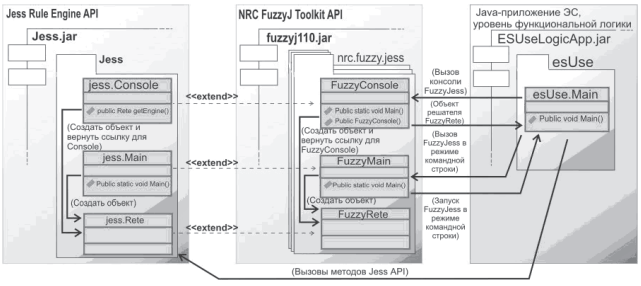


Рис. 3. Модель организации API-ядра ЭС его интеграции в ИАС

емый NRC FuzzyJ Toolkit, может быть использован автономно от Jess, равно как и средства Jess могут быть применены без привлечения поддержки нечеткой информации, однако целесообразно совместное использование этих средств, как слоистой системы. Средство и технология, предоставляемые в этом случае, имеют рабочее название FuzzyJess: фактически, логика системы Jess расширяется возможностями корреспондирующих классов системы NRC FuzzyJ Toolkit [4].

Архитектура яруса данных ИАС трехслойна и состоит из компонентов-сущностей, комплекса API доступа к данным в составе JBossAS, а также J2EE и JDBC-совместимого сервера баз данных Oracle 10g XE. Компоненты-сущности определены в рамках проектирования ИАС и соответствуют крупным автономным сущностям, представляемым логическими записями БД. На рис. 4, иллюстрирующем архитектурный принцип яруса данных ИАС, приводится соответствие компонентов-сущностей четырем крупным прикладным сервисам ИАС. Для компактности модели все выделенные сущности символизируются шестью логически группами, также в зависимостях сессионных компонентов не отображаются home-интерфейсы компонентов-сущностей.

Комплекс Java API яруса данных также трехслоен и последовательно включает: диспетчер персистентности — ORM-средство Hibernate, высокоуровневой интерфейс управления транзакциями JTA и интерфейс соединений с БД — JDBC. Такая инфраструктура позволяет отделить функциональность управления транзакциями, ORM-преобразования и поддержки персистентности от развертываемого кода ИАС, сконцентрировав в компонентах-сущностях последней логику предметной области по обработке данных. Для построения выражений запросов к БД могут быть использованы такие адаптации языка

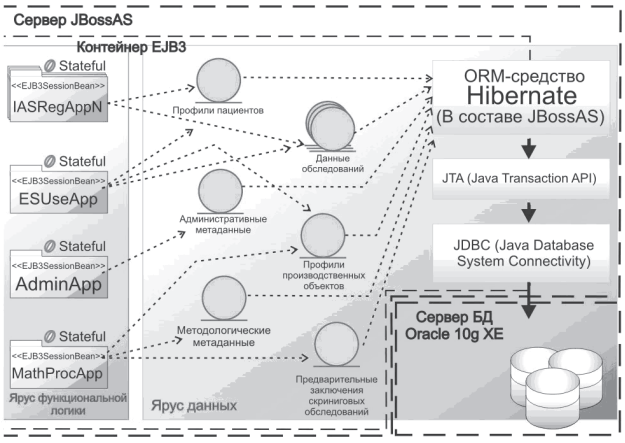


Рис. 4. Концепция архитектуры яруса данных ИАС

SQL, как EJB-QL и HQL. Выбор означенного сервера БД удовлетворяет полученным спецификациям ИАС.

Результирующая модель информационно-аналитической системы, представленная на рис. 5, сочетает представления ИАС как многослойной программной системы с MVC-представлением.

Таким образом, при решении задачи информатизации клинико-диагностического процесса в НИИ МТ и ЭЧ г. Ангарска выполняется проектирование комплексной информационно-аналитической системы, одной из главных функций которой устанавливается экспертная поддержка диагностики и прогнозирования профессиональных нейроинтоксикаций у работников химических предприятий. В рамках проектного процесса предложен и обоснован подход к построению архитектуры программной системы. Полученное решение,

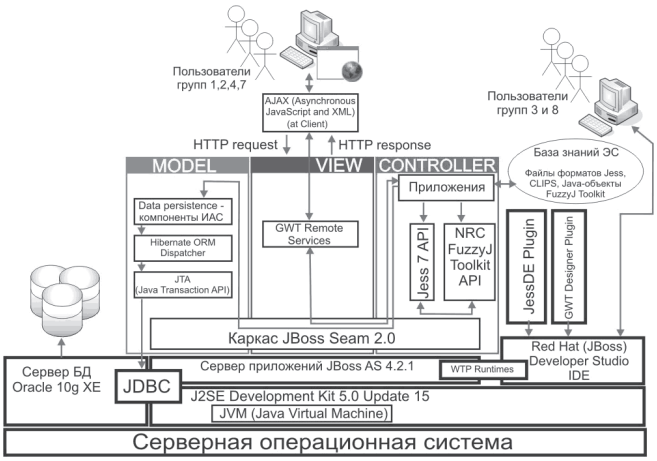


Рис. 5. Многоуровневое MVC-представление информационно-аналитической системы

ключевые элементы которого изложены в настоящей статье, основывается на зарекомендованных практикой стандартах и технологиях программной инженерии, реализует компонентный подход к разработке сложных корпоративных приложений и их комплексов, а также сочетает базу надежности и производительности с экономичностью и минимальной стоимостью владения результирующей системой.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Иванов А.Г. Подходы к разработке информационной технологии идентификации и прогнозирования профессиональных нейроинтоксикаций у работающих. /Труды XII Байкальской Всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении». Часть II. — Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2007. — 226-236 с.
2. Хавар Заман Ахмед, Кэри Е. Амриш, Разработка корпоративных Java-приложений с использованием J2EE и UML.: Пер. с. англ.- М.: Издательский дом "Вильямс", 2002.- 272 с.
3. Ноутон П., Шилдт Г., Java2: Пер. с англ. - СПб.: БХВ-Петербург, 2001.- 1072 с.
4. Иванов А.Г. Обзор современных программно — языковых средств экспертных систем в контексте задачи проектирования медицинской информационно — аналитической системы идентификации и прогнозирования профессиональных нейроинтоксикаций у работающих. /Труды XIII Байкальской Всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении». Часть II. — Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2008. — 116-124 с.

Степаненко А.С.

УДК 159.9:004.8

СОЦИАЛЬНО-КУЛЬТУРНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА. СИСТЕМНЫЕ АСПЕКТЫ

Искусственный интеллект возник благодаря социокультурным предпосылкам, которые сложились в рамках европейской культуры.

Выяснению социокультурных предпосылок искусственного интеллекта способствует концепция социокода, обоснованная в трудах ростовского философа и историка науки М.К. Петрова [1, 2]. Методологической основой такой концепции является положение, согласно которому человек в определенном смысле является микрокосмом общества, что выражается в развитии его Я в связи со сменой схем социального кодирования (социокода). Действительно, исследования последних десятилетий по типологии культуры обнаружили существование трех основных структурных ключей социального кодирования, а именно: *лично-именной, профессионально-именой и универсально-понятийный социокоды* [1].

I. *Лично-именной социокод* означает, что приобщение человека к социальной деятельности происходит при помощи имени-различителя, нагруженного определенным набором социальных ролей и обязанностей. Этот вечный ролевой набор транслируется в актах последовательной **передачи имени** от одного к другому. Человек проходит цикл: детство — зрелость —старость, поэтому имя — адрес у него меняется трижды — «трижды рождается и нарекается». В первый раз он как дитя человеческое получает неформальное обучение под руководством взрослых и стариков, во второй раз имя дается в обряде посвящения (это взрослое или охотничье имя несет набор ролевых функций активности члена племени) и в третий раз, доживший до старости, получает стариковское имя с его функцией социальной памяти и трансляции, свое же имя передает молодому. Это тип социокода присущ «пер-

вобытным» обществам и характеризует Я в качестве *временно исполняющего обязанности имени.*

*Профессионально-именной со*циокод (присущий в основном традиционным культурам) имеет ту же структуру и тот же принцип кодирования, что и лично-именной: корпус социально необходимого знания представлен конечным числом вечных имен с их ориентацией на вместимость человека. Однако конечный адрес здесь — уже не индивид, а некая группа единых по социальной функции людей (ремесло, профессия, каста), использующих вечное и общее для них имя в качестве хранителя, накопителя и транслятора группового знания-искусства. Профессионально-именной социокод характерен для земледельческих и скотоводческих обществ, в которых единое дело совершается малыми группами. В этих обществах почти 80% населения представляют собой земледельцев и скотоводов с унифицированным набором ролей, вокруг же этого ядра социальности складываются профессии ремесленников, воинов, чиновников.

Знание здесь профессионально. Таких групп множество, но унифицированное знание для каждой из них имеет имя бога, покровителя той или иной профессии. Такого рода божественные имена-различители позволяют посредством мифа вводить новое знание и распространять его. Покровительствующие профессиям боги также образуют семью по кровнородственному принципу, ибо профессии наследственны, передаются в семье от отца к сыну. Это обуславливает целостность и подвижность социокода, ибо можно вводить новые имена, «породив» их от уже существующих, что означает появление новых законов для появившихся очагов знания — Дике, Ананке, Плутос, Эрот древних греков. Благодаря этому традиционному социокоду накапливаются огромные массивы социально полезного знания.

Профессионально-именное или *традиционное* социальное кодирование характерно не только для древних цивилизаций Египта, Двуречья, Индии, Китая, но и для средневековых обществ традиционного типа, причем эта схема социального кодирования превосходила европейскую (универсально-понятийную) схему кодирования вплоть до XVI-XVII вв.

В плане философского анализа значимости искусственного интеллекта в жизнедеятельности современного человека существенно то, что с этим типом социокода связана еще большая выделенность Я, личности и индивидуальности из общности.

Традиционный способ кодирования знания явился исходным для тех событий в бассейне Эгейского моря (II тыс. до н.э.), которые стали основой для возникновения нового, *универсально-понятийного способа кодирования*. Произошло разрушение традиционной профессионально-именной схемы социального кодирования, а именно: совмещение профессий.

Последнее привело к огромным потерям знания и породило *Универсально-понятийный способ кодирования.*

Вошедшие в эллинскую цивилизацию чеканка монеты и алфавитное письмо явились условием и средством формализации нового социокода. Особенность этого социокода состоит в том, что *объем знаний ограничен теперь только потенциями языка.*

Жизнедеятельность человека теперь определяется гражданским законом, областью всеобщего, а не частного. Знаменитый Перикл так очертил эту грань: «Свободные от всякого принуждения в частной жизни, мы в общественных отношениях не нарушаем законов больше всего из страха перед ними и повинуемся лицам, облеченным властью в данное время» [3].

Здесь, как видим, был использован принцип универсального кодирования гражданских добродетелей, «умения жить сообща». С универсально-понятийным кодированием связаны не только рождение современной науки, но и все наши мечты о едином человечестве, о торжестве справедливости, о социальности, в которой свобода каждого является условием свободы всех. Благодаря этому социкоду выработаны такие абстракции, как «человек вообще» и «человечество», «гуманизм», «свобода», «целостный индивид», кои лежат в основе концепции человека — автора исторического процесса, самостоятельно вершащего «судьбу» социального целого, человека, развивающего все свои творческие потенции безотносительно к заранее заданным схемам.

Именно способность человека развивать все свои творческие способности безотносительно к заранее заданным схемам, его универсальное отношение к миру, обусловленное особенностями античного типа социального кодирования, лежит в основе социокультур-

ных предпосылок появления искусственного интеллекта.

Ведь универсально-понятийный социокод античности в его письменной форме открыл перед человеком невиданные ранее горизонты для его творчества, поиска нового. «Письменность как универсальный навык, как *грамотность* — отмечает М.К. Петров, - есть сама по себе слепая творческая способность, которая поднимает все поголовье грамотных, хотят они того или нет, к теоретическому творчеству, расставляет головы в позициях взаимного несоответствия и отличия, запрещает им повторять друг друга и требует от каждой головы, как головы грамотной, *нового текста*, нового индивидуального отношения к любому предмету, к которому уже существует какое-то отношение. Переход письменности в грамотность означает автоматический переход к новой психологической установке, к установке на поиски нового, ибо каждой грамотной голове приходится теперь *опредмечивать* наличные отношения к миру, *отрицать* их как заведомо неистинные или неполные, создавать свое особое, дополняющее до «истины» отношение, то есть постоянно находиться в творческом режиме анализа и синтеза нового» [2].

Таким образом, уже в античности появилась одна из **первых** социокультурных предпосылок возникновения искусственного интеллекта - ориентация человека на поиск нового и связанная с ним психологическая установка на творческую деятельность.

II. **Второй** социокультурной предпосылкой возникновения искусственного интеллекта является античная традиция мышления, прежде всего логики и философии.

В свое время логическую отправную точку генезиса идеи искусственного интеллекта сформулировал гений Аристотеля, или, как его называл Данте, «мастера тех, кто знает». Аристотель сумел объединить интуитивное понимание тайны и предчувствия ранней греческой традиции с тщательным анализом и строгим мышлением, которому стало стандартом для современной науки.

Аристотеля в природе привлекал такой ее аспект, как изменчивость — в фундаментальном труде «Физика» его «философия природы» определяется как «изучение изменяющихся вещей». Существенным в данном случае является проводимое им различие между *материей* и *формой*: например, скульптура сделана из *материи* бронзы и имеет *форму* человека (изменение происходит в тот момент, когда бронзе придают другую форму). Такое разделение материи и формы выступает в качестве философской основы для современных научных концепций, таких как символьное исчисление или абстракция данных [4]. В любом исчислении, в том числе и в работе с числами, человек манипулирует образами, которые являются формой электромагнитной материи, а изменения формы этой материи передают аспекты процесса расширения. «Абстрагирование формы от средства ее представления, - отмечает Дж. Люггер, - не только позволяет производить вычисления над этой формой, но и служит основой теории структур данных — ядра современных компьютерных наук» [5].

В «Метафизике» Аристотелем разработана теория неизменных вещей — космология и теология, однако ближе всего к искусственному интеллекту подходит аристотелевская эпистемология (теория научного познания), изложенная в его труде «Логика». Аристотель считал эту книгу важным инструментом познания, так как считал, что основой знания является изучение самой мысли. В «Логике» рассматриваются вопросы истинности суждений на основе их взаимосвязи с другими истинными утверждениями.

