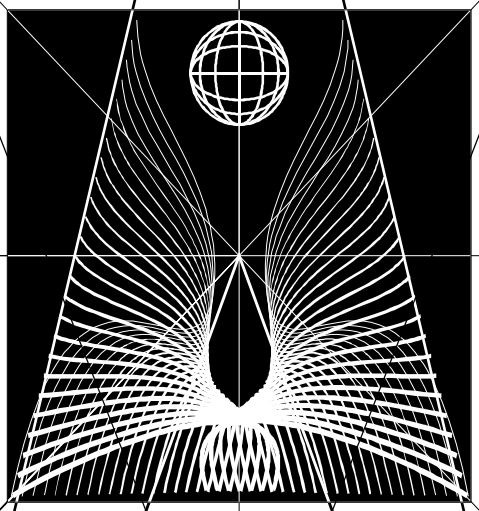
СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

МОДЕЛИРОВАНИЕ



НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

№3(23)
2009

© Иркутский государственный университет путей сообщения

Министерство образования и науки Российской Федерации
Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта

Иркутский государственный университет путей сообщения
Иркутский научный центр СО РАН
Российская инженерная академия

Предисловие издателя

Уважаемые читатели!

Очередной выпуск научного журнала «Современные технологии. Системный анализ. Моделирование» отражает результаты исследований и разработок, проводимых в регионе усилиями Института динамики систем и теории управления СО РАН, а также представителями научной общественности вузов и предприятий региона. Научные связи и контакты всегда создавали благоприятную атмосферу, стимулирующую проведение исследований комплексного характера. В настоящем номере журнала дается информация о крупных научных мероприятиях (конференциях, школах и семинарах), которые были проведены в текущем году. Весной 2009 года на базе Иркутского государственного технического университета были проведены традиционные «Винеровские чтения», в июне 2009 года проведены международные конференции по современным проблемам динамики машин, математическим подходам и информационным технологиям в технике и экономике. Редакция просит своих читателей присылать материалы в раздел о научной жизни региона.

Редколлегия

Предисловие издателя

Журнал издается с 2004 г.

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.
Свидетельство ПИ №13-0547 от 24 декабря 2003 г.
Учредитель: Иркутский государственный университет путей сообщения

© Издательство Иркутского государственного университета путей сообщения

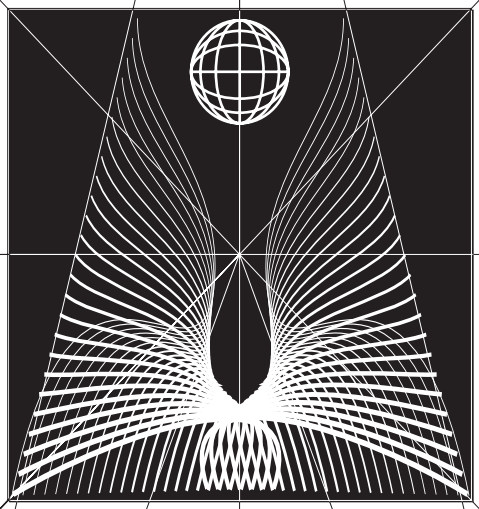
Министерство образования и науки Российской Федерации
Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта

Иркутский государственный университет путей сообщения
Иркутский научный центр СО РАН
Российская инженерная академия

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование



НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

№3(23)
2009

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. РАН
Б.Ю. Виноградов, ректор САПЭУ
Н.И. Воропай, директор Института систем энергетики-СО РАН, член-корр. РАН
М.И. Кузьмин, пред. Президиума ИНЦ СО РАН, академик РАН

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
Иркутский научный центр СО РАН
Российская инженерная академия

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование

СОДЕРЖАНИЕ

Раздел 1. Математическое моделирование в задачах динамики и управления

Бокмельдер Е.П., Горнов А.Ю., Дьякович М.П. Управляемая модель динамики смертности трудоспособного населения республики Бурятия 8

Бычков И.В., Хмельнов А.Е., Новицкий Ю.А., Ружников Г.М., Федоров Р.К., Гаченко А.С., Фереферов Е.С., Шигаров А.О., Парамонов В.А., Попова А.К. Разработка геоинформационной системы "Адресный план" г. Иркутска 14

Горнов А.Ю., Зароднюк Т.С. Метод "криволинейного" поиска глобального экстремума в задаче оптимального управления 19

Казаков А.Л., Маслов А.М. Построение модели неравномерного транспортного потока на примере железнодорожной грузовой станции 27

Климентова К.Б. Приложение задачи о *p*-медиане с предпочтениями клиентов для кластерного анализа клеток рака 33

Косов А.А., Овдиенко Е.В. Информационная система для анализа и прогнозирования грузоперевозок на ВСЖД на основе обработки статистических данных и экспертных оценок 38

Лакеев А.В. Системы линейных интервальных уравнений с конечным множеством решений 42

Маджара Т.И., Горнов А.Ю. Тестовая коллекция задач оптимального управления с вычислительными особенностями 49

Малтугуева Г.С., Юрин А.Ю. Алгоритм коллективного выбора на основе обобщенных ранжировок для поддержки принятия решений 57

Опарин Г.А., Богданова В.Г., Макеева Н.Г. Инструментальная среда параллельного решения систем булевых уравнений 62

Сидоров И.А., Опарин Г.А., Феоктистов А.Г. Технология организации распределенных вычислений в инструментальном комплексе DISCOMP 69

Сурков А.В. Оптимальное демпфирование в задачах стабилизации и быстродействия систем с запаздыванием 74

Тятюшкин А.И., Моржин О.В. Методы оптимизации и программная система для решения прикладных задач оптимального управления 78

Федоров Р.К., Хмельнов А.Е., Новицкий Ю.А., Ружников Г.М. Технология актуализации векторной карты зданий и сооружений города 83

Новицкий В.И., Финогенко И.А. Скользящие режимы управляемых систем с многозначными возмущениями 87

Черкашин Е.А., Ипатов С.А. Логический подход к обработке UML-моделей информационных систем 91

Шигаров А.О. Технология извлечения табличной информации из электронных документов разных форматов 97

Раздел 2. Системный анализ и его приложения

Елисеев С.В, Хоменко А.П., Упырь Р.Ю. Рычажные связи в задачах динамики вибрационных воздействий на машины и оборудование 104

Асламова В.С., Мусева Т.Н. Разностные схемы уравнений Навье-Стокса в переменных «Функция тока-вихрь» и их решение мотодом прогонки с использованием дробных шагов 120

Ереско С.П., Шатохин С.Н. Функциональные возможности и проблематика применения адаптивных гидростатических опор в шпиндельных узлах металлорежущих станков 128

Крюков А.В., Закарюкин В.П., Кобычев Д.С. Моделирование электромагнитных влияний контактной сети на смежные линии электропередачи с учетом высших гармоник 132

Огар П.М., Тарасов В.А., Турченко А.В. Герметизирующая способность тяжелонагруженных уплотнительных стыков 136

Рябов И.М., Чернышов К.В., Пылинская Т.В., Гасанов М.М., Абдулаев М.Ш., Гечекбаев Ш.Д. Математическое моделирование пневматической подвески транспортного средства с упругодемпфирующим приводом регулятора статического положения 143