III. **Третьей** социокультурной предпосылкой генезиса искусственного интеллекта в виде устройства является тщательно разработанная в средневековой Европе концепция искусственной памяти. Как известно, история попыток создания искусственного подобия человеческого разума насчитывает более 700 лет [6]. Первую зафиксированную в истории попытку создания машины, моделирующей человеческий разум, связывают с именем испанского рыцаря, поэта, философа, богослова, алхимика, изобретателя Р. Луллия, который пытался читать лекции по искусственному интеллекту. В его времена ученые были заняты поиском неких универсальных понятий и истин, которые, будучи связанными между собой, давали бы общую, универсальную картину мироздания, а значит, и ответы на все интересующие человечество вопросы. Это был век философов-мудрецов, астрологов и алхимиков, занятых поисками философского камня.

Мировоззрение Р. Луллия сложилось под влиянием францисканства и учения Августина в полемике с аверроизмом и его учением о двойственной истине. Он рассмат-

ривал природу как символ бога, считая, что в каждой вещи отражены божественные совершенства. Поскольку человеческое знание согласуется с природой, постольку иерархии вещей соответствует иерархия понятий разума, которая может быть выражена «универсальной фигурой», или «логической машиной». Развивая традиции ученых своего времени, Р. Луллий сконструировал машину, состоявшую из системы кругов, имевших возможность вращаться, причем каждый круг был поделен на секторы, окрашенные в разные цвета и помеченные латинскими буквами. Круги соединялись друг с другом, и, приводя их во вращение, можно было получить различные сочетания символов и цветов — так называемую формулу истины.

Машины Р. Луллия могли работать в различных предметных областях и давать ответы на всевозможные вопросы, составлять гороскопы, ставить диагнозы болезней, делать прогнозы на урожай. В наиболее позднем варианте машина Р. Луллия состояла из 14 кругов, размеченных буквами и раскрашенных в различные цвета, которые символизировали различные понятия, элементы, стихии, субъекты и объекты знания. Круги приводились в движение системой рычагов. Поворачиваясь, они могли образовывать около 18 квадриллионов ($18 \cdot 10^{15}$) разнообразных сочетаний буквенных и цветовых «истин». Запросы в машину вводились с помощью внутреннего круга, на котором было начертано девять вариантов вопросов: Что? Почему? Из чего? Сколько? Каким образом? Где? Когда? Какое? Которое из двух? Таким образом, главное изобретение Р. Луллия — «логическая машина» - была изобретена для того, чтобы «чисто механическим путем установить происхождение всего наличного человеческого знания» [7]. Этот замысел, изложенный в основном трактате Р. Луллия «Великое искусство», пытался осуществить Г. Лейбниц в своем проекте «универсального языка». Этот проект был нацелен на то, чтобы все человеческое знание, включая эстетические принципы и философские истины, можно было получать автоматически. Идея «логической машины» сделала Р. Луллия средневековым предшественником современных исследований в области искусственного интеллекта.

Выражаясь современным языком, машина Р. Луллия, по-существу, представляла собой механическую экспертную систему, наделенную базой знаний, устройствами ввода и вывода, естественным языком общения. Свести к логическим операциям если не все знания о мире, то хотя бы часть из них, а затем поручить не человеческому мозгу, а механическому устройству процедуру вывода «формул знания», следующих из накопленной базы знаний, - эта идея искусственного интеллекта, впервые высказанная и реализованная средневековым рыцарем Р. Луллием, просуществовала семь веков и достигла в наши дни своего расцвета и триумфа.

IV. **Четвертой** социокультурной предпосылкой возникновения искусственного интеллекта стали идеи Ренессанса, основанные на греческой традиции, которые дали толчок развитию иного, мощного представления о человечестве и его роли в природе — на смену мистицизму как средству объяснения вселенной пришел эмпиризм с его математическим формализмом. Большинство современных социальных и физических теорий своими корнями уходит к выработанной тогда идее о возможности математического анализа и постижимости природных или искусственных процессов. Существенным является то обстоятельство, что было выработано понимание, что мышление само по себе как образ представления знаний является трудным, но принципиальным предметом для научного изучения.

Главным событием в развитии современных представлений стала революция, произведенная Коперником, когда «очевидная» геоцентрическая модель вселенной была заменена гелиоцентрической, и работы Галилея, чьи научные наблюдения еще больше расходились с «очевидными» истинами о мире. Ведь развитие им математики как инструмента для описания мира выявило разрыв между миром и нашими идеями о нем. «Именно из этой «бреши» развивалось современное представление о формировании разума: самоанализ стал важным мотивом в литературе, философы начали изучать эпистемологию и математику, и систематизированное применение научного метода стало соперничать с чувствами как орудиями познания мира» [5].

И если к этому прибавить результаты трудов Р. Декарта, которые лежат в основе развития современных концепций мышления и разума, то можно обнаружить значимость изложенного выше в качестве **пятой** социокультурной предпосылки возникновения искусственного интеллекта. На это обращает специально свое внимание Дж. Люггер: «1. Разде-

лив разум и физический мир, Декарт и его последователи установили, что строение идей о мире не обязательно соответствует изучаемому предмету. На этом основывается методология искусственного интеллекта, а также эпистемологии, психологии, большей части высшей математики и современной литературы: ментальные процессы существуют сами по себе, подчиняются своим законам и могут изучаться посредством себя же. 2. Поскольку разум и тело оказались разделенными, философы сочли нужным найти способ воссоединить их, ведь взаимодействие между умственным, *res cogitans*, и физическим, *res extensa*, необходимо для человеческого существования» [5].

V. Как известно, относительно проблемы «ума и тела» написано бесчисленное множество трудов и было предложено множество решений, однако ни одно из них не может принципиально объяснить очевидные взаимодействия между умственными состояниями и физическими действиями. Для области искусственного интеллекта наиболее приемлемым решением, дающим необходимое основание для изучения искусственного интеллекта, является ответ, согласно которому ум и тело отнюдь не принципиально разные сущности. Согласно данному подходу мыслительные процессы происходят в таких физических системах, мозг или компьютер, следовательно, умственные процессы, подобно физическим, можно, в конечном счете, описывать с помощью математического формализма.

Вполне естественно, что на основе такой методологии математик XIX в. Ч. Бэббидж может также считаться одним из первых практиков искусственного интеллекта [8]. «Разностная машина» Бэббиджа являлась специализированным устройством для вычисления значений некоторых полиномиальных функций и была предшественницей его «аналитической машины». Аналитическая машина, спроектированная, но не построенная при жизни Бэббиджа, представляет собой универсальное программируемое вычислительное устройство, которое предвосхитило многие архитектурные положения современных компьютеров. В этой машине реализован принцип «абстракции и манипуляции формой», впервые описанный Аристотелем.

Несмотря на то, что в XVIII-XIX вв. и начале XX в. формализация науки и математики создала интеллектуальные предпосылки для изучения искусственного интеллекта, он не стал жизнеспособной научной дисциплиной до появления цифровых вычислительных машин. Именно создание этих цифровых вычислительных машин является **шестой** социокультурной предпосылкой появления искусственного интеллекта. «К концу 1940-х гг. электронные цифровые компьютеры, - пишет Дж. Люггер, - продемонстрировали свои возможности в предоставлении памяти и процессорной мощности, требуемой для интеллектуальных программ. Стало возможным реализовать формальные системы рассуждений в машине и эмпирически испытать их достаточность для проявления разумности. Существенной составляющей теории искусственного интеллекта (ИИ) является взгляд на цифровые компьютеры как на средство создания и проверки теорий интеллекта» [5].

Однако цифровые компьютеры представляют собой не только устройства для испытания теорий интеллекта, ибо их архитектура наталкивает на специфичное представление таких теорий: интеллект оказывается способом обработки информации [9]. Например, концепция поиска как методики решения задач обязана своим появлением в большей степени последовательному характеру компьютерных операций, чем какой-либо биологической модели интеллекта. «Большинство программ ИИ представляют знания на некотором формальном языке, а затем обрабатывают их в соответствии с алгоритмами, следуя заложенному еще фон Нейманом принципу разделения данных и программы. Формальная логика возникла как важный инструмент представления для исследования ИИ, равно как теория графов играет неоценимую роль в анализе пространства, а также представляет основу для семантических сетей и схожих моделей» [5]. Эти методы и формализмы необходимы для подчеркивания симбиотических отношений между цифровыми компьютерами и теоретическими основами искусственного интеллекта.

Все приведенные выше рассуждения опираются на логику как способ представления языка и логические выводы как основной механизм разумных рассуждений, которые настолько доминирует в западной философии, что из «истинность» часто кажется очевидной и неоспоримой. «Поэтому не удивительно, что подходы, основанные на этих предположениях, главенствует в науке искусственного ин-

теллекта от ее зарождения до сегодняшнего дня» [5].

Однако сейчас в области искусственного интеллекта в качестве методологической основы используются идеи Витгенштейна об антропологических и культурных корнях знания. Это заставило специалистов в области искусственного интеллекта обратиться к социальным моделям интеллектуального поведения, что является **седьмой** социокультурной предпосылкой. Примером альтернативы логическому подходу являются исследования в области коннекционистского обучения, когда логике и работе рационального разума уделяется мало внимания и когда делаются попытки достичь разумности посредством моделирования архитектуры реального мозга. В нейронных моделях интеллекта упор делается на способность мозга адаптироваться к миру, в котором он существует, с помощью изменений связей между отдельными нейронами. Знание в таких системах не выражается явными логическими конструкциями, а представляется в неявной форме, как свойство конфигураций таких взаимосвязей.

Восьмой социокультурной предпосылкой развития искусственного интеллекта выступает модель интеллекта, заимствованная из биологии, с ее процессами адаптации видов к окружающей среде. В разработках искусственной жизни и генетических алгоритмов принципы биологической эволюции применяются для решения сложных проблем — такого рода программы не решают задачи посредством логических рассуждений. «Они порождают популяции соревнующихся между собой решений-кандидатов и заставляют их совершенствоваться с помощью процессов, имитирующих биологическую эволюцию: неудачные кандидаты на решения отмирают, в то время как подающие надежды выживают и воспроизводятся путем создания новых решений из частей «успешных» родителей» [5].

Девятая социокультурная предпосылка развития искусственного интеллекта состоит в широком распространении автоматизированных технологий, которое началось, по-видимому, в 40-50 годах ушедшего XX века.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Петров М.К. Язык, знак, культура. М. 1991. 272 с.
2. Петров М.К. Искусство и наука. Пираты Эгейского моря и личность. М.: 1995. - 316 с.
3. Фукидид. История. - М. Наука. - 1988. - 712 с.
4. Вольренгаген В.Э. Категориальная абстрактная машина. М.: 2002. 416 с.
5. Люгер Дж.Ф. Искусственный интеллект. Стратегия и методы решения сложных проблем. пер. с англ. / Дж. Ф. Люгер. - 4-е изд. - М. Вильямс. 2003. - 864 с.
6. Yates F.A. Sztuka pamieci. W. 1977. - 213 p.
7. Философский словарь / Под ред. И.Т. Фролова. - М.: 1996. - 780 с.
8. Morrison P., Morrison E. Charks Babbage and his calculating machines. №9. - 1961. pp. 72-79.
9. Нильсон Н. Принципы искусственного интеллекта - М.: 1985. - 412 с.

Марцынковский Д.А., Резник А.Ю. УДК 001.4.658.382.3:006.354

МЕТОДОЛОГИЯ, ПРИНЦИПЫ И ПОДХОДЫ ИНТЕГРАЦИИ СИСТЕМ МЕНЕДЖМЕНТА

Законы рыночных отношений в условиях глобализации мировой экономики требуют от современного бизнеса постоянного баланса между максимально возможным удовлетворением запросов всех заинтересованных сторон (акционеров, инвесторов, потребителей, органов государственного управления, общества), конкурентным давлением и безусловным соблюдением законодательных и отраслевых требований. Достижение и поддержание такого баланса гарантирует предприятиям перспективу устойчивого и успешного развития, а поэтому во многих случаях является корпоративной целью. Для ее достижения топ-менеджмент использует стратегические программы, в том числе ориентированные на внедрение стандартизированных требований для разработки, поддержания и развития формализованных систем менеджмента, имеющих международное признание. Последние рассматриваются в качестве реальных и действенных инструментов для увеличения прибылей и расширения возможностей организации, за счет системного управления рисками и постоянного улучшения. В результате этого, все стороны, заинтересованные в деятельности предприятия, вправе ожидать:

a) повышения конкурентоспособности продукции;

b) снижения издержек;

c) увеличения прибыли, рентабельности, оборотных средств и скорости окупаемости инвестиций;

d) смягчения воздействия на окружающую среду;

e) снижения профессиональных рисков и последствий от несчастных случаев на производстве;

f) обеспечения социальной защищенности персонала.

В настоящее время большинство организаций находятся на разных стадиях внедрения, сертификации и дальнейшего развития систем менеджмента в соответствии с требованиями различных международных стандартов и/или технических условий и спецификаций, например: ISO 9001, ISO 14001, OHSAS 18001, ISO/TS 16949, ISO 22000, ISO/IEC 27001, ISO/IEC 20000 и др. Например, в России и странах СНГ в течение последних 10 лет наблюдается устойчивый рост организаций, которые работают в данном направлении.

Характерной особенностью для значительного числа из этих организаций является их стремление внедрить на предприятии сразу или последовательно несколько моделей системы менеджмента. В качестве наиболее типичного примера можно рассматривать практику разработки системы менеджмента качества (СМК) на базе требований ISO 9001, системы экологического менеджмента (СЭМ) на базе требований ISO 14001 и/или системы менеджмента профессиональной безопасности и охраны труда (СМПБОТ) на базе требований OHSAS 18001.

Часто эти системы функционируют как независимые автономные модели, которые ориентированы на удовлетворение требований различных заинтересованных сторон, например:

1. система менеджмента качества (ISO 9001) должна в первую очередь отвечать интересам потребителей предприятия за счет удовлетворения их требований;

2. система экологического менеджмента (ISO 14001) должна отвечать интересам общества в целом за счет минимизации негативного воздействия от производственной деятельности предприятия на окружающую среду;

3. система менеджмента профессиональной безопасности и охраны труда (OHSAS 18001) должна отвечать интересам персонала предприятия за счет минимизации рисков в области производственной безопасности.

Однако практика неоспоримо свидетельствует, что одновременное функционирование нескольких автономных систем, как правило, сопряжено с рядом проблем:

a) дублирование отдельных требований порождает внедрение нескольких процедур, одинаковых по целям (например: процедуры управления документацией и записями; процедуры управления внутренними аудитами и др.);

б) возникновение противоречий между приоритетностью в требованиях различных систем менеджмента (например: статус и роль представителей руководства по качеству и экологической безопасности; ресурсы на обеспечение качества и реализацию экологических программ, др.);

в) отсутствия единого действенного механизма или наличие одновременно нескольких, но плохо сочетающихся между собой, механизмов реагирования на дестабилизирующие факторы внешней и внутренней среды организации.

Как следствие, вышеперечисленные проблемы неизбежно приводят к появлению конфликтности между различными системами менеджмента, сопровождающейся снижением управляемости бизнесом, отторжением персоналом требований документов систем менеджмента и порождает эффект «лебедя, рака и щуки», что далеко не лучшим образом сказывается на эффективности функционирования таких системы менеджмента.

При этом, практически в любом из международных стандартов ISO можно выделить общие элементы, которыми целесообразно управлять унифицированным способом, используя интегрированный подход. Это обстоятельство оправдывает желание объединить данные системы в единую интегрированную систему менеджмента (ИСМ) с большей или меньшей степенью интеграции. Кумулятивный эффект от интеграции общих требований к системе управления предприятием позволит эксплуатировать эти системы менеджмента с максимальным эффектом.

Зачастую под термином «интеграция систем менеджмента» ошибочно понимается механическое объединение требований различных стандартов на системы управления, которые внедряет предприятие. При этом игнорируется необходимость создания **единого** механизма, позволяющего достигать цели организации за счет выполнения требований применяемых стандартов на системы менеджмента.

В тоже время философия современного менеджмента выделает три основных аспекта, которые обеспечивают устойчивое развитие бизнеса любой организации:

1. соответствие результатов деятельности (например, таких как: продукции, воздействий на внешнюю среду и персонал) требованиям заинтересованных сторон и применимым законодательным и отраслевым требованиям;

2. управление рисками организации при реализации ее стратегии и достижении поставленных целей;

3. интеграция всех процессов, реализуемых в компании, в единую консолидированную систему, представляющую собой целостный механизм управления организацией.

Таким образом, к основным причинам необходимости интеграции систем менеджмента можно отнести:

а) достижение соответствия всем применимым требованиям;

б) управление рисками организации;

в) улучшение имиджа организации;

г) снижение непроизводственных затрат;

д) улучшение взаимодействия с контролирующими, законодательными и надзорными органами;

е) снижение загрязнения окружающей среды;

ж) уменьшение вероятности возникновения инцидентов и аварий;

з) улучшение условий труда и безопасности на рабочем месте;

и) требования акционеров и инвесторов.

Интегрированная система менеджмента (ИСМ) представляет собой совокупность не менее двух систем менеджмента, отвечающим требованиям двух и более стандартов систем менеджмента, ориентированных на различные заинтересованные стороны, и функционирующих в организации, как единое целое.

ИСМ обеспечивает большую согласованность действий внутри организации, усиливая тем самым синергетический эффект, заключающийся в том, что общий результат от согласованных действий выше, чем простая сумма отдельных результатов. В целом он заключается в следующем:

1) ИСМ минимизирует функциональную разобщенность персонала в организации, возникающую при разработке автономных систем менеджмента;

2) создание интегрированной системы, как правило, значительно менее трудоемко, чем нескольких параллельных систем. Затраты на разработку, функционирование и сертификацию интегрированной системы ниже, чем суммарные затраты при нескольких системах менеджмента;

3) ИСМ позволяет лучше учитывать баланс интересов внешних сторон организации, чем при наличии параллельно функционирующих систем;

4) достижение большей «прозрачности» и управляемости, т.к. число внутренних и внешних связей в интегрированной системе меньше, чем суммарное число этих связей в нескольких системах;

5) объем документов в интегрированной системе значительно сокращается по сравнению с суммарным объемом документов в нескольких параллельных системах, (в интег-

рированной системе достигается более высокая степень вовлеченности персонала в улучшение деятельности организации);

6) повышается эффективность объединенной системы менеджмента за счет использования совместных действий в интегрированной системе, таких как определение политики, планирование, подготовка персонала и т.д. (больше внимания уделяется общим целям бизнеса);

7) интеграция способствует также уменьшению конфликтности и вероятности возможных противоречий между вопросами, связанными с качеством, экологией и безопасностью, более целостному подходу к повышению рентабельности, более эффективному использованию ресурсов, улучшению слаженности процесса обмена информацией, исключению дублирования процессов (переход к риск-менеджменту становится актуальным и необходимым).

Таким образом, от интеграции систем менеджмента можно ожидать следующие основные выгоды для бизнеса:

1) улучшенное планирование и повышение эффективности деятельности;

2) обеспечение целостного подхода к управлению рисками;

3) меньшая степень конфликтности между системами;

4) уменьшение дублирования и бюрократии;

5) большая результативность и эффективность внутренних и внешних аудитов;

6) использование перспективных возможностей улучшения;

7) экономия ресурсов;

8) улучшенные взаимоотношения с заинтересованными сторонами;

9) повышение качества информации для принятия решений;

10) рост деловой репутации и поддержка со стороны учредителей.

На сегодняшний день отсутствует какой-либо международный стандарт, определяющий общие требования, руководящие указания и подходы к созданию ИСМ и формирующий единую структуру для интеграции систем менеджмента. Данное обстоятельство приводит к тому, что интеграция систем менеджмента зачастую носит формальный характер и не приносит ожидаемых результатов и выгод.

Необходимо отметить, что большинство публикаций, представленных как в отечественной, так и в зарубежной литературе, описывают элементы методологии формирования интегрированной системы менеджмента, основанной только на трех стандартах (ISO 9001:2000, ISO 14001:2004, OHSAS 18001:2007), что накладывает определенные ограничение на использование данных наработок. В зарубежной литературе среди ряда работ по данной теме наиболее полными и научно обоснованными (по мнению автора) являются:

1) общедоступные технические условия, разработанные Британским институтом стандартов (BSI) PAS 99:2006. «Спецификация общих требований системы менеджмента, как структура для интеграции» ("Specification of common management system requirements as a framework for integration");

2) объединенный стандарт Австралии и Новой Зеландии AS/NZS 4581:1999. «Интеграция систем менеджмента — Руководство для частных, правительственных и общественных организаций» ("Management system integration — Guidance to business, government and community organizations").

При этом необходимо отметить, что PAS 99:2006 содержит унифицированные требования к интеграции систем менеджмента без раскрытия данных требований в контексте общих подходов и принципов формирования ИСМ (в свою очередь, AS/NZS 4581:1999 содержит руководящие указания по использованию ряда элементов и принципов интеграции систем менеджмента в контексте только трех стандартов (ISO 9001:2000, ISO 14001:2004; OHSAS 18001:2007 без рассмотрения их в аспекте практического применения).

В 2008 году Ассоциацией по сертификации «Русский Регистр» была опубликована работа, посвященная интеграции систем менеджмента, в которой была представлена унифицированная модель с требованиями к ИСМ, сформированная на основании лучшего отечественного и зарубежного опыта, в том числе и практических наработок ведущих специалистов Ассоциации по сертификации «Русский Регистр», [1].

Философия современного менеджмента в настоящее время выделяет ряд общесистемных этапов функционирования систем менеджмента, которые позволяют последовательно и на регулярной основе достигать поставленные цели и постоянно улучшать как результативность, так и эффективность системы управления.

В качестве основы для интеграции предлагается использовать модель структуры системы менеджмента, представленную в ISO Guide 72:2001 [1]. В ней можно выделить шесть унифицированных общих элементов для интеграции систем менеджмента:

1. политика;
2. планирование;
3. внедрение и функционирование;
4. оценка показателей деятельности;
5. улучшение;
6. анализ со стороны руководства.

Специалистам известно, что наряду со специфическими требованиями к системе ме-

неджмента, в каждом стандарте содержатся эти шесть элементов. Поэтому именно они могут послужить хорошей основной для модели интегрированной системы менеджмента [1].

Шесть общих вышеупомянутых элементов следует рассматривать через цикл P-D-C-A, который используется в качестве методологической основы практически всех моделей менеджмента.

Представленная ниже модель интеграции определяет общие требования, содержащиеся в стандартах системы менеджмента, и предназначено для проведения анализа и внедрения общим способом двух или более стандартов системы менеджмента. Те требования стандартов, которые не являются общими, должны рассматриваться, как специфические, в дополнение к тем, которые рассматриваются в настоящей модели, (рис. 1).

На рис. 2 представлена взаимосвязь между структурными элементами интегрированной системы менеджмента и этапами цикла P-D-C-A.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Руководство к интеграции систем менеджмента / Д. А. Марцынковский, А. В. Владимирцев, О. А. Марцынковский; Ассоциация по сертификации «Русский Регистр». Санкт-Петербург: Береста, 2008. 72 с.

Рис. 1. Архитектура интегрированной системы менеджмента

Рис. 2. Взаимосвязь между циклом P-D-C-A и элементами ИСМ

ПАМЯТИ УЧЕНЫХ

(перепечатано из Трудов VIII Всероссийской научной конференции "Нелинейные колебания механических систем" Нижний Новгород. 2008. Том 1. С. 55-62)

13 августа 2006 года ушел из жизни талантливый ученый, замечательный педагог и просто хороший человек - **ЮРИЙ ИСААКОВИЧ ГОРОДЕЦКИЙ,** доктор технических наук, профессор, почетный работник высшего профессионального образования России. Ушел неожиданно для всех, ни с кем не попрощавшись, так как не подозревал коварства болезней сердца. Его смерть буквально ошеломила всех, кто его знал, кого он учил, с кем он работал, с кем дружил. Несмотря на отпускную пору, проститься с Юрием Исааковичем пришло много народу, и это были люди разных возрастов и поколений - от студентов, которым еще нужно учиться, до тех, чьим учеником был он сам.

Родился Юра Городецкий 12 марта 1930 г. в рабочем поселке Большое Козино и после окончания школы поступил на физико-математический факультет Горьковского университета, который и окончил в 1953 г. по специальности «механик-теоретик». Окончив университет, он не порвал с ним, а связал всю свою дальнейшую жизнь. С 1953 по 1964 г. - он ассистент, старший преподаватель кафедры геометрии и высшей алгебры, а затем кафедры теории управления и динамики машин. В 1964 г. в г. Горьком создается научно-исследовательский институт прикладной математики и кибернетики (НИИ ПМК), и первым заместителем директора института по научной работе становится Юрий Исаакович Городецкий. Вопросы формирования тематики института, кадровые вопросы, создание материально-технической базы - все эти вопросы и многие другие, возникающие при создании НИИ, приходилось решать молодому по тем временам руководителю. В этой должности Юрий Исаакович проработал до 1971 г., возглавляя затем до 1989 г. лабораторию динамики машин и процессов механической обработки. Полученные им научные результаты позволили ему в 1987 г. успешно защитить докторскую диссертацию.

Занимаясь научной работой, Юрий Исаакович не оставлял и педагогической деятельности. Он разрабатывал и читал спецкурсы, руководил курсовыми и дипломными работами студентов, специализирующихся на кафедре теории управления и динамики машин. 1 сентября 1989 г. он встретил уже в качестве заведующего кафедрой прикладной математики факультета вычислительной математики и кибернетики (ВМК), по-прежнему возглавляя лабораторию динамики машин и процессов механической обработки. В 1990 г. он получил звание профессора. Юрий Исаакович руководил кафедрой до 2000 г., перейдя затем на должность профессора кафедры и оставаясь им до самых последних дней.

Ю.И. Городецкий был известным ученым в области динамики машин, теории колебаний и ее приложений в машиностроении. В одной из справок, без которых наша жизнь, кажется, невозможна, Юрий Исаакович писал: *«Основным предметом моей научной; деятельности являются теоретическая механика, динамика машин, теория колебаний, автоматизация в научных исследованиях и их приложения в машиностроении. Значительное место в моей научной деятельности занимают вопросы автоматизации экспериментальных исследований динамических систем и создания информационных систем на базе новых компьютерных технологий».*

Наиболее важные результаты получены им по следующим направлениям:

-исследование устойчивости и возбуждения автоколебаний распределенных и много мерных систем с запаздыванием;

-решение теоретических и прикладных вопросов, связанных с проблемой гашения вибраций при резании металлов;

-разработка методов теории чувствительности и их приложение к анализу и синтезу сложных Механических систем;

-математическое моделирование сложных колебательных систем в связи с созданием САПР и решением оптимизационных задач в машиностроении.

Вот только некоторые из этих результатов:

По первому направлению решена задача И.Н. Вознесенского о влиянии гидравлического удара на устойчивость регулирования гидротурбины, задача об устойчивости систем автоматического регулирования газокомпрессорных станций, задача об устойчивости процесса глубокого сверления и точения длинных валов в распределенной постановке и др.

Это позволило создать единую методологию исследования устойчивости распределенных систем, исключающую проверку условий грубости.

По второму направлению создана методика построения адекватных математических моделей, описывающих колебания металлорежущих станков, на основе анализа геометрических схем связей, -эффекта регенерации колебаний и использования теории чувствительности. Экспериментальным путем показано, что при точении длинных валов и растачивании глубоких отверстий возможен жесткий режим возбуждения автоколебаний. Это позволило разработать методы исследования нелинейных явлений при резании металлов с использованием понятия абсолютной устойчивости и устойчивых интегральных многообразий в многомерном фазовом пространстве. Для решения задач устойчивости и возбуждения автоколебаний предложена и реализована в виде информационной системы сбора, ввода и обработки экспериментальной информации в ПЭВМ методика получения чистых моделей динамики резания металлов, создана база данных о модулях и фазах динамических характеристик процесса резания для различных технологических параметров и типов резцов. С помощью метода D-разбиения проведены исследования устойчивости сверлильных, токарных, карусельных и фрезерных станков.

По третьему направлению для диссипативных систем построены функции чувствительности собственных частот, резонансных амплитуд и логарифмических декрементов затухания многомерных и распределенных динамических систем по отношению к параметрам математических моделей и проектным параметрам объекта. Теория чувствительности была использована для поиска чувствительных параметров и рационального проектирования при решении задач снижения уровня вибраций и шумов в салоне легкового автомобиля, управления спектром собственных частот силового агрегата и трансмиссии, улучшения плавности хода автомобиля и повышения его путевой устойчивости. Сочетание разработанных методов с понятием геометрической схемы связей позволило создать эффективные методы поиска наиболее значимых механизмов самовозбуждения колебаний в конкретных системах.

Разработанные подходы использованы для построения упрощенных математических моделей, описывающих колебания электрододержателей мощных дуговых сталеплавильных печей, и их исследования.