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

Современные технологии
Системный анализ
Моделирование

СОДЕРЖАНИЕ

Раздел 2. Системный анализ и его приложения (продолжение)

Ереско Т.Т., Тубольцев А.А. Совершенствование конструкций и рабочего процесса гидропневмоударных агрегатов 148

Бардушко В.Д. Закон регулирования мощности параллельной компенсирующей установки на посту секционирования контактной сети 154

Алексеев В.А., Лукьянов А.В. Комплексная оценка технического состояния силовых маслонаполненных трансформаторов с помощью аппарата нечёткой логики 160

Гоппе Г.Г. Динамическая математическая модель потока жидкости в комплексе турбомеханизм - трубопроводная магистраль при двух способах управления производительностью 166

Мухопад Ю.Ф., Пашков Н.Н., Пунсык-Намжилов Д.Ц. Адаптивные системы управления с динамической структурной организацией в режиме реального времени 171

Кобзов Д.Ю., Усова С.В. «Экспресс-диагностика несущей способности гидроцилиндров машин 175

Шастин В.И. Ультразвуковой метод микроанализа эрозионной стойкости конструкционных материалов 180

Резник Ю.Н., Шумилова Л.В. Влияние физико-химических причин технологической упорности при извлечении дисперсного золота из минерального сырья 184

Шумилова Л.В. Методы эффективной подготовки к цианированию упорных сульфидных руд и концентратов 188

Логунов А.С. Экспериментальные исследования пневматической виброзащитной системы 192

Дамбаев Ж.Г., Егодуров Г.С., Гришко Д.В. К оптимальному проектированию систем подрессоривания транспортной системы 196

Раздел 3. Системный анализ и междисциплинарные подходы в исследованиях

Полюшкин Ю.В. Радиальный прирост деревьев как показатель динамики лесных экосистем 202

Лонцих П.А., Кононова Н.В. Принципы TQM, алгоритмы формирования и самооценка организации как инструмент реализации процессного подхода 215

Зоркальцев В.И., Киселева М.А. Равновесие Нэша производственных планов 219

Романова Г.В., Чертенкова О.С. Математическая модель компонентов, обуславливающих вариативность сердечного ритма 225

Кирий В.Г., Чан Ван Ан Модель тестирования как система случайных величин 229

Белякова А.Ю., Бузина Т.С., Вашукевич Е.В., Иваньо Я.М. Модели кластеров сельскохозяйственных предприятий с учетом экстремальных природных явлений 233

Анисимов М.М. Расширение сетей Ван-Хао для анализа «сложных» процессов 239

Конференции и семинары 246

Аннотации опубликованных статей 251

Сведения об авторах 270

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

Modern technologies
System analysis
Modeling

CONTENTS

Part 1. Mathematical modelling at dynamics and management tasks

Bockmelder E.P., Gornov A.Yu., Dyakovich M.P. Control model of mortality dynamics for able-bodied citizens of republic Buryatia 8

Gachenko A.S., Buchkov I.V., Hmelnov A.E., Novitskii Y.A., Ruzhnikov G.M., Fedorov R.K., Fereferov E.S., Shigarov A.O., Paramonov V.A., Popova A.K. Development of Geoinformation system "Address plan" of Irkutsk 14

Gornov A.Yu., Zarodnyuk T.S. The method of "curvilinear" search of algorithm of global of optimal control problem 19

Kazakov A.L., Maslov A.M. Construction of the nonuniform transport flow model with an example to the railroad cargo station 27

Klimentova K.B. The application of -median problem with clients' preferences for cluster analysis of cancer cell lines 33

Kosov A.A., Ovdienko E.V. Information system for analysis and forecasting of cargo transportations on ESRW based on statistical data processing and expert estimations 38

Lakeyev A.V. Systems of linear interval equations with the finite set of solution 42

Madzhara T.I., Gornov A.Yu. The test collection of the optimal control problems with the computational peculiarities 49

Maltugueva G.S., Yurin A.Yu Collective choice Algorithm on the basis of generalized rankings for decision support 57

Oparin G.A., Bogdanova V.G., Makeeva N.G. Toolkit for the the parallel solving of systems Boolean equations 62

Sidorov I.A., Oparin G.A., Feoktistov A.G. A technology of distributed computing organizing in the software tool DISCOMP 69

Surkov A.V. Optimal decrement for stabilization and speed of response problems of systems with delay 74

Tyatyushkin A.I., Morzhin O.V. Optimization methods and program system for solution of applied optimal control problems 78

Fedorov R.K., Hmelnov A.E., Novitskii Y.A., Rugnikov G.M. The technology of digital map actualization on a basis satellite image 83

Novitsky V.I., Finogenko I.A. Sliding modes of controlled systems with multiple-valued perturbations 87

Cherkashin E.A., Ipatov S.A. A logical approach to processing UML-models of information systems 91

Shigarov A.O. A technology for the extraction of tabular information from digital documents of various formats 97

Part 2. System analysis and their appendices

Eliseev S.V., Khomenko A.P., Upir' R.Yu. Lever ties in problems of dynamics of vibrating influences on machine and the equipment 104

Aslamova V.S., Museva T.N. Difference schemes for Navier-Stokes equations in variables "flow function-whirlwind" and sweep method solution with the use of rhythmic steps 120

Eresko S.P, Shatohin S. N. Function possibilities and problems of application adaptive hydrostatic supports in spindle knots of metal-cutting lathes 128

Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Kobichev D.S. Modeling of contact net high harmonics influence on transmission lines 132

Ogar P.M., Tarasov V.A., Turchencko A.V. Geometrize ability of heavy duty sealing joints 136

Ryabov I.M, Chernishov K.V., Pilinskaya T.V., Gasanov M.M., Abdulaev M.S., Gechekbaev S.D. Mathematical modelling of a pneumatic suspension bracket of a vehicle with elastic-damp drive of static position regulator 143

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

Modern technologies
System analysis
Modeling

CONTENTS

Part 2. System analysis and their appendices (continue)

Eresko T.T., Tubolcev A.A. Design and workflow perfection of hydro-pneumatic-shocking units 148

Bardushko V.D. The rule of capacity regulation of parallel compensating installation on a post of a contact network sectioning 154

Alekseev V.A., Luk`yanov A.V. The complex estimation of a technical condition power of oil-filled transformers by device of not precise logic 160

Goppe G.G. Mathematic models of fluid dynamics for fluid flow in pipe lines-turbo mechanism using two complex control production methods 166

Muhopad J.F., Pashkov N.N., Punsyk-Namjilov D.C. Adaptive control systems with dynamic structural organization in a mode of real time 171

Kobzov D.Y., Usova S.V. The instant exclusion of bearing value of machines hydrocylinders 175

Shastin V.I. Ultrasonic method of the microanalysis of kavitations erosion of the Construetive materials 180

Reznik Y.N., Shumilova L.V. The physical and chemical reasons influence of technological persistence at extraction of disperse gold from mineral raw material 184

Shumilova L.V. The methods of effective preparation cianidation persistent sulphidic ores and concentrates 188