В рамках четвертого направления решались конкретные задачи рационального и оптимального проектирования: многопараметрической многокритериальной оптимизации консольных вертикально-фрезерных станков по критериям их виброустойчивости и динамической податливости, оптимизации вибротрамбовок, рационального выбора параметров подвески легкового автомобиля при случайном воздействии дороги на шины автомобиля, структурной оптимизации станков для магнитно-абразивной обработки турбинных лопаток.

Перечень направлений исследований и полученных результатов как нельзя точнее показывают, что Ю.И. Городецкий всегда решал конкретные прикладные задачи, продиктованные потребностями науки и техники. Другим, не менее ярким, подтверждением актуальности проводимых им исследований может служить перечень предприятий и учреждений, внедривших результаты этих исследований в свои разработки и технологические процессы. Среди них нижегородские - автозавод, НИИИС, завод «Гидромаш», ОКБ среднего машиностроения. К советам ученого прислушивались на Павловском автобусном заводе и Выксунском металлургическом комбинате. Об известном «прикладнике» знают на Череповецком металлургическом комбинате и Дмитровском заводе фрезерных станков, в авиационных КБ им. Микояна и им. Мясищева.

Результаты исследований приведены в соответствующих научно-технических отчетах, доложены на многих конференциях, школах,

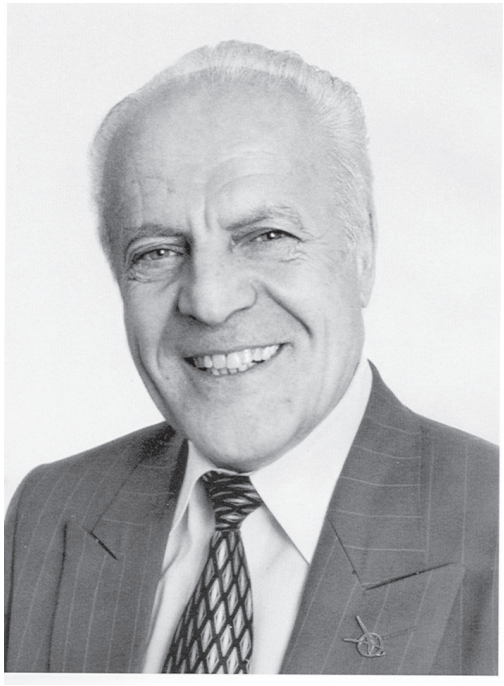
семинарах. Им опубликовано более 150 работ, получено 5 авторских свидетельств, около 10 его учеников защитили кандидатские диссертации. Вышла монография Ю.И. Городецкого «Функции чувствительности и динамика сложных механических систем», включающая в себя многие из высказанных им идей и полученных результатов.

Имя профессора Ю.И. Городецкого хорошо известно ученым и производственникам, занимающимся проблемами механики и машиностроения. Он был членом Научного совета Российской Академии наук по проблемам машиноведения и технологических процессов, руководителем секции при Региональном проблемном Совете Верхневолжского отделения РАН, членом Ученого совета факультета ВМК, членом трех советов по защите кандидатских и докторских диссертаций.

Юрий Исаакович вел большую учебно-методическую и организационную работу: он принимал активное участие в разработке программ по подготовке бакалавров, специалистов и магистров, специализирующихся по прикладной математике и информатике на факультете ВМК ННГУ, разработал и прочитал общий курс лекций по математической физике (теория функций комплексного переменного, вариационное и операционное исчисление, матфизика), читает курс лекций по теоретической механике (классическая механика, аналитическая механика) и спецкурсы: для магистров - "Теория устойчивости распределенных систем ", для специалистов - "Математические модели и методы анализа и синтеза сложных колебательных механических систем" Ю.И. Городецкий написал шесть методических пособий и лабораторных работ с использованием современных компьютерных технологий, которые используются для обучения студентов.

Юрий Исаакович - бессменный организатор международных и всероссийских конференций «Нелинейные колебания механических систем», последняя из которых, седьмая, прошла осенью 2005 г. Он организовал и провел две международные конференции «Динамика станков». Был он в составе оргкомитетов и многих других конференций.

Труд Ю.И. Городецкого отмечен правительственными наградами и другими знаками отличия: медали «50 лет победы в Великой Отечественной войне», «За доблестный труд», «Ветеран труда», нагрудный знак Государственного Комитета СССР по народному образованию «За отличные успехи в работе».



* * *

18 ноября 2007 года умер академик **КОНСТАНТИН ВАСИЛЬЕВИЧ ФРОЛОВ** - выдающийся ученый в области машиноведения - фундаментальной научной базы машиностроения, создатель научной школы ученых-машиноведов, крупный организатор и неутомимый энтузиаст интенсивного развития отечественной науки, талантливый педагог, активный общественный деятель, основоположник ряда актуальных научных направлений, широко известных и признанных в России и за рубежом.

Константин Васильевич родился 22 июля 1932 года в г. Кирове на Калужской земле, исторически благодатной для формирования энергичного, целеустремленного, стойкого характера, выдающейся личности (близкие нам исторические примеры: основоположник космонавтики К.Э. Циолковский; маршал Г.К. Жуков). Склонность КВ. Фролова к научной работе проявилась еще во время учебы на кафедре «Турбостроение» в Брянском институте транспортного машиностроения, который он окончил с отличием. Его первый научный труд опубликован в 1957 г. и был посвящен вибрациям лопаток.

Важную роль в дальнейшей ориентации среди проблемных и перспективных направлений научно-технического прогресса сыграла работа на одном из крупнейших предприятий энергетического машиностроения — Ленинградском механическом заводе: в конструкторском бюро и затем - в лаборатории паровых и газовых турбин.

Именно паровые и газовые турбины концентрировали в себе самые передовые достижения науки и техники, способные обеспечить эффективную работу при всё более высоких температурах, сверхвысоких давлениях, больших скоростях рабочего тела в условиях опасных вибраций лопаток турбин и напряженных элементов конструкций. По мере увеличения быстродействия механизмов, машин и их комплексов, характерного для новых поколений машин и прогрессивных технологий, проблемы вибраций становятся все более актуальными в науке и технике.

К.В. Фролов посвятил себя системному фундаментальному изучению вибраций в их многообразном проявлении в механизмах и машинах в различных эксплуатационных условиях, включая экстремальные. Институт машиноведения Академии наук привлек внимание К.В. Фролова фундаментальным подходом к научному творчеству в области становления и развития науки о машинах.

В 1958 г. К.В. Фролов поступил в аспирантуру Института машиноведения. Уже в 1961 г. он участвовал в Международном симпозиуме по нелинейным колебаниям (г. Киев), выступил с докладом «О моделировании резонансных свойств некоторых автономных нелинейных колебательных систем». В 1962 г. ему присуждена ученая степень кандидата технических наук за диссертацию «Влияние свойств источника энергии на колебания автономных систем». В 1967 г. он участвовал в IV Международной конференции по нелинейным колебаниям (Чехословакия); выступил с докладом «Параметрические и автопараметрические колебания нелинейных механических систем».

В 1970 г. К.В. Фролову была присуждена ученая степень доктора технических наук за диссертацию «Колебания в машинах с переменными параметрами в приложении к динамике силового гидропривода». В 1971 г. он утвержден в звании профессора.

С 1975 г. и до последнего дня жизни К.В. Фролов был директором Института машиноведения им. А.А. Благонравова АН СССР (ныне - Российской академии наук). В 1976 г. - избран членом-корреспондентом Академии наук СССР, в 1984 г. - избран действительным членом Академии наук СССР.

В качестве бессменного директора Института машиноведения им. А.А. Благонравова Академии наук, в бытность академиком-секретарем Отделения проблем машиностроения, механики и процессов управления и вице-президентом Академии наук академик, К.В. Фролов приложил много сил к консолидации научно-технического потенциала страны для решения важнейших проблем приоритетного развития машиностроения - основы технического, экономического и социального развития государства. Он внес неоценимый вклад в развитие теоретических и экспериментальных исследований в области технических наук, в подготовку научно-технических кадров, в установление научных связей с ведущими зарубежными академиями, университетами и исследовательскими организациями.

В последнее время академик К.В. Фролов осуществлял активную научно-организационную деятельность, будучи председателем «Рабочей группы при Президенте РАН по анализу риска и проблемам безопасности», заместителем академика-секретаря Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН, председателем Объединенного Научного совета РАН по комплексной проблеме «Машиностроение» и генеральным директором Ассоциации «Объединенный институт машиноведения» Российской академии наук.

Под руководством академика К.В. Фролова Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН стал ведущим научным центром, объединившим ряд созданных по его инициативе филиалов и институтов в промышленных регионах страны (в гг. Санкт-Петербурге, Нижнем Новгороде, Самаре, Волгограде и Екатеринбурге) и успешно решающим важнейшие проблемы машиностроения XXI века.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН организовал разработку ряда новых фундаментальных научных проблем, актуальных для ускоренного развития машиностроения. Среди них - обеспечение прочности, надежности и долговечности ядерных реакторов различного типа, а также авиационно-космических и транспортных систем; создание и применение новых машиностроительных материалов и упрочняющих технологий с целью повышения ресурса и безопасности объектов атомного, транспортного, энергетического и авиакосмического машиностроения; создание роботов новых поколений и автоматизированных заводов.

Институтом машиноведения совместно с МГТУ им. Н.Э. Баумана, МЭИ, ИВМ СО РАН, ОКБ «Гидропресс», КБ «Химавтоматика» и другими организациями разработана многокритериальная система расчетной оценки важнейших показателей работоспособности (надежности, прочности, ресурса) машин и конструк-

ций на всех стадиях их жизненного цикла. Результаты разработок необходимы для реализации крупных проектов в атомной и тепловой энергетике, авиационной и ракетно-космической технике, нефтегазовых комплексах.

Совместно с Институтом проблем механики РАН и МНТК «Робот» разработаны основы теории, методы расчета и построения миниатюрных роботов с водородными термосорбционными приводами линейного типа динамического принципа действия с целью их применения в машиностроении, в энергетике, в критических технологиях наноиндустрии и микросистемотехники. Также совместно с ИЦ ОКБ им. АИ. Микояна разработана не имеющая аналогов модель действия человека-оператора в контуре управления движущимся объектом, Учитывающая психофизические возможности человека-оператора, оказывающие существенное влияние на динамику контура управления объекта (самолета, космического корабля и т.п.).

Существенное развитие получили научные исследования и опытно-конструкторские работы в области снижения виброакустической нагруженности машин, а также в области трибологических систем, используемых в экстремальных условиях (в том числе - в космосе).

Отдавая много времени и сил руководству Институтом машиноведения, К. В. Фролов никогда не прерывал свое непосредственное участие в научных исследованиях. Им впервые в отечественной практике создан уникальный виброиспытательный комплекс для оценки эффективности виброзащитных систем, позволяющий воспроизводить реальные условия эксплуатации различных видов механизмов и машин.

На базе исследований, выполненных КВ. Фроловым, разработаны методы оптимального проектирования машин вибрационного действия в управляемом околорезонансном режиме и современные вибротехнологии. Под его руководством и при его прямом участии были разработаны основы создания машин в малошумном исполнении.

Академик К.В. Фролов был лидером весьма перспективной области науки - «вибрационная биомеханика систем», возникшей на стыке эргономики и биомеханики и послужившей становлению и развитию исследований сложнейшей комплексной системы «объект техносферы - оператор - природная среда» - нового направления машиноведения.Первостепенное значение имеют результаты научных работ К. В. Фролова в области перспективных направлений нелинейной теории колебаний и динамики механических систем, биомеханики и жизненно важных физиологических процессов в человеческом организме при воздействии на него вибрационных, акустических, световых и электромагнитных полей. Им созданы оригинальные методы и средства защиты человека, машины и окружающей среды от этих воздействий, а также диагностики и мониторинга опасных состояний каждого из компонентов и всей системы в целом.

Одним из важнейших достижений развития биомеханики систем стала научно обоснованная идея управляемого переформирования вибрационного поля с целью не только полного исключения вредного влияния вибраций на живой организм, но и вибростимуляции его биоэнергетики, повышения работоспособности и вибролечения. Получены положительные результаты использования вибростимуляции в системе адаптации космонавтов к условиям полета в космосе и после возвращения на Землю. Переформирование вибрационного поля с целью вибролечения апробировано в госпитале им. А.В. Вишневского и широко используется в различных медицинских приборах, защищенных авторскими свидетельствами.

Фундаментальными результатами исследований К.В. Фролова стали также расчетные модели, определяющие уравнения и критерии прочности, вибробезопасности и ресурса машин и машинных комплексов, эргономики действующих человеко-машинных систем, экологии машиностроительных производств и функционирующих объектов техносферы. Их использование позволяет повысить надежность и эксплуатационную безопасность человеко-машинных систем. Результаты исследований нашли широкое применение в решении задач судостроения, ядерно-энергетической и авиакосмической машиностроительной практики.

Выдающиеся результаты прикладных исследований, составляющих научно-методические основы реализации современных технологий, использованы в государственных проектах гражданского и оборонного назначения - при создании летательных аппаратов четвертого-пятого поколений (конструкции Су, Ил, Ту, Ка), водородных двигателей, атомных энергетических реакторов на тепловых и быстрых нейтронах (ВВЭР-1000, БИ-800), при разработках систем снижения и оценки акустической скрытности подвижных морских подводных объектов (АЛЛ, ЯППУ) с повышенными параметрами динамичности, виброустойчивости, акустической и вибрационной защищенности, долговечности и живучести, а также гражданских производственно-технологических комплексов (роботы и станки повышенной точности и производи-

тельности с использованием лазерных и ультразвуковых технологий).

Исследования, выполненные академиком К.В. Фроловым, при его непосредственном участии и под его руководством, являются научной базой для эффективной реализации инновационной политики на основе высокотехнологичных научных и инженерных проектов, что отвечает потребностям развития в XXI веке военно-промышленного, энергетического, аграрного и других наукоемких комплексов страны, а также позволяет по-новому выстраивать государственную научно-техническую политику перспективного развития машиностроительного комплекса как материальной основы повышения обороноспособности страны и уровня техногенной, природной и социальной безопасности сфер жизнеобеспечения.

Весомым вкладом академика К.В. Фролова в научно-информационное обеспечение прогресса машиностроения, наряду с монографиями и многотомными книжными изданиями, стали периодические научные журналы: журнал Российской академии наук «Проблемы машиностроения, и надежности машин» (переиздается в США), международный журнал «Проблемы машиностроения и автоматизации» и новый журнал «Машиностроение и инженерное образование», где он был главным редактором.

Исходя из глубокого убеждения в том, что образование должно быть общедоступным, непрерывным и ориентированным на перспективу, академик К.В. Фролов придавал особое значение подготовке молодых научных и инженерных кадров. Он успешно совмещал с научной деятельностью преподавание в МГТУ им. Н.Э.Баумана. С 1976 г. он заведовал кафедрой теории машин и механизмов. Под его руководством были подготовлены и защищены 27 кандидатских и 9 докторских диссертаций.

По инициативе академика К.В. Фролова Комиссией РАН по работе с молодежью, Правительством Москвы, Министерством образования РФ, РФФИ и МФТИ в Институте машиноведения РАН ежегодно проводятся Международные Интернет-конференции молодых ученых, аспирантов и студентов по современным проблемам машиноведения. На базе Института машиноведения РАН создан молодежный Центр коллективного пользования (ЦКП) ИМАШ - Учебно-научный испытательный комплекс для технических университетов Москвы по безопасности технических систем. С 2003 г. ЦКП имеет статус структурного подразделения ИМАШ в составе отдела «Прочность, безопасность и живучесть машин».

Академик Фролов К.В. был активным, известным в стране и за рубежом деятелем и организатором научно-просветительской работы. В качестве Президента Международного фонда «Знание» им. СИ. Вавилова он выступил инициатором формирования Общенационального Совета просветительских организаций (ОСПО). В 2006 г. он был избран сопредседателем ОСПО и возглавил Программный Комитет по проведению Первого конгресса просветительских организаций России, который призван способствовать возрождению в стране широкого просветительского движения.

Особого внимания заслуживает международная научная деятельность академика К.В. Фролова. Он был избран членом ряда зарубежных академий - США, Швеции, Норвегии, Великобритании, а также академий наук Беларуси, Грузии, Украины, Литвы и других стран, был Почетным доктором ряда ведущих зарубежных университетов.

Представляя отечественную науку в ряде международных и общественных ассоциаций, союзов, федераций, академик К.В. Фролов активно содействовал укреплению и расширению творческого сотрудничества ученых, специалистов и общественных деятелей многих стран мира.

Многогранная плодотворная научная, научно-организационная и общественная деятельность академика К.В. Фролова получила высокое заслуженное признание. Константин Васильевич Фролов - Герой Социалистического Труда (1990), лауреат премий Совета Министров СССР (1983, 1990), Государственной премии СССР (1986), Ленинской премии (1988), премий Правительства Российской Федерации в области науки и техники (1998, 2000, 2002). Награжден орденами Ленина (1986, 1990), Трудового Красного Знамени (1981), «За заслуги перед Отечеством III степени, медалями.

Имеет иностранные награды, в том числе награжден Золотой медалью имени А. Стодолы Словацкой академией наук (1973), Серебряной медалью Чехословацкой академии наук «За заслуги перед наукой и человечеством» (1982), Золотой медалью имени Михайло Пупина (Югославия, 1983), Золотой медалью им. Мусхелишвили (Грузинская академия наук, 2005).

На родине Константин Васильевич Фролов удостоен почетного звания «Гражданин города Кирова».

КОНФЕРЕНЦИИ И СЕМИНАРЫ

В Нижнем Новгороде 22-26 сентября 2008 г. была проведена VIII Всероссийская научная конференция «Нелинейные колебания механических систем». Организаторами конференции выступили: Российская академия наук, Научный совет по проблемам машиноведения и технологических процессов, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова (Нижегородский филиал), Министерство образования и науки РФ, ГОУ ВПО «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», «Научно-исследовательский институт прикладной математики и кибернетики им. Н.И. Лобачевского». Конференция проведена при финансовой поддержке Российской академии наук и РФФИ (проект 08-01-06085).

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Неймарк Ю.И. (Н. Новгород) — председатель
Баландин Д.В. (Н. Новгород) - зам. председателя
Ерофеев В.И. (Н. Новгород) - зам. Председателя

Члены комитета:

Акуленко Л.Д. (Москва)
Асташев В.К. (Москва)
Баженов В. Г. (Н. Новгород)
Белых В.Н. (Н. Новгород)
Блехман И.И. (С.-Петербург)
Васин Ю.Г. (Н. Новгород)
Ганиев Р.Ф. (Москва)
Губайдуллин Д.А. (Казань)
Денисов Г.Г. (Н. Новгород)
Дерендяев Н.В. (Н. Новгород)
Дубровский В.А. (Москва)
Емельянова И.С. (Н. Новгород)
Журавлев В.Ф. (Москва)
Индейцев Д.А. (С.-Петербург)
Колесников К.С. (Москва)
Комаров В.Н. (Н. Новгород)
Метрикин А.В. (Н. Новгород; Делфт, Нидерланды)
Митенков Ф.М. (Н. Новгород)
Мишакин В.В. (Н. Новгород)
Морозов А.Н. (Москва)
Новиков В.В. (Н. Новгород)
Перевезенцев В.Н. (Н. Новгород)
Поляк Б.Т. (Москва)
Пономаренко В.П. (Н. Новгород)
Потапов А.И. (Н. Новгород)
Сабаев Е.Ф. (Н. Новгород)
Савельев В.П. (Н. Новгород)
Смирнов Л.В. (Н. Новгород)
Стронгин Р.Г. (Н. Новгород)
Трубецков Д.И. (Саратов)
Хентов А.А. (Н. Новгород)
Черноусько Ф.Л. (Москва)
Шалфеев В.Д. (Н. Новгород)
Шильников Л.П. (Н. Новгород)

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Баландин Д.В. (сопредседатель), Ерофеев В.И (сопредседатель), Грезина А.В.,
Комаров В.Н., Лисенкова Е.Е., Мишакин В.В., Никитина Е.А.,
Панасенко А.Г., Пономаренко В.П., Пономаренко С.В., Савельев В.П., Васин Д.Ю., Эгамов А.И.

Научные конференции "Нелинейные колебания механических систем" традиционно проводятся в Нижнем Новгороде раз в три года, начиная с 1987 г. Нынешняя конференция уже восьмая. Работа конференции проходит в трех основных направлениях:

- модели и методы теории колебаний (математическое моделирование динамических систем, аналитические, качественные и численные методы теории колебаний, теория бифуркаций);
- колебания в динамических и управляемых системах (регулярные и хаотические колебания, управление колебаниями механических систем, прикладные задачи теории колебаний);
- волновая динамика машин и конструкций (волны в стержнях, пластинах и оболочках, волны в твердых и жидких средах, волновая техника и технологии, акустическая диагностика и неразрушающий контроль).

Труды конференции представлены в 2-х томах. Том 1 содержит пленарные доклады и доклады, представленные в секции 1 (Модели и методы теории колебаний).

Том 2 содержит доклады, представленные в секции 2 (Колебания в динамических и управляемых системах) и секции 3 (Волновая динамика машин и конструкций).

С момента проведения последней конференции (2005 г.) ушли из жизни академик РАН Константин Васильевич Фролов (председатель программного комитета предыдущих конференций) и профессор Юрий Исаакович Городецкий (заместитель председателя программного комитета). Памяти этих ученых и организаторов посвящен один из разделов первого тома.

Сотрудниками Иркутского государственного университета путей сообщения (НИИ современных технологий, системного анализа и моделирования) сделан ряд докладов.

1.Банина Н.В., Гозбенко В.Е. Математические модели колебательных контуров с дополнительными связями различной физической природы. Том 2. С. 39.

2.Елисеев С.В., Упырь Р.Ю., пермяков М,А. Особенности передачи возмущения в цепных системах со связями по относительному ускорению. Том 2. С. 113-119.

3.Лыткина Е.М. Управление свободными колебаниями механических систем при периодическом переключении структуры. Том 2. С. 140-146.

4.Хоменко А.П., Засядко А.А., Московских А.О. Интерпретации последовательных и параллельных соединений в структурах колебательных систем. Том 2. С. 254-258.

Труды VIII Всероссийской научной конференции «Нелинейные колебания механических систем» (Нижний Новгород, 22-26 сентября 2008 г.). В 2-х томах. Том 1/ Под редакцией Д.В. Баландина, В.И. Ерофеева. Нижний Новгород: Издательский дом «Диалог Культур», 2008.-348 с. ил. № ISBN978-5-902390-13-8.

Раздел 1
Механика. Транспорт. Технологии

УДК 656.001

Елисеев С.В., Хоменко А.П. Виброзащитные системы. Вопросы управляемости и наблюдаемости // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - 2008. №3(19). С. 8-13.

В статье показано, что управление при нескольких точках наблюдения, если принять во внимание принцип суперпозиции, характерный для линейных ВЗС, позволяет решать более сложные задачи виброзащиты. Последнее связаны с необходимостью выполнения условий движения объекта с ограничениями на несколько параметров динамического состояния при одновременном соблюдении условий устойчивости.

Ил. — 7. Библ. — 4 наим.

УДК 621.01:534

Кузнецов Н.К., Перелыгина А.Ю. Исследование динамического способа гашения упругих колебаний трехмассовой системы // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - 2008. №3(19). С. 14-19.

Динамическое гашение колебаний, как правило, осуществляется посредством присоединения к объекту защиты дополнительных устройств в виде либо пассивных элементов (масс, пружин), либо активных, имеющих собственные источники энергии, которые формируют необходимые силовые воздействия на объект. В управляемых машинах, движение исполнительных механизмов которых описываются трехмассовыми расчетными схемами, возможна реализация режимов динамического гашения колебаний путем организации управляемого движения промежуточной массы системы. В настоящей статье рассматривается возможность реализации режима динамического гашения колебаний в трехмассовых системах.

Ил. — 5. Библ. — 5 наим.

УДК 66.011

Новицкий Е.А., Шишкин З. А., Кузнецов К.А. Моделирование газлифтного реактора высокотемпературного хлорирования этилена // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - 2008. №3(19). С. 19-25.

Описана математическая модель и алгоритм гидравлического расчета газлифтного реактора прямого высокотемпературного хлорирования этилена. Представлены результаты тестирования математической модели.

Ил. — 4. Табл. — 2. Библ. — 5 наим.

УДК 69.002.51.192:621.225.2

Кобзов Д.Ю., Кобзов А.Ю., Жмуров В.В. О расчете экономической эффективности модернизации гидроцилиндров ДСМ // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - 2008. №3(19). С. 26-30.

Предлагается методика выбора количества мероприятий технического обслуживания и ремонта дорожно-строительных машин при соблюдении вероятности безотказной работы.

Библ. — 18 наим.

УДК 532.54:62.752

Засядко А.А., Насников Д.Н. Экспериментальные исследования гидравлической активной виброзащитной системы // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - 2008. №3(19). С. 31-37.

Рассматриваются результаты экспериментов на активных электрогидравлических виброзащитных системах. Приведено описание опытной установки и методики испытаний. Изучены возможности системы в реакциях на моногармоническое и ударное внешние воздействия при различных законах управления в обратной связи (пропорциональное, интегральное и др.).

Ил. — 9. Библ. — 7.

УДК 517.926

Данеев А.В., Русанов В.А., Удилов Т.В., Шарпинский Д.Ю. К методам оперативного прогнозирования фронта лесного пожара // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - 2008. №3(19). С. 38-46.

Приведены исследования по математическому обоснованию решения задачи структурно-параметрической идентификации квазилинейной дифференциальной модели прогноза краткосрочного состояния фронта лесного пожара, адаптирующейся к пульсациям внешней среды на процессы переноса и охвата очага локального лесного пожара.

Ил. — 1. Библ. — 21 наим.

УДК 311.216:004.42

Измайлов В.В., Наумов А.Е. Применение адаптивных статических моделей для прогнозирования остаточного ресурса электроконтактных соединений // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - 2008. №3(19). С. 46-49.

В работе показано, что прогнозирование остаточного ресурса разборных электроконтактных соединений возможно по результатам периодического мониторинга ресурсного параметра соединения в процессе его эксплуатации. Разработанная система не требует большого объема статистической информации и позволяет прогнозировать остаточный ресурс конкретного соединения с учетом особенностей его эксплуатации, при этом сравнение прогноза с экспериментальными данными дает хорошие результаты. Разработанная методика и её программная реализация позволяет обоснованно назначать сроки очередного профилактического обследования, ремонта или замены электроконтактного соединения.

Ил. — 1. Библ. — 4 наим.

УДК 621.81: 621.891

Огар П.М., Максимова О.В., Тарасов В.А. Относительная площадь контакта при взаимодействии шероховатой поверхности с упругим слоистым полупространством // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - 2008. №3(19). С. 49-51.

Авторами впервые представлены аналитические зависимости, позволяющие создать инженерную методику расчета определения относительной площади контакта при взаимодействии жесткой шероховатой поверхности с упругим слоистым полупространством.

Ил. — 2. Библ. — 5 наим.

УДК 622.342

Резник Ю.Н., Шумилова Л.В. Состояние и перспективы промышленного использования биогидрометаллургической технологии извлечения золота из упорных руд // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - 2008. №3(19). С. 52-58.

Рассмотрены результаты анализа технико-экономических показателей и опыта работы предприятий, применяющих бактериальное выщелачивание, а также результаты экспериментальных исследований, большинства зарубежных и отечественных экспертов. Показано, что биогидрометаллургическая технология в перспективе может занять ведущее место среди возможных методов металлургической переработки упорного сульфидного золоторудного сырья.

Библ. — 7 наим.

УДК 656.224

Мельниченко О.В., Цыбульский В.С., Чикиркин О.В. Повышение качества электрической энергии в контактной сети с целью снижения отказов электронного и силового электрооборудования электровоза // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - 2008. №3(19). С. 58-64.

В статье проанализирована работа электровоза переменного тока с плавным регулированием напряжения при типовом и предлагаемом алгоритме управления выпрямительно-инверторным преобразователем. В результате показано, что применение новых алгоритмов управления существенно улучшит качество напряжения в контактной сети.

Ил. — 10. Библ. — 5 наим.

Раздел 2
Управление в технических системах. Моделирование

УДК 007:531.3

Финогенко И.А. О принципе декомпозиции для механических систем с сухим трением // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - 2008. №3(19). С. 66-70.

Исследуется задача синтеза систем управления для механических систем с сухим трением на принципе декомпозиции. Приводятся условия стабилизации целевого множества, рассматривается пример.

Ил. — 2. Библ. — 9 наим.

УДК 519.652

Зароднюк Т.С., Горнов А.Ю. Технология поиска глобального экстремума в задаче оптимального управления // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - 2008. №3(19). С. 70-76.

Предложена вычислительная технология поиска глобального экстремума в невыпуклой задаче оптимального управления, основанная на "конечномерных" алгоритмах и редукции исходной задачи к последовательности задач безусловной минимизации. Разработанный подход показал себя работоспособным при решении тридцати сложных невыпуклых нелинейных задач.