Logunov A.S. Experimental researches of pneumatic vibroprotection systems 192

Dambaev Z.G, Egodurov G.S, Grishko D.V. Optimum designing of spring systems transport system 196

Part 3. System analysis and intersubject approaches in researches

Polyushkin Y.V. The radial increment of the trees as index of the forest ecosystem dynamic 202

Lontsikh P.A., Kononova N.V. Principles TQM, algorithms of formation and self-estimation of the organization as the tool of realization of the process approach 215

Zorkaltsev V.I., Kiseleva M.A. Nash equilibrium of production plans 219

Romanova G.V., Chertenkova O.S. Mathematical model of the components causing variability of an intimate rhythm 225

Kiriy V.G., Chan Van An Model of testing as system of random variables 229

Beljakova A.J., Buzina T.S., Vashukevich E.V., Ivanyo Y.M. Models of clusters of the agricultural enterprises in view of the extreme natural phenomena 233

Anisimov M.M. The extension of Wan-Hao networks for complicated processes analysis 239

The conferences and seminars 246

The abstracts of published articles 251

Information about the authors 270

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 И.И., Петров П.П. Совершенствование систем разработки угольных месторождений // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №1(21). С. __-__. 5 Рис. 2 Табл. Библиогр.: С. __ (9 назв.).

Рассмотрены способы разведки ...

Ключевые слова: месторождение, выработка, скважина.

UDC 621.879
Ivanov I.I., Petrov P.P. Improvement of systems of working out of coal deposits // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #1(21). P. __-__. Fig. 5. Tab. 2. Ref. 9.

Ways of investigation of deposits are considered ...

Keywords: deposit, development, chink.

Количество знаков в реферате - не более 400.

Индекс УДК, сведения об авторах и аннотации предоставляются в виде файла с расширением *.doc.

5) **Текст статьи предоставляется в виде файла с расширением *.doc** - документа, построенного средствами Microsoft Word 97 или последующих версий, **и распечаткой** на стандартных листах формата А4 (210х297 мм) вдве 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 - **1.75 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: 0,5 см.**
- При вставке формул использовать **Microsoft Equation 3** при установках: элементы формулы выполняются ***курсивом;*** для греческих букв и символов назначать шрифт Symbol, для остальных элементов - шрифт **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, tif **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 Р 7.0.5-2008. "Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления".**

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.** Email: **eliseev_s@inbox.ru**
Елисеев Сергей Викторович, Упырь Роман Юрьевич

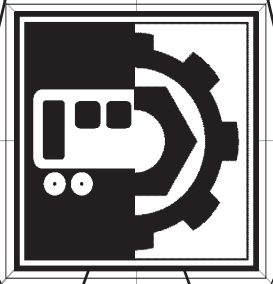
Министерство образования и науки Российской Федерации
Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта

Иркутский государственный университет путей сообщения
Иркутский научный центр СО РАН
Российская инженерная академия

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование



Раздел 1.
Математическое моделирование в задачах динамики и управления

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
- Телекоммуникации и связь
- Управление техническими системами
- Информационные технологии

Бокмельдер Е.П., Горнов А.Ю., Дьякович М.П. УДК 62.50

УПРАВЛЯЕМАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ СМЕРТНОСТИ ТРУДОСПОСОБНОГО НАСЕЛЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ БУРЯТИЯ

Введение. Качество жизни определяется не только получаемыми доходами, но и обеспеченностью потребностей граждан в услугах образования, здравоохранения, культурном и духовном развитии, информации, досуге и социальном обеспечении. Серьезной проблемой улучшения качества жизни россиян является сложная демографическая ситуация, характеризующаяся ростом удельного веса населения старше трудоспособного возраста и снижением общей численности населения. Доля населения трудоспособного возраста сократится с 63,3–63,5% в 2006–2008 годах до 57,6–57,9% в 2020–2025 годах [1], т.е. численность занятых в российской экономике сократится более чем на четверть, что может привести к серьезным проблемам функционирования экономики.

Восточные регионы страны оказываются с этой точки зрения в наихудшем положении. Согласно прогнозу Госкомстата численность населения Сибири к 2025 году уменьшится на 11%, население же центральных регионов сократится при этом только на 3%. Депопуляция – свершившийся факт демографического развития большинства регионов Сибири, в том числе и Республики Бурятия (РБ).

Десятилетняя динамика основных тенденций здоровья населения Республики Бурятия по данным Территориального органа Федеральной службы государственной статистики свидетельствует о росте заболеваемости и смертности, снижении продолжительности жизни. С 1995 по 2005 гг. уровень заболеваемости населения в РБ вырос на 49,3% , в том числе взрослого населения – на 36,4%. Ежегодно около 40% умерших жителей РБ составляют люди в трудоспособном возрасте. Основными причинами смерти населения республики Бурятия являются болезни системы кровообращения (49,5%), несчастные случаи, отравления и травмы (22,4%), новообразования (11,9%). По продолжительности жизни населения РБ занимает, соответственно, 72 место для мужчин и 71 место для женщин из 80 территорий России. Особенностью ситуации в Бурятии является существенно более высокая мужская смертность в трудоспособном возрасте и в сравнении с Россией, и в сравнении с Сибирским федеральным округом, сохранявшаяся на протяжении последних 10 лет [2].

Изучение процессов смертности и возможностей управления ими, понимание характера происходящих в них изменений на территориальном уровне, факторов и перспектив их развития представляют важную задачу, как с теоретических, так и с практических позиций. Смертность населения формируется под влиянием множества природных и социальных факторов, часть из которых являются управляемыми. Принятию управленческих решений по снижению смертности должен предшествовать анализ существующей ситуации, научно-обоснованный прогноз ее динамики на краткосрочную и среднесрочную перспективу. Таким образом, представляется актуальной цель исследования – моделирование смертности трудоспособного населения с учетом социально-экономических причин и поведенческих реакций населения. Объектом управления в настоящем исследовании являлись показатели смертности от разных причин, а также показатели социально-экономических условий жизни трудоспособного населения Республики Бурятия.

В ходе исследования были оценены социально-экономические условия жизнедеятельности населения Бурятии, в том числе и показатели развития здравоохранения по данным Территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Республике Бурятия за последнее десятилетие, даны количественные описания уровней смертности как объекта управления, изучены ее структура и особенности, выявлены внешние факторы, определяющие ее динамику, проанализированы возможные управляющие воздействия, определены ограничения на состояние объекта управления и на сами управления.

Используя опыт моделирования других авторов [3], а также на основании собственного опыта моделирования социально-экономических про-

цессов [4, 5] разработана и идентифицирована управляемая модель динамики уровня смертности населения Республики Бурятия трудоспособного возраста. При построении модели была исследована динамика уровней смертности от основных причин – болезней системы кровообращения; несчастных случаев, отравлений и травм, отравлений алкоголем, а также уровней первичной обращаемости за медицинской помощью. Численные эксперименты с моделью легли в основу предлагаемой методики управления уровнем смертности в условиях ограниченных денежных ресурсов с учетом возможных изменений социально-экономических факторов. Обоснована необходимость включения в модель оптимального управления смертностью наиболее значимых социально-экономических факторов, характерных для современной Бурятии – доход населения, расходы на здравоохранение, употребление алкоголя на душу населения, а также условный психосоциальный фактор, отражающий самосохранительное поведение человека.