Ил. — 8. Библ. — 14 наим.

УДК 004.85

Федоров В.В., Молчанова Е.И. Разработка интеллектуального редактора базы знаний для создания экспертных систем в среде CUPS // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - 2008. №3(19). С. 76-80.

Разработан редактор базы знаний, позволяющий визуальными средствами создавать элементы представления данных и знаний для их последующей интерпретации машиной вывода Clips, что позволит унифицировать и ускорить процесс разработки экспертных систем. Элементы языка Clips представлены в виде фреймов.

Ил. — 5. Табл. — 1. Библ. — 3.

УДК 621.311

Крюков А.В., Закарюкин В.П., Арсентьев М.О. Использование технологий распределенной генерации на железнодорожном транспорте // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - 2008. №3(19). С. 81-87.

На основе системного анализа показано, что сферами применения установок распределенной генерации на железнодорожном транспорте являются следующие направления: объекты железнодорожного транспорта в регионах с потенциально неустойчивым электроснабжением; направление повышения надежности электроснабжения ответственных потребителей при создании транспортно-энергетических коридоров, совмещающих трассы железной и автомобильной дорог, высоковольтные ЛЭП и линии связи; на предприятиях железнодорожного транспорта, имеющих собственные теплоисточники; в районах электроснабжения нетяговых и нетранспортных потребителей для снижения затрат на энергообеспечение и повышение качества электроэнергии; для питания автономных объектов ЖД транспорта с использованием нетрадиционных возобновляемых источников энергии. Для анализа возможностей применения установок распределенной генерации в системах электроснабжения железнодорожного транспорта могут быть применены методика и программные средства имитационного моделирования систем электроснабжения в фазных координатах. Установки распределенной генерации могут быть применены для снижения отклонений и несимметрии напряжения в системах электроснабжения предприятий железнодорожного транспорта.

Ил. — 9. Библ. — 17 наим.

УДК [51.001.57+519.853]:656

Зоркальцев В.И., Медвежонков Д.С. Транспортная модель с нелинейными затратами на перевозку // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - 2008. №3(19). С. 87-97.

Рассматривается модель транспортной системы с нелинейными зависимостями затрат от объемов перевозок по ветвям сети. Приводятся формулировки взаимосвязанных оптимизационных задач, описывающих модель. Доказываются теоремы существования и единственности решения. Рассматриваются различные формы записи системы уравнений, равносильные паре двойственных задач. Дается экономическая интерпретация формулировок задач и получаемых решений. Исходная задача описывает оптимальное по затратам распределение потоков на сети, двойственная — формирование тарифов по предельным издержкам, соответствующих минимальным суммарным затратам на перевозку. Обсуждается альтернативный способ формирования тарифов на перевозки по средним издержкам. Приводится пример, демонстрирующий оба способа тарифообразования.

Ил. — 2 Табл. — 2. Библ. — 11 наим.

УДК 519.83+621.311:51.001.57

Пержабинский С.М. Алгоритм внутренних точек, использующий квадратичные аппроксимации // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - 2008. №3(19). С. 97-101.

В работе представлен алгоритм решения задач выпуклой квадратичной оптимизации, основанный на алгоритме линеаризации и применении методов внутренних точек для решения линеаризованной задачи. Для сокращения погрешности линеаризации при решении вспомогательной задачи поиска направления корректировки предлагается применять энергетическую норму с учетом квадратичных аппроксимаций функций. Приводятся результаты экспериментальных исследований предлагаемого метода.

Табл. — 4. Библ. — 3 наим.

УДК 621.391.1.037.37

Белоусов Р.А., Бузиков И.А., Климов Н.Н., Фискин Е.М., Фискина М.М. Моделирование и разработка программного комплекса автоматизации учета тепла в ЖКХ // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - 2008. №3(19). С. 102-105.

Рассмотрены архитектура и результаты моделирования в GPSS информационно-измерительной системы для автоматизации учета тепла в ЖКХ

Ил. — 3. Библ. — 3 наим.

УДК 519.816:519.254

Абаев А.В., Бутырин О.В. Математическая модель оценки оперативной деятельности подразделений ГПС // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - 2008. №3(19). С. 106-109.

Статья посвящена решению проблемы, связанной с оценкой эффективности оперативной деятельности Государственной противопожарной службы (ГПС). Рассмотрен математический подход методики оценивания оперативной деятельности подразделений ГПС. Представлена алгоритмическая схема обработки оценочных показателей посредством агрегирования оценочных параметров и определение комплексного показателя. Математический инструментарий предложенной методики базируется на вероятностных подходах, математической теории игр и теории принятия решений. Рассматривается практический пример реализации оценки оперативной деятельности выбранных объектов исследования.

Табл. — 5. Библ. — 2 наим.

УДК 519.688

Подкаменный Д.В. Вычислительный сервер для решения задачи оптимального управления // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - 2008. №3(19). С. 109-113.

В статье описывается построение вычислительного сервера на основе пакета прикладных программ для решения задачи оптимального управления для поддержки экспериментов распределенных исследовательских групп.

Ил. — 2. Библ. — 7 наим.

УДК 681.514

Пашков Н.Н. Параметрические условия устойчивости разрывных систем управления // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - 2008. №3(19). С. 114-118.

Вторым методом Ляпунова исследована область устойчивости скользящих режимов разрывных систем управления многосвязными нелинейными объектами. Получены алгебраические уравнения, связывающие технические ограничения на пространство состояний объекта управления и параметры разрывного регулятора, обеспечивающего устойчивость разрывной системы в этой области.

Ил. — 2. Библ. — 5 наим.

Раздел 3
Системный анализ и междисциплинарные подходы в исследованиях

УДК 338.2:001.895

Горбунов В.К., Козлова Л.А. Построение и исследование квазиинвариантных индексов потребления // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - 2008. №3(19). С. 120-127.

Представляются и исследуются аналитические квазиинвариантные индексы, обобщающие инвариантные индексы на случай неоднородных потребительских предпочтений. Такие индексы вычисляются по числам Африата — значениям функции полезности и множителя Лагранжа задачи рационального потребления на статистических данных потребления. По определению, квазиинвариантные индексы транзитивны и мультипликативны. Вычислительный эксперимент показывает, что они, как правило, также удовлетворяют свойству промежуточности.

Табл. — 2. Библ. — 20 наим.

УДК 004.42

Ворожцова Т.Н. Онтологическое моделирование программного комплекса с использованием микроформатов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - 2008. №3(19). С. 128-131.

Рассматриваются возможности использования микроформатов, как варианта структурирования данных, при моделировании программных комплексов, базирующемся на онтологическом описании предметной области.

Ил. — 2. Библ. — 9 наим.

УДК [556.001.57+574.5.001.57]:51

Козлов В.В. Моделирование нестационарных процессов диффузии растворенных органических веществ донных отложений: изменение направленности потоков и оценка биогенной нагрузки в придонной воде // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - 2008. №3(19). С. 132-140.

Рассматриваются формулировка математической модели и численный алгоритм решения нестационарной краевой задачи с подвижными границами. Модель основана на процессах молекулярной диффузии растворённых органических веществ в пористой среде продуктов распада твердого органического вещества в донных отложениях.

Ил. — 3, Библ. — 20 наим.

УДК 001.18.8

Корольков Б.П., Корольков П.Б. Систематика — не вечный двигатель, а веление времени // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - 2008. №3(19). С. 141-149.

На основе синергетического подхода предлагается охватить единообразным классифицированием объекты живой и неживой природы, а также искусственных систем. Общим признаком сложных систем любой природы принята иерархическая организационная структура. Более глубокое, чем в биологической систематике, проникновение в предметные области достигнуто переходом от плоскостного к объёмному (трёхмерному) представлению соподчинённых уровней сложности. Построение объёмной систематики продемонстрировано на примере железнодорожного транспорта. Намечена схема её распространения на ряд актуальных областей техносферы. Затронуты прикладные аспекты обобщённых систематических моделей.

Ил. — 5. Табл. — 1. Библ. — 21 наим.

УДК 681

Узунов В.Г., Дьяченко А.А., Спорыхин М.А., Белов И.А. Прогнозный подход в оценке нахождения технических систем в текущем состоянии // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - 2008. №3(19). С.150-157.

Предлагается методика прогноза состояния на модели мониторинга безопасности сложного технического объекта. Вводится ряд понятий: ожидаемое остаточное время, гарантированное остаточное время, межконтрольный интервал. Разработаны механизмы прогнозирования с использованием разнородной информации.

Ил. — 3. Табл. — 1. Библ. — 21 наим.

УДК 330.101

Бусыгин В.П. Экономическая теория после двух революций // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - 2008. №3(19). С. 158-163.

В 50-60 годы прошлого столетия вальрасианский вариант неоклассической экономической теории (парадигмы) для многих исследователей был фактически синонимом экономической теории как таковой. Лежащие в его основе предпосылки, хотя и признавались чрезмерным упрощением реального положения вещей, рассматривались адептами вальрасианской парадигмы как неизбежная цена, уплачиваемая за возможность получать глубокие аналитические результаты относительно экономического взаимодействия, которые, в свою очередь, рассматривались как хорошее «первое приближение». И, тем не менее, к 70-м годам XX столетия вальрасианская парадигма как исследовательская программа в целом была dead and buried, не в последнюю очередь, как нам представляется, из-за действия закона убывающей отдачи. На ее смену приходят несколько исследовательских программ, в основе которых отказ от одного или нескольких предположения вальрасианской парадигмы. Многие из этих исследовательских программ остаются, в основном, в рамках неоклассической парадигмы, для других характерен более радикальный разрыв с базовыми посылками этой парадигмы. Заметен интерес и к различным вариантам эволюционных подходов к анализу социально-экономических взаимодействий. В статье обсуждаются характеристики альтернативных исследовательских, опирающихся, в основном, на методы теории игр (прежде всего игр с неполной информацией) как инструмента анализа стратегических взаимодействий.

Библ. — 13 наим.

УДК 378.001.57

Массель Л.В., Бахвалов С.В., Бахвалова З.А. Информационное моделирование взаимодействия субъектов образовательного кластера // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - 2008. №3(19). С. 164-170.

Рассмотрен методологический подход, лежащий в основе проекта, выполненного Иркутским государственным техническим университетом (ИрГТУ) по заказу Федерального агентства образования в 2007 г. Предложена методология разработки, базирующаяся на фрактальном подходе к информационному моделированию, разработан ряд онтологических и инфологических моделей.

Ил. — 7. Библ. — 6 наим.

УДК 62-501.12; 533.6.013; 629.7.022

Мухопад Ю.Ф., Суржик В.В. Перспектива развития транспортных сетей для евро-азиатского коридора // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - 2008. №3(19). С. 171-173.

Статья посвящена актуальной проблеме развития транспортной системы Евро-Азиатского коридора посредством интеграции железнодорожного, водного и автомобильного транспорта в единую транспортную систему и внедрение в эту систему экранопланов второго поколения, в частности самостабилизирующихся экранопланов.

Библ. — 2 наим.

УДК 621.01(07)

Резник Ю.Н., Байбородин Б.А., Сапожников А.А. Критерии и инструменты качества в задачах прогнозирования эффективности предприятий // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - 2008. №3(19). С. 174-177.

Рассматриваются основные проблемы внедрения систем в аспектах, которые связаны с потребностями современного производства. В этом плане авторами уделено внимание надежности и долговечности продукции, что закладывается на стадии производственных процессов.

Библ. — 2 наим.

УДК 658.32:656.2Д318

Сольская И.Ю., Федорова Е.А. Повышение квалификации специалистов в области управления персоналом как элемент системы менеджмента качества // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - 2008. №3(19). С. 178-180.

В статье представлены методологические подходы к определению принципов повышения квалификации инженеров по подготовке кадров транспортных предприятий с учетом реализации кадровой стратегии ОАО «РЖД» и практики внедрения систем менеджмента качества.

Ил. — 1. Табл. — 1. Библ. — 4 наим.

УДК 681.142.2

Иванов А.Г., Бахвалов С.В. Информационное моделирование медицинской информационно- аналитической системы // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - 2008. №3(19). С. 181-186.

Выполнено информационное моделирование и предложена архитектура информационно-аналитической системы, одной из главных функций которой является экспертная поддержка диагностики и прогнозирования профессиональных нейроинтоксикаций у работников химических предприятий. Полученное решение, основывается на зарекомендованных практикой стандартах и технологиях программной инженерии, реализует компонентный подход к разработке сложных корпоративных приложений.

Ил. — 5. Библ. — 4 наим.

УДК 159.9:004.8

Степаненко А.С. Социально-культурные предпосылки искусственного интеллекта. Системные аспекты // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - 2008. №3(19). С. 186-191.

Рассматриваются принципиальные основы построения автоматизированных технологий, реализация которых связана с проблемами искусственного интеллекта. Автором рассматривается ряд предпосылок, объединенных в системную концепцию.

Библ. — 9 наим.

УДК 001.4.658.382.3:006.354

Марцынковский Д.А., Резник А.Ю. Методология, принципы и подходы интеграции систем менеджмента // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - 2008. №3(19). С. 192-195.

Развивается подход, ориентированный на реализацию идей создания интегрированных систем менеджмента (ИСМ). Показана возможность создания условий более эффективного управления современным производством.

Ил. — 2. Библ. — 1 наим.

Part 1
Mechanics. Transport. Technologies

UDC 656.001

Eliseev S.V., Khomenko A.P. Vibroprotecion systems. Problems of controllability and observability // The modern technologies. System analysis. Modelling. IrSURE. - 2008 #3(19). - pp. 8-13.

In clause management is shown, that at several points of supervision if to consider a principle of superposition, characteristic for linear ВЗС, allows to solve more challenges виброзащиты. The last are connected with necessity of performance of conditions of movement of object with restrictions on some parameters of a dynamic condition at simultaneous observance of conditions of stability.

Fig. - 7. Bibl. - 4.

UDC 621.01:534

Kuznetsov N.K., Pereligina A.Yu. Research of a dynamic means of clearing of elastic fluctuations of three-mass system // The modern technologies. System analysis. Modelling. IrSURE. — 2008 #3(19). - pp. 14-19.

Dynamic clearing of fluctuations is carried out by means of connection to object of protection of additional devices in the form of or passive elements (weights, springs), or active, having own energy sources which form necessary power influences on object, as a rule. In operated machines, movement of which executive mechanisms are described by three-mass analytical model, realization of modes of dynamic clearing of fluctuations by the organization of operated movement of intermediate weight of system is possible. In present clause the opportunity of realization of a mode of dynamic clearing of fluctuations in three-mass systems is considered.