Постановка задачи оптимального управления нормами смертности. Пусть в момент времени t

$x_1(t)$ – доля умерших трудоспособного возраста (20–60 лет) от болезней системы кровообращения;

$x_2(t)$ – доля умерших трудоспособного возраста от несчастных случаев, отравлений и травм;

$x_3(t)$ – доля умерших трудоспособного возраста от случайных отравлений алкоголем;

$y_1(t)$ – доля лиц, впервые в этом году обратившихся за медицинской помощью по поводу болезней системы кровообращения из числа лиц трудоспособного возраста;

$y_2(t)$ – доля лиц, впервые в этом году обратившихся за медицинской помощью по поводу несчастных случаев, отравлений и травм из числа лиц трудоспособного возраста.

Уровень (или норма, или доля) смертности – это безразмерная величина, удельный процент, поэтому она принимает значения в пределах от 0 до 1.

Выделим главные факторы, влияющие на динамику смертности, которыми мы хотим управлять:

1) социально-экономические факторы, увеличение которых способно положительно влиять на уровень смертности: $u_1(t)$ – доход на душу населения; $u_2(t)$ – расходы на здравоохранение на душу населения;

2) социально-экономические факторы, увеличение которых способно отрицательно влиять на уровень смертности: $u_3(t)$ – употребление алкоголя на душу населения, $u_4(t)$ – некий условный психосоциальный фактор, отражающий эмоциональное состояние человека, его страх перед жизнью, уровень устойчивости к стрессам.

Все управления, за исключением $u_4(t)$, будем исчислять в реальных единицах измерения, а $u_4(t)$ – в условных единицах (баллах), придадим ему начальное значение 10 баллов. Набор управлений обозначим через

$$u(t)=(u_1(t),\ u_2(t),\ u_3(t),\ u_4(t)).$$

Основная гипотеза при построении динамической модели изменения уровней смертности такова: темп прироста уровней смертности и обращаемости за медицинской помощью по поводу ведущих классов заболеваний пропорционален доле оставшихся в живых или не обратившихся за медицинской помощью. Поясним причину возникновения данной гипотезы.

Темпом прироста $r_x(t)$ переменной величины $x(t)$ в точке t называется отношение мгновенного прироста $x'(t)$ к исходному значению $x(t)$, т.е. $r_x(t)=\dfrac{x'(t)}{x(t)}$. Поэтому, если $0\le x(t)\le 1$ и темп прироста пропорционален $(1-x(t))$, то функция $x(t)$ удовлетворяет уравнению $x'(t)=\mu\, x(t)(1-x(t))$. Решение этого уравнения $x(t)=\dfrac{c\cdot e^{\mu\cdot t}}{1+c\cdot e^{\mu\cdot t}}$, где $c=\dfrac{x(0)}{1-x(0)}$, растет, если $\mu>0$, причем $x(t)\to 1$ при $t\to\infty$ и убывает, если $\mu<0$, причем $x(t)\to 0$ при $t\to\infty$. Такое поведение решения вполне соответствует реальной ситуации.

Распределенная модель. Если мы будем учитывать зависимость уровня смертности от возраста, то мы получим распределенную модель, т.е. будем рассматривать $x(t,s),\ y(t,s),\ u(t,s)$, где s – возраст. Тогда изменение уровня смертности и обращаемости будет удовлетворять следующей системе полулинейных гиперболических уравнений:

$$\frac{\partial x_1}{\partial t}+\frac{\partial x_1}{\partial s}=\mu_1(u)\cdot x_1(t,s)\cdot\left(1-\sum_{i=1}^{3}x_i(t,s)\right),$$

$$\frac{\partial x_2}{\partial t}+\frac{\partial x_2}{\partial s}=\mu_2(u)\cdot x_2(t,s)\cdot\left(1-\sum_{i=1}^{3}x_i(t,s)\right),$$

$$\frac{\partial x_3}{\partial t}+\frac{\partial x_3}{\partial s}=\mu_3(u)\cdot x_3(t,s)\cdot\left(1-\sum_{i=1}^{3}x_i(t,s)\right),$$

$$\frac{\partial y_1}{\partial t}+\frac{\partial y_1}{\partial s}=\mu_4(u)\cdot y_1(t,s)\cdot\left(1-\sum_{i=1}^{2}y_i(t,s)\right),$$

$$\frac{\partial y_2}{\partial t}+\frac{\partial y_2}{\partial s}=\mu_5(u)\cdot y_2(t,s)\cdot\left(1-\sum_{i=1}^{2}y_i(t,s)\right).$$

Здесь коэффициенты пропорциональности $\mu_i(s,u)=\mu_i(s,u_1,u_2,u_3,u_4)$ зависят от возраста и от управлений.

Функционал качества в полученной задаче оптимального управления может быть выбран так, чтобы уменьшить суммарные по времени и возрастам уровни смертности и обращаемости за медицинской помощью и минимизировать суммарные расходы. Поэтому целевой функционал имеет вид

$$J(x,y,u)=\int_{18}^{65}ds\int_{0}^{T}e^{-0{,}08\,t}\left(p_1\sum_{1}^{3}x_i(t,s)+p_2\sum_{1}^{2}y_i(t,s)+\right.$$
$$\left.+p_3u_1(t,s)+p_4u_2(t,s)\right)dt\ \to\ \min,$$

где $e^{-0{,}08\,t}$ – дисконтный множитель, а 0,08 – средняя банковская процентная ставка в республике. Параметры p_1, p_2, p_3, p_4 призваны сбалансировать ущерб от смертности и обращаемости за медицинской помощью по поводу ведущих классов заболеваний.

Сосредоточенная модель. Поскольку для подбора наиболее адекватных параметров и вычислительных экспериментов проще иметь дело с сосредоточенной моделью, был рассмотрен подробно именно этот вариант. В сосредоточенной модели усредняем зависимость от возраста и считаем доли смертности и обращаемости за медицинской помощью зависящими лишь от управления. Тогда динамика смертности опишется следующим образом:

$$x_1'(t)=\mu_1(u)\cdot x_1(t)\cdot\left(1-\sum_{i=1}^{3}x_i(t)\right),$$

$$x_2'(t)=\mu_2(u)\cdot x_2(t)\cdot\left(1-\sum_{i=1}^{3}x_i(t)\right),$$

$$x_3'(t)=\mu_3(u)\cdot x_3(t)\cdot\left(1-\sum_{i=1}^{3}x_i(t)\right),$$

$$y_1'(t)=\mu_4(u)\cdot y_1(t)\cdot\left(1-\sum_{i=1}^{2}y_i(t)\right),$$

$$y_2'(t)=\mu_5(u)\cdot y_2(t)\cdot\left(1-\sum_{i=1}^{2}y_i(t)\right).$$

При этом начальные значения, подсчитанные на основании статистических данных (данные за 2005 год), таковы:

$$x_1(0)=0.003112,\ \ x_2(0)=0.00461,$$
$$x_3(0)=0.000772,\ \ y_1(0)=0.34558,$$
$$y_2(0)=0.091261.$$

$$u_1(0)=u_1^0=5914\text{ руб.},\ \ u_2(0)=u_2^0=4398.9\text{ руб.},$$
$$u_3(0)=u_3^0=7.4\text{ л},\ \ u_4(0)=u_4^0=10\text{ баллов}.$$

Коэффициенты пропорциональности $\mu_i(u)$ – нормы смертности и обращаемости за медицинской помощью – будем искать в виде

$$\mu_i(u)=\nu_i+l_i\exp(-\varepsilon_{i1}u_1-\varepsilon_{i2}u_2)-$$
$$-q_i\exp(-\varepsilon_{i3}u_3-\varepsilon_{i4}u_4).$$

Здесь $\nu_i, l_i, q_i, \varepsilon_{ik}$ $(i=1,2,3,4,5;\ k=1,2,3,4)$ – некоторые числовые параметры. Такая форма норм обусловлена тем, что они должны уменьшаться с ростом u_1, u_2 и увеличиваться с ростом u_3, u_4, поэтому функции $\mu_i(u)$ убывают по переменным u_1, u_2 и возрастают по переменным u_3, u_4.

Семь коэффициентов – параметров функций $\mu_i(u)$ находим из начальных значений $u^0=(u_1^0,u_2^0,u_3^0,u_4^0)$ управлений и шести гипотетических значений, когда значения управлений u_1,u_2,u_3 по очереди удваиваются и когда значения управлений u_2, u_3, u_4 по очереди обнуляются.

Целевой функционал у нас имеет вид

$$J(x.y,u)=\int_{0}^{T}e^{-0{,}08\,t}\left(p_1(x_1(t)+x_2(t)+x_3(t))+\right.$$
$$\left.+p_2(y_1(t)+y_2(t))+p_3u_1(t)+p_4u_2(t)\right)dt\ \to\ \min.$$

Ограничения на управления примем следующие:

$$3000\le u_1\le 100000,\quad 3000\le u_2\le 25000,$$
$$2{,}5\le u_3\le 30,\quad 2\le u_4\le 30.$$

Нижняя граница управления u_1 равна прожиточному минимуму, нижняя граница управления u_3 обусловлена неким безопасным уровнем употребления алкоголя, а нижняя граница управления u_4 отражает тот факт, что жизнь без стрессов невозможна, и какие-то беспокойства человек всегда испытывает. Верхние границы управлений u_1,u_2 обусловлены возможностями государства, а верхние границы управлений u_3,u_4 – возможностями человека.

Таблица 1

l_i	q_i	ν_i	ε_{i1}	ε_{i2}	ε_{i3}	ε_{i4}
0,701364296	1,502231	0,6090092	0,0000524	0,000167	0,03438	0,033181
1,467703416	1,676063	0,4383639	0,0000974	0,000325	0,06815	0,047325
0,94356223	2,454205	0,8923337	0,0000678	0,000337	0,07241	0,033823
0,18192	1,200899	0,2444115	0,0000688	0,0	0,04098	0,055085
0,541812063	2,609405	2,1133033	0,0003069	0,0	0,01994	0,003926

Коэффициенты p_1, p_2, p_3, p_4, призванные сбалансировать ущерб от смертности и обращаемости за медицинской помощью по поводу ведущих классов заболеваний, мы подбирали в процессе множества численных экспериментов и остановились на следующих значениях: $p_1 = 1{,}2$, $p_2 = 0{,}05$, $p_3 = 5 \cdot 10^{-7}$, $p_4 = 10^{-7}$. Такие цифры выбраны с тем, чтобы в целевом функционале каждое слагаемое вносило примерно одинаковый вклад в общую сумму. Начальные значения параметров были выбраны в соответствии со статистическими данными, остальные значения – основываясь на мнении экспертов-специалистов в области медико-демографических и эпидемиологических исследований.

Так, мы предположили несколько вариантов поведения объекта управления через год после определенных управленческих воздействий:

1) в экономическом и психологическом состоянии работающих граждан ничего не изменяется, тогда x_1 увеличится примерно на 0,2%, x_2 – на 1,5%, x_3 – на 1,7%, x_4 – на 1,3%, x_5 – на 0,8%;

2) потребление алкоголя увеличивается в 2 раза, тогда x_1 увеличится примерно на 23,7%, x_2 – на 30%, x_3 – на 35%, x_4 – на 10,25%, x_5 – на 31,5%;

3) потребление алкоголя исключается, тогда x_1 уменьшится примерно на 19%, x_2 – на 32,8%, x_3 – на 50%, x_4 – на 10,3%, x_5 – на 26,5%;

4) при двукратном увеличении расходов на здравоохранение на душу населения x_1 уменьшится примерно на 10%, x_2 – на 13%, x_3 – на 3%, а x_4 и x_5 не изменятся, так как обращаемость от улучшения ситуации в здравоохранении может только вырасти, а наша цель при моделировании состоит в уменьшении обращаемости;

5) при двукратном увеличении среднего дохода на душу населения x_1 уменьшится примерно на 3,6%, x_2 – на 6,7%, x_3 – на 2,8%, x_4 – на 4,5%, x_5 – на 3,5%;

6) при прекращении государственного финансирования здравоохранения x_1 увеличится примерно на 35%, x_2 – на 16,5%, x_3 – на 68%, а x_4 и x_5 снова считаем не зависящими от этого фактора;

7) при снижении уровня психоэмоциональной стрессированности населения до нуля x_1 уменьшится примерно на 26%, x_2 – на 30,5%, x_3 – на 32,6%, x_4 – на 21,8%, x_5 – на 6,8%.

Значения параметров, полученные согласно этим предположениям, представлены в табл. 1.

Численные эксперименты с моделью. Численные эксперименты с моделью проводились с помощью программного комплекса OPTCON [6]. С помощью численных экспериментов мы проверяли модель на адекватность, подбирали параметры модели, при которых решение соответствует реальному состоянию, искали оптимальное управление, позволяющее минимизировать целевой функционал. Было проведено более 100 численных экспериментов, большинство из которых были связаны с уточнением коэффициентов p_1, p_2, p_3, p_4. Расчеты проводились с прогнозом на 5 лет $(T = 5)$ и на 8 лет, чтобы выявить реальную картину на временной промежуток 5 лет, поскольку в процессе оптимизации основная экономия денежных ресурсов происходит на конечном отрезке времени.

Вначале мы проинтегрировали систему без оптимизации, чтобы узнать, как будут меняться нормы смертности и обращаемости, если сохранится нынешняя ситуация. Расчеты показали, что за 5 лет нормы смертности от болезней системы кровообращения $x_1(t)$, несчастных случаев, отравлений и травм $x_2(t)$, от случайных отравлений алкоголем $x_3(t)$ увеличатся на 10,3, 2,6 и 6%, соответственно; нормы обращаемости за медицинской помощью по поводу болезней системы кровообращения $y_1(t)$, несчастных случаев, отравлений и

травм $y_2(t)$ увеличатся на 27 и 22,3%, соответственно.