Fig. - 5. Bibl. — 5.

UDC 66.011

Novitsky E. A., Shishkin Z. A., Kuznetsov K. A. The modelling of a gas-lift reactor of high-temperature ethylene chlorination // The modern technologies. System analysis. Modelling. IrSURE. - 2008. #3(19). - pp. 19-25.

The mathematical model and algorithm of hydraulic calculation of a gas-lift reactor of direct high-temperature ethylene chlorination are described. The model allows evaluating the consumption values of the circulating working fluid, gas content and temperature by the reactor's height. The results of mathematical model testing are represented by the design and experimental data comparison.

Fig. - 4. Tab. - 2. Bibl. - 5.

UDC 69.002.51.192:621.225.2

Kobzov D.J., Kobzov A.J., Zhmurov B.B. About calculation of economic efficiency of modernization of hydrocylinders DSM // The modern technologies. System analysis. Modelling. IrSURE. - 2008. #3(19). - pp. 26-30.

Suggest method of selection quality of processes for technical service and reparing machines? Which are using in machinery account probability.

Bibl. — 18.

UDC 532.54:62.752

Zasjadko A.A., Nasnikov D.N. Experimental research of vibroprotection hydraulic active systems // The modern technologies. System analysis. Modelling. IrSURE. - 2008. #3(19). - pp. 31-37.

Results of experiments on active electrohydraulic vibroprotection systems are considered. Skilled installation and a technique of tests is resulted and described. Opportunities of system in reactions to monoharmonious and shock external influence are studied at various laws of management in a feedback (proportional, integrated, etc.).

Fig. - 9. Bibl. - 7.

UDC 517.926

Daneev A.V., Rusanov V.A., Udilov T.V., Sharpinskiy D.Yu. On methods of operative forecasting front of local forest fire // The modern technologies. System analysis. Modelling. IrSURE. - 2008. #3(19). - pp. 38-46.

There were resulted researches on a mathematical substantiation of the decision of a structural parametrical identification problem of a quasi-linear differential model of short-dated front state of local forest fire adapting to environment pulsations on processes of carrying and scope of local forest fire.

Fig. - 1. Bibl. — 21.

UDC 311.216:004.42

Izmailov V.V., Naumov A.E. Adaptive statistical models as applied to the forecasting of the residual lifetime of electrical connections // The modern technologies. System analysis. Modelling. IrSURE. - 2008. #3(19). - pp. 46-49.

As is shown in the present paper, forecasting of a residual lifetime of separable electrical connections may be performed by results of periodic monitoring of resource parameter of connection during its operation. The system developed does not demand great volume of the statistical information and allows to predict a residual lifetime of specific connection with the account of features of its operation, meanwhile comparison of the forecasting with experimental data yields good agreement. The developed technique and its program realization permit to appoint argued date of the following preventive inspection, repair or replacement of electrical connection.

Fig. - 1. Bibl. — 4.

UDC 621.81 : 621.891

Ogar P.M., Maksimova O.V., Tarasov V.A. Relative the area of contact at interaction of a rough surface with elastic layered half-space // The modern technologies. System analysis. Modelling. IrSURE. - 2008. #3(19). - pp. 49-51.

Authors are present analytical dependences allowing for the first time, to create an engineering design procedure of definition of the relative area of contact at interaction of a rigid rough surface with elastic layered half-space.

Fig. - 2. Bibl. — 5.

UDC 622.342

Reznik Yu.N., Shumilov L.V. Condition and prospects of industrial usage of biohydrometallurgical technology of extraction of gold from persistent ores // The modern technologies. System analysis. Modelling. IrSURE. - 2008. #3(19). - pp. 52-58.

Results of the analysis of technical and economic parameters and operational experience of the enterprises applying bacterial leaching, and also results of experimental researches, the majority of foreign and domestic experts are considered. It is shown, that the biohydrometallurgical technology in the long term can take leading place among possible methods of metallurgical processing persistent sulphidic of gold raw material.

Bibl. — 7.

UDC 656.224

Melnichenko O.V., Tsybulskij V.S., Chikirkin O.V. Increased quality to electric energy on wire of the electric transmission, of the reason reduction of the refusal electronic and power electric equipment electric locomotive // The modern technologies. System analysis. Modelling. IrSURE. - 2008. #3(19). - pp. 58-64.

In the given article the work of electric locomotive of alternating current is analysed with the smooth adjusting of tension at the model and offered algorithm of management rectifier inverting transformer. As a result it is shown, that the application of new algorithms of management substantially will improve quality of tension in the contact network.

Fig. - 10. Bibl. — 5.

Part 2
Management in technical systems. Modelling

UDC 007:531.3

Finogenko I.A. On a principle of decomposition for mechanical systems with dry friction // The modern technologies. System analysis. Modelling. IrSURE. - 2008. #3(19). - pp. 66-70.

The problem of synthesis of control systems for mechanical systems with dry friction on a principle of decomposition is investigated. Conditions of stabilization of target set are resulted, the example is considered.

Fig. - 2. Bibl. - 9.

UDC 519.652

Zarodnjuk T.S., Gornov A.Yu. Technology of search of a global extremum in a problem of optimum control // The modern technologies. System analysis. Modelling. IrSURE. - 2008. #3(19). - pp. 70-76.

Numerical technology of global extremum research in optimal control problem was proposed/ It was based on finit-dimensional algoritms of reduction of initial problem to sequence of unconstrained minimization problems were solved by proposed approach.

Fig. - 8. Bibl. - 14.

UDC 004.85

Fedorov V.V., Molchanov E.I. Development of the intellectual editor of the knowledge base for creation of expert systems in CUPS // The modern technologies. System analysis. Modelling. IrSURE. - 2008. #3(19). - pp. 76-80.

Allowing by visual means to create elements of data presentation and knowledge the editor of the knowledge base is developed for their subsequent interpretation by machine of conclusion Clips that will allow to unify and accelerate process of development of expert systems. Elements of language Clips are presented in the form of frames.

Fig. - 5. Tab. - 1. Bibl. - 3.

UDC 621.311

Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Sokolov V.Yu. Using of distributing generation technologies in railway transport // The modern technologies. System analysis. Modelling. IrSURE. — 2008. #20. - pp. 81-87.

System analysis shows that the distributing generation units can be used for railway objects with unstable electric energy supplying, for safe rise of electric energy supplying of crucial loads in transport-energy corridors with railways, automobile ways, high voltage lines and communication lines, for railway enterprises with own thermal heat source, for railway local electric systems for rise of

electric energy quality and for supplying of autonomous railway objects with unusual electric energy sources. Analysis of distribution generation technologies in railway electric systems can be made by methods and software of electric system imitating modeling in phase domain. The distributing generation units can be used for lowering of deflection and unbalanced conditions in railway electric systems.

Fig. - 9. Bibl. — 17.

UDC [51.001.57+519.853 :656

Zorkaltsev V.I., Medvezhonkov D.S. Transport model with nonlinear costs of conveyance // The modern technologies. System analysis. Modelling. IrSURE. - 2008. #3(19). - pp. 87-97.

The paper deals with a model of a transport system with nonlinear dependence between volumes and costs of conveyance over net branches. Formulations of interconnected optimization problems describing the model are given. Theorems of existence and uniqueness of the solution are proved. The paper describes various forms of system of equations equivalent to a pair of dual optimization problems. Economical interpretations of problems formulations and obtained solutions are recieved. The primal problem describes an optimal by transport costs distribution of flows. The dual problem deals with forming of conveyance tariffs by marginal costs that correspond to minimal transport costs. An alternative method of tariffs forming by the average costs is discussed. A numerical example demonstrating both methods of tariff forming is presented.

Fig. — 2. Tab. - 2. Bibl. — 11.

UDC 519.83+621.311:51.001.57

Perjabinsky S.M. Interior point algorithm with quadratic approximations // The modern technologies. System analysis. Modelling. IrSURE. - 2008. #3(19). - pp. 97-101.

The paper presents a new algorithm for solving convex programming problems. The algorithm is a modification of linearization method that applies interior point methods for solving linearized problem. It is proposed to take into account quadratic approximations of functions to minimize linearization errors, when subsidiary problem is solved. Results of the experimental research showed the efficiency of the proposed algorithm.

Tab. - 4. Bibl. - 3.

UDC 621.391.1.037.37

Belousov R.A., Buzikov I.A., Klimov N.N., Fiskin E.M., Fiskina M.M. Modeling and development of a program complex of automation of the account of the heat in housing-municipal services // The modern technologies. System analysis. Modelling. IrSURE. - 2008. #3(19). - pp. 102-105.

The architecture and the results are considered of modeling in GPSS of Informing and measuring system for the automation of the account of the heat in housing-municipal services.

Fig. - 3. Bibl. — 3.

UDC 519.816:519.254

Abaev A.V., Butirin O.V. Mathematical model of an estimation of operative activity of divisions GPS // The modern technologies. System analysis. Modelling. IrSURE. - 2008. #3(19). - pp. 106-109.

The article is devoted to the decision of the problem connected to an estimation of efficiency of operative activity of Fire Safety service.(FSS) The mathematical approach of a method of an estimation of operative activity of divisions FSS is submitted. The algorithmic scheme of processing of estimated parameters is submitted. On the basis of the submitted algorithmic scheme of processing of estimated parameters by aggregation of estimated parameters is determined complex parameter. Estimated factors are offered. The mathematical toolkit of the offered method is based on approaches of theory of probability, of mathematical theory of games and the theory of decision-making. The practical example of realization of an estimation of operative activity of the chosen objects of research is submitted.

Tab. - 5. Bibl. - 2.

UDC 519.688

Podkameny D.V. Computing server for solving of the optimal control task. // The modern technologies. System analysis. Modelling. IrSURE. - 2008. #3(19). - pp. 109-113.

The author describes the process of computing server making on the base of application program package (legacy system) for solving of the optimal control task. Computing server is intended for the supporting of experiments which distributed research group can realize.

Fig. - 2. Bibl. - 7.

UDC 681.514

Pashkov N.N. Parametrical conditions of stability of explosive control systems // The modern technologies. System analysis. Modelling. IrSURE. - 2008. #3(19). - pp. 114-118.

The second method Lyapunov investigates area of stability of sliding modes of explosive control systems of multicoherent nonlinear objects. The algebraic equations connecting technical restrictions on space of condition of object of management and parameters of an explosive regulator ensuring stability of explosive system in this area are received.

Fig. - 2. Bibl. - 5.

Part 3
The system analysis and interdisciplinary approaches in researches

UDC 338.2:001.895

Gorbunov V.K., Kozlova L.A. Construction and research quasiinvariant indexes of consumption // The modern technologies. System analysis. Modelling. IrSURE. - 2008. #3(19). - pp. 120-127.

Analytical quasiinvariant the indexes are represented and investigated generalizing invariant indexes on a case of non-uniform consumer preferences. Such indexes are calculated on numbers of Afriata - to values of function of utility and index of Lagrange problems of rational consumption on statistical data of consumption. By definition, quasiinvariant indexes are transitive and multiplicative. Computing experiment shows, that they, as a rule, also satisfy to property intermediacy.

Tab. - 2. Bibl. - 20.

UDC 004.42

Vorozhtsova T.N. Ontologic modeling of a program complex with use of microformats // The modern technologies. System analysis. Modelling. IrSURE. - 2008. #3(19). - pp. 128-131.

Opportunities of use of microformats as variant of structurization of data are considered, at the modelling of program complexes which is based the ontologic description of a subject domain.

FIg. - 2. Bibl. - 9.

UDC [556.001.57+574.5.001.57 :51

Kozlov V.V. Modeling of non-stationary processes of diffusion of the dissolved organic substances of ground adjournment: change of an orientation of streams and an estimation of biogenic loading in benthonic water // The modern technologies. System analysis. Modelling. IrSURE. - 2008. #3(19). - pp. 132-140.

The formulation of mathematical model and numerical algorithm of the decision of a non-stationary regional problem with mobile borders is considered. The model is based on processes of molecular diffusion of the dissolved organic substances in the porous environment of products of disintegration of firm organic substance in ground adjournment.

Fig. - 3, Bibl. - 20.

UDC 001.18.8

Korolkov B.P., Korolkov P.B. Systematization - not a perpetuum mobile, and command of time // The modern technologies. System analysis. Modelling. IrSURE. - 2008. #3(19). - pp. 141-149.

The objects of wildlife and abioceon as well as artificial systems are proposed to be classified uniformly on the base of a synergetic approach. The common feature of complex systems of any nature is considered to be a hierarchical organizational structure. More profound comprehension of subject areas than in a biological systematics can be achieved by the transition from the flat (two-dimensional) to volulumetric (three-dimensional) representation of subdominant levels of complexity. The construction of volumetric systematics has been demonstrated on the example of rail transport. The scheme of its spreading on a number of areas of technosphere has been outlined. The applied aspects of generalized systematic models have also been dealt with.

Fig. - 5. Tab. - 1. Bibl. - 21.

UDC 681

Uzunov V.G., Djachenko A.A., Sporyhin M.A., Belov I.A. Long-range plan approach in an estimation of a finding of technical systems in a current condition // The modern technologies. System analysis. Modelling. IrSURE. - 2008. #3(19). - pp.150-157.

The technique of the forecast of a condition on model of monitoring of safety of complex technical object is offered. A number of concepts is entered: the expected residual time, guaranteed residual time, an intercontrol interval. Mechanisms of forecasting with use of the diverse information are developed.

Fig. - 3. Tab. - 1. Bibl. - 21.

UDC 330.101

Busygin V.P. Economic theory after two revolutions. // The modern technologies. System analysis. Modelling. IrSURE. - 2008. #3(19). - pp. 158-163.

In 50-60 years of the last century valrassian variant unclassical economic theory (paradigm) for many researchers was actually a synonym of the economic theory as those. Preconditions laying in its basis though admitted excessive simplification of a real state of affairs, were considered by adherents valrassin paradigms as the inevitable price paid for an opportunity to receive deep analytical results concerning economic interaction which, in turn, were considered as good « the first approach ». And, nevertheless, by 70-th years of XX century valrassian paradigm as the research program as a whole was dead and buried, not in the last instance, from our point of view, because of action of the law of decreasing feedback (from intellectual investments in this program). On its change research programs, in which basis refusal of one or several assumptions valrassian paradigms come some. Many of these research programs remain, basically, within the limits of neoclassic paradigms. Interest and to various variants of evolutionary approaches to the analysis of social and economic interactions is swept up. In clause alternative research, leaning, basically, on methods of the theory of games (first of all games characteristics are discussed with the incomplete information) as tool of the analysis of strategic interactions.