Построенная модель позволяет рассчитывать сценарии изменения смертности и обращаемости за медицинской помощью при различных сценариях развития экономики республики. Нами показано, что если средний доход на душу населения составит 12000 руб., расходы на здравоохранение на душу населения составят 8000 руб., употребление алкоголя снизится до 7 л, а стрессовая ситуация улучшится до 8 баллов (что вполне реально с повышением доходов населения), то за 5 лет нормы смертности от болезней системы кровообращения $x_1(t)$, несчастных случаев, отравлений и травм $x_2(t)$ и случайных отравлений алкоголем $x_3(t)$ уменьшатся в 2,7, 3,3 и 2,8 раз соответственно; нормы обращаемости за медицинской помощью по поводу болезней системы кровообращения $y_1(t)$ и несчастных случаев, отравлений и травм $y_2(t)$ уменьшатся на 26,4 и 18,3%, соответственно.

Предложенная модель позволяет найти оптимальный сценарий, который показывает, что смертность и обращаемость можно снизить в десятки раз при не слишком больших расходах ($u_1 \approx 12000$, $u_2 \approx 10000$), но употребление алкоголя и психо-эмоциональный стресс необходимо снизить до минимума, что мало реально в современном мире (см. графики управлений и состояний при оптимальном режиме).

Численное решение задачи оптимизации выявило динамику оптимальных управлений и состояний, которая выражается следующим образом:

1) если экономить деньги на здравоохранение и зарплату, составляющую основную часть доходов населения, то нормы смертности и обращаемости уменьшить не удастся, они лишь возрастут;

2) если вовсе не экономить $(p_3 = p_4 = 0)$, то нормы смертности и обращаемости можно уменьшить, но среднедушевой доход нужно немедленно поднять до 100 тыс. руб., а расходы на здравоохранение – до 14000 руб. и потом постепенно можно снижать эти цифры, когда смертность практически исчезнет. Таким образом, модель отражает тот факт, что эффективность вложений в личный доход человека намного выше, чем напрямую в здравоохранение;

3) употребление алкоголя и психо-эмоциональный стресс настолько сильно влияют на смертность, что оптимальным всегда является их нижний уровень. Кроме того, на оптимальные расходы нужно переходить не постепенно, а немедленно, при этом оптимальные расходы снижаются вблизи конца промежутка интегрирования (рассматриваемого временного интервала). При этом нормы смертности и обращаемости за медицинской помощью снижаются постепенно, и наибольшее снижение происходит на отрезке времени, близком к концу промежутка интегрирования. Такое поведение управлений продиктовано спецификой целевого функционала, поэтому мы считаем, что близким к реальному будет поведение управлений $u_i(t)$ и состояний $x_i(t)$, $y_i(t)$ на первой половине временного промежутка прогнозирования.

Результаты численных экспериментов с моделью, а также графики уменьшения уровней смертности и обращаемости при оптимальных управлениях представлены на рисунках.

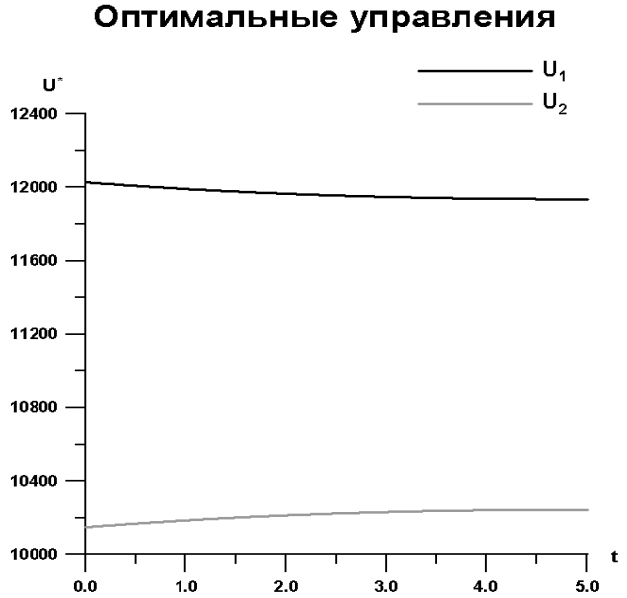


Рис. 1. Динамика оптимального вложения средств (руб.): u_1 – доход на душу населения; u_2 – расходы на здравоохранение на душу населения; t – время (годы)

Доли умерших: x_1 – от болезней системы кровообращения; x_2 – от несчастных случаев, отравлений и травм; x_3 – от случайных отравлений алкоголем. Доли впервые обратившихся за медицинской помощью по поводу: y_1 – болезней системы кровообращения; y_2 – несчастных случаев, отравлений и травм из числа лиц трудоспособного возраста; t – время (в годах); p_i – коэффициенты, призванные сбалансировать ущерб от смертности и обращаемости за медицинской помощью с расходами; J – целевой функционал.

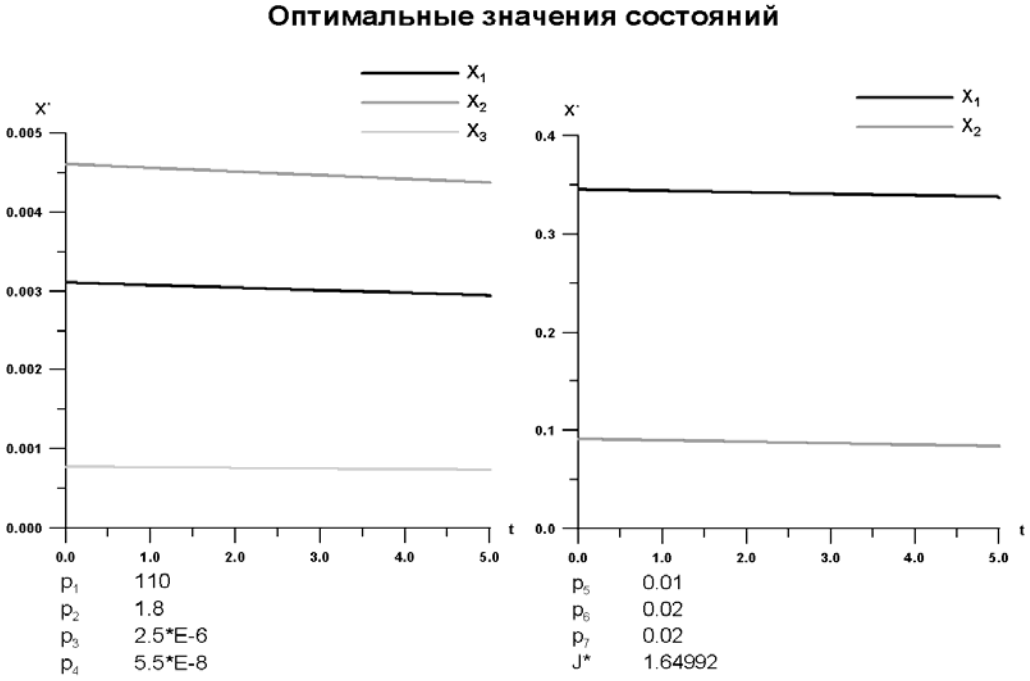


Рис. 2. Динамика смертности и обращаемости населения в трудоспособном возрасте при оптимальном вложении средств

Заключение. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости социальной направленности расходов при условии обеспечения высоких темпов развития экономики, что определяет возможность качественных изменений в общественных финансах с учетом факторов-мишеней для управляющих воздействий, направленных на снижение смертности. Для адекватного выбора и оптимизации таких воздействий необходимо дальнейшее детальное описание смертности (как минимум, с учетом ее половозрастного и географического распределения). Результаты моделирования могут быть также использованы представителями властных структур Республики Бурятия, специалистами в области общественного здоровья, научными сотрудниками, занимающимися проблемами оценки и прогноза медико-демографической ситуации.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, проект № 09-07-00267, РГНФ, проекты № 06-02-00055 и № 09-02-00650, СО РАН, междисциплинарного интеграционного проекта № 4.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Население России. XI-XII ежегодные демографические доклады / Под ред. А.Г. Вишневского. – М.: Наука, 2006. – С. 240-241.
2. Проблемы смертности в Республике Бурятия и пути ее снижения // Материалы научно-практической конф. – Улан-Удэ. – 2006. – 261 с.
3. Моделирование и оценка состояния медико-эколого-экономических систем / Под ред. В.А. Батурина. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. – 249 с.
4. Дьякович, М.П. Распределенная управляемая модель состояния здоровья рабочих крупного предприятия Иркутской области / М.П. Дьякович, Е.П. Бокмельдер, А.Ю. Горнов // Материалы Междунар. науч.-практ. конф. «Математическое моделирование социально-экономических процессов». – М.: МГСУ, 2004. – С. 58-61.
5. Feichtinger, G. An Approach to Mathematical Modelling of Age-Specific Social and Economic Processes / G. Feichtinger, A.Yu. Gornov, E.P. Bockmelder // Тр. 12 Байкальской междунар. конф. «Методы оптимизации и их приложения». – Иркутск: Изд-во ИСЭМ СО РАН, 2001. – С. 216-222.
6. Горнов, А.Ю. Алгоритмы решения задач оптимального управления с терминальными ограничениями / А.Ю. Горнов // Вычислительные технологии. – 2008. – Т. 13 (4). – С. 44-50.

Бычков И.В., Хмельнов А.Е., Новицкий Ю.А., Ружников Г.М., Федоров Р.К., Гаченко А.С., Фереферов Е.С., Шигаров А.О., Парамонов В.А., Попова А.К.

УДК 681.142.2

РАЗРАБОТКА ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ «АДРЕСНЫЙ ПЛАН» Г. ИРКУТСКА

Использование современных геоинформационных систем (ГИС) одно из актуальных направлений повышения эффективности муниципального управления, что обусловлено адекватностью программного обеспечения ГИС характеру задач территориального развития, возможностью использования тематических пространственных данных (ПД) и цифровой модели территории для принятия решений, их фиксации, отображения последствий [1, 6–8].

Пространственные данные (geospatial data), геопространственные данные – цифровые данные о пространственных объектах, включающие сведения об их местоположении и свойствах, пространственных и непространственных атрибутах. Полное описание пространственных данных складывается из двух взаимосвязанных частей: позиционных данных и непозиционных данных – описания пространственного положения и тематического содержания данных, топологогеометрических и атрибутивных данных (геометрии и семантики) [2].

На множестве ПД определены операции: ввода, экспорта, импорта, обмена, предобработки, анализа, вывода, визуализации и т.п., включённые в состав функциональных возможностей ГИС.

Будучи системообразующим фактором, цифровая модель территории интегрирует ПД и формирует инфраструктуру единых информационных ресурсов [2–3].

Муниципальная геоинформационная система (МГИС) - программно-аппаратный комплекс, решающий совокупность задач по хранению, отображению, обновлению и анализу пространственной (местоположение в пространстве) и атрибутивной (адрес, кадастровый номер, этажность и прочие характеристики здания) информации по объектам городской территории. [3]. Внедрение МГИС позволяет сформировать единую топографически корректную карту городской территории на основе всего многообразия имеющегося материала.

Основные цели создания муниципальной геоинформационной системы:

- формирование единого информационного пространства города, содержащего достоверные сведения о территории, регламентах её использования, объектах городской среды, недвижимости, транспортной и инженерной инфраструктуре;
- автоматизация текущей деятельности и типовых процессов обработки информации в организациях и структурных подразделениях органов городского управления, а также информационное обеспечение и поддержка процессов в области территориального управления, анализа и прогнозирования развития городской территории;
- обеспечение доступа населения к открытым информационным ресурсам города.

Геоинформационная система «Адресный план» г. Иркутска

Несмотря на то, что для г. Иркутска уже несколько лет назад был подготовлен векторный цифровой топографический план (ЦТП) в масштабе 1:2000, а для некоторых слоёв и в масштабе 1:500, существует ряд обстоятельств, которые препятствуют полномасштабному использованию ЦТП в составе МГИС. Во-первых, невозможно непосредственно использовать ЦТП в открытой части муниципальной информационной сети (не говоря уже о его публикации в Интернет), поскольку эта карта содержит информацию, распространение которой не допускается. Во-вторых, адресная информация, содержащаяся в семантических характеристиках объектов карты, является в значительной степени неполной и неточной. В-третьих, для большинства задач, которые могут решаться с использованием электронной карты

города, ЦТП является избыточным: большинство содержащихся на нём объектов не используется при решении этих задач, а лишь затрудняет чтение карты.

С юридической точки зрения адрес присваивается объекту после его регистрации в адресном реестре (АР). В г. Иркутске за содержание АР отвечает МУП БТИ г. Иркутска. Таким образом, оказывается невозможным использование информации ЦТП, находящейся в закрытой сети для ведения АР.

В результате анализа сложившейся ситуации была поставлена задача создания информационного ресурса ГИС «Адресный план» (АП), который, в основном, должен содержать пространственную информацию лишь по тем объектам ЦТП, которые имеют отношение к адресации. При этом пространственная информация в АП должна быть представлена в агрегированном виде, и из неё должны быть исключены объекты и семантические характеристики объектов ЦТП, наличие которых препятствует использованию АП в открытой сети. Предполагается, что наличие АП, наряду с использованием специализированных слоев электронных карт, будет достаточно для работы большинства информационных систем, входящих в состав МГИС.

АП должен строиться на основе единой ЦТП города с привлечением других цифровых карт, например, карт зонирования территории, а также адресного, градостроительного, земельного и других городских реестров и баз данных. АП поддерживает инвентаризацию и учет (паспортизацию) объектов территории города (объектов недвижимости, земельных участков, в том числе инженерных коммуникаций, временных сооружения и т.д.). Система обеспечивает централизованное хранение, анализ, поддержку в актуальном состоянии и предоставление информации об адресном хозяйстве – пространственных данные и семантических (атрибутивных) данных.

Помимо электронной карты в состав АП входит БД «Адресный план», содержащая дополнительную информацию об адресах, например, историю изменения адресов объектов и наименований улиц, сведения о соответствии объектов карты адресному реестру. При создании ГИС АП г. Иркутска для привязки к ЦТК информации существующих БД, использовалась технология обработки метаописаний данных [6–8]. Пространственные данные хранятся в виде файлов формата КАРТА 2005 ГИС Панорама, а семантические данные – в реляционной базе данных MS SQL Server. Общая схема информационных потоков ГИС АП представлена на Рис. 1.