Bibl. — 13.

UDC 378.001.57

Massel L.V., Bakhvalov S.V., Bakhvalova Z.A. The information modelling of interaction of subjects educational cluster // The modern technologies. System analysis. Modelling. IrSURE. - 2008. #3(19). - pp. 164-170.

The methodological approach underlying the project is considered, executed the Irkutsk state technical university (ISTU) under the order of Federal agency of formation in 2007 offers the methodology of development which is based on the fractal approach to information modelling, a number ontologic and infological models is developed.

Fig. - 7. Bibl. - 6.

UDC 62-501.12; 533.6.013; 629.7.022

Muhopad Yu.F., Surzhik V.V. Prospect of development of transport networks for the euro-Asian corridor // The modern technologies. System analysis. Modelling. IrSURE. - 2008. #3(19). - pp. 171-173.

There is clause devoted to an actual problem of development of transport system of Euro-Asian of a corridor by means of integration railway, water and motor transport in uniform transport system and introduction in this system of interface vehicle the second generation, in particular self-stabilized of interface vehicle. It is noted, that this integration can become mighty stimulus of development of not mastered regions, will allow to organize container delivery of cargoes «from a door up to a door» and will provide national safety of the country.

Bibl. - 4.

UDC 621.01 (07)

Reznik Yu.N., Bajborodin B.A., Sapozhnikov A.A. Criteria and tools of quality in problems of forecasting of efficiency of the enterprises // The modern technologies. System analysis. Modelling. IrSURE. - 2008. #3(19). - pp. 174-177.

The basic problems of introduction of systems in aspects which are connected with needs of modern manufacture are considered. In this plan by authors it is paid attention of reliability and durability of production that is pawned at a stage of productions.

Bibl. - 2.

UDC 658.32:656.2Д318

Solskaja I.Yu., Fedorova E.A. The improvement of experts in the field of management of the personnel as an element of system of a quality management // The modern technologies. System analysis. Modelling. IrSURE. - 2008. #3(19). - pp. 178-180.

There is in clause methodological approaches to definition of principles of improvement of professional skill of engineers on a professional training transport agencies in view of realization of personnel strategy of OJSC "RZhD" and practice of introduction of systems of a quality management are presented.

Fig.- 1. Tab. - 1. Bibl. - 4.

UDC 681.142.2

Ivanov A.G., Bahvalov S.V. The information modeling of medical information-analytical system // The modern technologies. System analysis. Modelling. IrSURE. - 2008. #3(19). - pp. 181-186.

Information modelling is executed and the architecture of the information-analytical system is offered, one of which main functions is expert support of diagnostics and forecasting professional neurointoxication at workers of the chemical enterprises. The received decision, is based on the standards recommended by practice and technologies of program engineering, realizes the componental approach to development of complex corporate appendices.

Fig. - 5. Bibl. - 4.

UDC 159.9:004.8

Stepanenko A.S. Sociocultural precondition of an artificial intellect. System aspects // The modern technologies. System analysis. Modelling. IrSURE. - 2008. #3(19). - pp. 186-191.

Basic bases of construction of the automated technologies which realization is connected with problems of an artificial intellect are considered. The author considers a number of the preconditions incorporated in the system concept.

Bibl. - 9.

UDC 001.4.658.382.3:006.354

Martsynkovskij D.A., Reznik A.Yu. Methodology, principles and approaches of integration of systems of management // The modern technologies. System analysis. Modelling. IrSURE. - 2008. #3(19). - pp. 192-195.

The approach focused on realization of ideas of creation of integrated systems of management (ISM) develops. The opportunity of creation of conditions more efficient control modern manufacture is shown.

Fig. - 2. Bibl. - 1.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Абаев Алексей Васильевич, аспирант ИрГУПС, тел. 89086685228, e-mail: abaevy@mail.ru

Арсентьев Михаил Олегович, аспирант ИрГТУ

Бахвалов Сергей Владимирович, к.т.н., доцент каф. «Автоматизированные системы», ИрГТУ, e-mail: bsv@istu.edy

Бахвалова Зинаида Андреевна, инженер-программист, Управление информационных систем и технологий ИрГТУ, e-mail: zinand@inbox.ru

Белов Илья Александрович, аспирант ИрГУПС, тел. (3952) 63-83-58

Белоусов Роман Анатольевич, аспирант кафедры Радиоэлектроники и телекоммуникационных систем ИрГТУ, тел: 8-914-878-4073, e-mail: energy@romkin.net

Бузиков Иван Александрович, аспирант кафедры Радиоэлектроники и телекоммуникационных систем ИрГТУ, тел: 8-902-566-2046

Бусыгин Владимир Павлович, Государственный университет — Высшая школа экономики, Москва, e-mail: vpbousygin@mail.ru

Бутырин Олег Владимирович, к.т.н., доцент, зам. зав. кафедрой информационных систем ИрГУПС, тел. (3952) 68-33-10 (1-40), e-mail: butirin_ov@irgups.ru

Ворожцова Татьяна Николаевна, научный сотрудник, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ) СО РАН, тел. (3952) 42-59-20, e-mail: tnn@isem.sei.irk.ru

Горбунов Владимир Конатантинович, Ульяновский государственный университет, e-mail: vkgorbunov@mail.ru

Горнов Александр Юрьевич, д.т.н., зам. директора Института динамики систем и теории управления СО РАН, тел. (3952) 51-03-03, e-mail: gornov@ok.ru

Данеев Алексей Васильевич, д.т.н., профессор, начальник Улан-Удэнского филиала заочного обучения ФГОУ ВПО Восточно-Сибирский институт МВД России (ФГОУ ВПО ВСИ МВД России), тел. 89148885220

Дьяченко Анатолий Алексеевич, соискатель ИрГУПС, тел. (3952) 40-22-96

Елисеев Сергей Викторович, д.т.н., профессор, исп. директор НИИ Современных технологий, системного анализа и моделирования, ИрГУПС, тел. (3952) 59-84-28

Жмуров Владимир Витальевич, аспирант БрГУ, тел. (3953) 32-53-65

Закарюкин Василий Пантелеймонович, к.т.н., доцент ИрГУПС, тел. (3952) 63-8345

Зароднюк Татьяна Сергеевна, инженер, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, тел. (3952) 42-87-11, e-mail: tatyana_z@isem.sei.irk.ru

Засядко Анатолий Алексеевич, к.т.н., доцент, зам. первого проректора ИрГУПС, тел. (3952) 63-83-26

Зоркальцев Валерий Иванович, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, e-mail: zork@isem.sei.irk.ru

Иванов Антон Геннадьевич, аспирант каф. «Автоматизированные системы» ИрГТУ, e-mail: v20@istu.edu;

Измайлов Владимир Васильевич, профессор, д.т.н., профессор кафедры физики Тверского государственного технического университета, тел. (3952) 31-48-80, e-mail: iz2v@tvcom.ru

Климов Николай Николаевич, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой «Телекоммуникационные системы» ИрГУПС, тел. 8-914-877-08-03, e-mail: klinn@irgups.ru

Кобзов Александр Юрьевич, доцент, к.т.н., доцент кафедры «Экономики и менеджмента», БрГУ г. Братск, тел. (3953) 37-79-92

Кобзов Дмитрий Юрьевич, к.т.н., доцент кафедры «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование», БрГУ г. Братск, тел. (3953) 32-54-93

Козлов Владимир Васильевич, ведущий программист, Институт динамики систем и теории управления СО РАН, тел. (3952) 45-30-79, e-mail: rozen@icc.ru

Козлова Лариса Александровна, Ульяновский государственный университет, e-mail: love792003@mail.ru

Корольков Борис Петрович, д.т.н., профессор, академик РАТ, ИрГУПС, тел. (3952) 63-83-28, e-mail: profkor@gmail.com

Корольков Пётр Борисович, к.т.н., ИрГУПС, тел. (3952) 63-64-34, e-mail: korppp@gmail.com

Крюков Андрей Васильевич, д.т.н., профессор ИрГУПС, тел. (3952) 63-83-45, e-mail: and_kryukov@mail.ru

Кузнецов Кирилл Анатольевич, к.т.н., первый заместитель ген.директора, тел. (3952) 41-06-66, e-mail: kirill@himmash.irk.ru

Кузнецов Николай Константинович, д.т.н., профессор ИрГТУ, тел. (3952) 40-51-48

Логунов Александр Сергеевич, аспирант ИрГУПС, e-mail: 1984@mail.ru

Максимова Ольга Владимировна, аспирант БрГУ, г. Братск, тел. (3953) 33-20-08

Марцынковский Дмитрий Александрович, зам. нач. отдела Ассоциации по сертификации "Русский регистр", тел. 8-812-600-11-67

Массель Людмила Васильевна, д.т.н., профессор, гл. науч. сотр. ИСЭМ СО РАН, зав. каф. «Автоматизированные системы», ИрГТУ, e-mail: massel@isem.sei.irk.ru

Медвежонков Дмитрий Сергеевич, аспирант, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, тел. (3952) 42-97-64, e-mail: dmitry@isem.sei.irk.ru

Мельниченко Олег Валерьевич, к.т.н., доцент каф. ЭПС, ИрГУПС, тел. 89021702437

Молчанова Елена Ивановна, профессор каф. информатики, тел. 8-914-870-87-78

Мухопад Юрий Федорович, д.т.н., профессор, зав. каф. «Управление техническими системами», ИрГУПС, тел. 89500500291

Насников Дмитрий Николаевич, аспирант ИрГУПС, e-mail: nasnikov_dn@irgups.ru

Наумов Александр Евгеньевич, аспирант кафедры физики Тверского государственного технического университета. Тел. 34-35-06, тел. 8-920-690-12-84, e-mail: energy-online@mail.ru

Новицкий Евгений Александрович, зав. лабораторией процессов и аппаратов, тел. (3952) 41-11-06, e-mail: gm@himmash.irk.ru

Огар Петр Михайлович, д.т.н., профессор, проректор БрГУ, г. Братск, тел. (3953) 33-20-08

Пашков Николай Николаевич, к.т.н., доцент, зав. кафедрой «Вагоны и вагонное хозяйство», ИрГУПС, тел. (3952) 63-83-53

Перелыгина Александра Юрьевна, аспирант ИрГТУ, тел. (3952) 40-51-48

Пержабинский Сергей Михайлович, инженер, Институт систем энергетики им Л.А. Мелентьева СО РАН, тел. 8-908-661-55-35, e-mail: sergey_per85@mail.ru

Подкаменный Дмитрий Владимирович, аспирант, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева, г. Иркутск, тел. 8-914-8952240, e-mail: podkamenny@gmail.com

Резник Антон Юрьевич, соискатель ИрГУПС

Резник Юрий Николаевич, д.т.н., профессор, ректор Читинского государственного университета, тел. (3822) 41-64-44

Русанов Вячеслав Анатольевич, д. ф.-м. н., главный научный сотрудник Института динамики систем и теории управления СО РАН (ИДСТУ СО РАН), тел. (3952) 42-67-27

Сольская Ирина Юрьевна, д.э.н., профессор, проректор по ДПО, ИрГУПС, e-mail: solskaya_i@irgups.ru

Спорыхин Михаил Анатольевич, соискатель ИрГУПС, тел. (3952) 59-84-28

Степаненко Алексей Сергеевич, директор Иркутского филиала государственной академии правосудия, тел. (3952) 68-88-37

Суржик Виталий Витальевич, к.т.н., доцент, ИрГУПС, тел. (3952) 63-83-10, e-mail: surzhik_vv@irgups.ru

Тарасов Вячеслав Анатольевич, доцент БрГУ, тел. (3953) 33-20-08

Удилов Тимофей Васильевич, адъюнкт ФГОУ ВПО Восточно-Сибирский институт МВД России (ФГОУ ВПО ВСИ МВД России), тел. 89148885220

Узунов Владимир Геннадьевич, соискатель ИрГУПС, тел. 8-914-922-31-00

Упырь Роман Юрьевич, аспирант ИрГУПС, e-mail: msxp@list.ru

Федоров Вячеслав Викторович, аспирант ИрГУПС. тел. 89501100286

Федорова Елена Альбертовна, зам. директора ИДПО, ИрГУПС, тел. (3952) 63-83-10

Финогенко Иван Анатольевич, д.ф.-м.н., зав. отделом ИДСТУ СО РАН, тел. (3952) 35-30-51, e-mail: fin@icc.ru

Фискин Евгений Михайлович, к.т.н., доцент кафедры Радиоэлектроники и телекоммуникационных систем ИрГТУ, тел: 8-914-899-9321 e-mail: fmm1@rambler.ru

Фискина Маргарита Михайловна, к.т.н., доцент кафедры Радиоэлектроники и телекоммуникационных систем ИрГТУ, тел. 8-914-870-5503, e-mail: fmm1@rambler.ru

Хоменко Андрей Павлович, д.т.н., профессор, ректор ИрГУПС, тел. (3952) 63-83-11

Цыбульский Владимир Степанович, зам. начальника ВСЖД, тел. (3952) 64-45-70

Чикиркин Олег Валерьевич, главный инженер службы локомотивного хозяйства ВСЖД

Шарпинский Дмитрий Юрьевич, научный сотрудник Института динамики систем и теории управления СО РАН (ИДСТУ СО РАН).

Шишкин Зиновий Алексеевич, к.т.н., ведущий научный сотрудник, тел. (3952) 41-11-06, e-mail: shza@himmash.irk.ru

Шумилова Лидия Владимировна, к.т.н., докторант Читинского государственного университета, зам. директора по учебной работе ФГОУ СПО Забайкальский горный колледж, тел. (3822) 41-69-08

Министерство образования и науки Российской Федерации
Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Иркутский государственный университет путей сообщения
Российская инженерная академия

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование

№3(19)
2008

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Ответственный за выпуск **С.В.Елисеев**

Подписано в печать 13.11.2008. Формат 60x84/8.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. Печ. л. 19.
Уч.-изд. л. 19,5. Тираж 500 экз. Заказ №___
Подписной индекс по каталогу «Почта России»: 73693
ISSN: 1813-9108
Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ.
Сведения о журнале ежегодно
публикуются в международной справочной системе
по периодическим и продолжающимся изданиям
"Ulrich's Periodicals Directory"

ИД №06506 от 26.12.01
Иркутский государственный университет путей сообщения
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Отпечатано в типографии Иркутского государственного
университета путей сообщения, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по
делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.
Свидетельство ПИ №13-0574 от 24 декабря 2003 г.
Учредитель Иркутский государственный университет путей сообщения
(664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15)

© Издательство Иркутского государственного университета путей сообщения