В ГИС АП для учёта существующих ограничений на использование цифровой картографической основы (М 1:500) реализованы режимы, как ограниченного (регламентированного), так и открытого доступа через Интернет для организации и жителей города.

ЦТП для обеспечения безопасности размещен на сервере закрытой сети, -которая физически разделена с открытой.

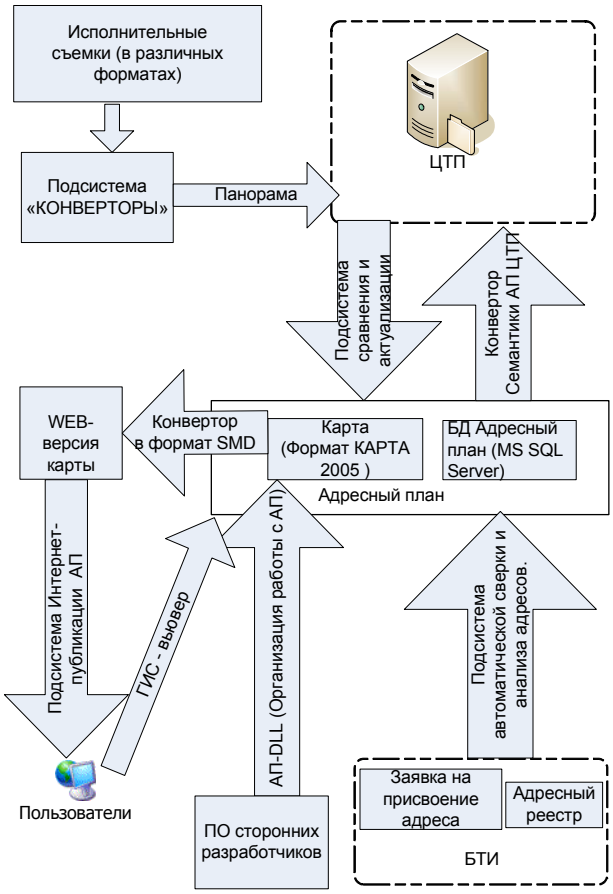


Рис. 1. Схема информационных потоков

Поэтому ГИС Адресный план разделена на две части автоматизированное рабочее место (АРМ) открытой сети и АРМ закрытой сети, обмен данными между частями осуществляется с помощью мобильных цифровых носителей (дискеты, лазерные диски, флэш память и т.д.).

При создании ГИС «Адресный план г. Иркутска» сформирован в соответствии с [4] электронный классификатор объектов в формате ГИС «Карта 2005», позволяющий представить:

- структуру адресации – элементы уличной-адресной сети (улица, проспект, переулок, проезд, бульвар, микрорайон, другой массив территории) находящиеся в границах города Иркутска, имею-

щие собственное наименование и формирующие адрес объекта недвижимости, содержащийся в справочнике адресов города (адресном реестре – АР);

- объекты адресации – объекты недвижимости (здания, сооружения, в том числе и незавершенное строительство), расположенные на территории г. Иркутска имеющие адрес, содержащийся в АР;

В классификаторе созданы условные обозначения и семантические характеристики объектов АП.

В состав ГИС АП входят следующие подсистемы:

Конвертер (генератор) дежурного цифрового топографического плана (далее ЦТП) с классификатором объектов цифровой топографической карты содержащихся на ЦТК «Для служебного пользования» в АП и правилами формирования объектов АП на основании согласованного перечня объектов дежурного ЦТП (Рис. 2). Конвертер обеспечивает: создание в случае отсутствия, или изменение конфигурации объекта, содержащегося в АП, на основании объектов дежурного ЦТП, составляющих объект АП; сохранение информации об объектах используемых при конвертировании (генерации) объектов дежурного ЦТП в объекты АП; копирование соответствующих измененных семантических характеристик объекта АП в составляющие его объекты дежурного ЦТП.

Конвертеры материалов исполнительных съемок, съемок текущих изменений, материалов межевания, топографических съемок, представленных в электронном виде из форматов, используемых наиболее распространённым программным обеспечением изыскательских и проектных организаций (Credo, Autocad, ArcView) в формат ГИС «Карта 2005». Отдельно разработан универсальный текстовый обменный формат дежурного ЦТП и конвертер материалов, представленных в этом формате, в ГИС «Карта 2005». Конвертеры обеспечивают однозначный перенос метрики, условных обозначений и семантических характеристик объектов и могут быть использованы для внесения изменений, представленных в материалах съёмок, в дежурный ЦТП.

Подсистема автоматической сверки и анализа соответствия единого общегородского АР объектов недвижимости и АП, обеспечивающая доступ к удаленному серверу, содержащему АР, и связь объекта АП с соответствующей ему записью в АР. Подсистема по запросу, либо в автоматическом режиме отслеживает изменения в АР и в АП, определяет несоответствия адресов в АР и семантических характеристиках объектов АП или отсутствие связанного объекта, и информирует администраторов о выявленных проблемах.

Подсистема автоматического сравнения и актуализации содержания АП и дежурного ЦТП, которая отслеживает изменения в дежурном ЦТП, сравнивает с АП (с сохранением в истории изменений), формирует объекты для последующего конвертирования (генерации) в АП.

Подсистема формирования истории АП, которая формирует карты объектов АП и соответствующих им объектов дежурного ЦТП, адресная информация по которым устарела или изменилась.

Подсистема Интернет публикации АП в растровом виде, которая обеспечивает просмотр, навигацию и управление составом отображения АП. Подсистема также обеспечивает вывод растровых изображений в формате достаточном для работы с системой, при этом размер и объем занимаемой памяти растрового изображения.

Генератор отчетных форм для обеспечения взаимодействия департамента архитектуры и градостроительства комитета по градостроительной политике администрации г. Иркутска и МУП «Бюро технической инвентаризации г. Иркутска», в части касающейся функционирования АП.

Подсистема связи баз тематических пространственных данных структурных подразделениях администрации г. Иркутска с АП.

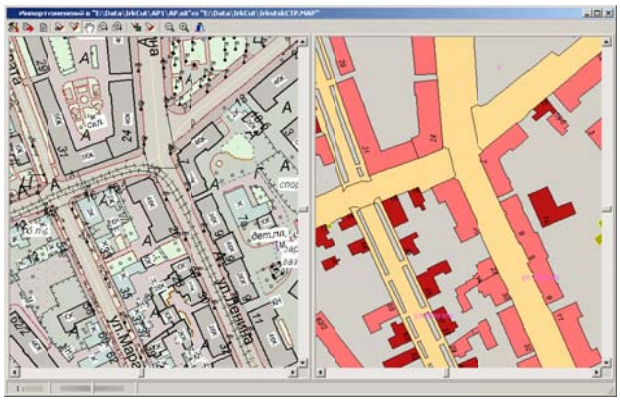


Рис. 2. Конвертер ЦТП → АП. Выполнено слияние по правилам объектов с одинаковым адресом и объектов, относящихся к одной улице

Функциональная структура ГИС АП

Адресный план неразрывно связан с существующим дежурным цифровым топографическим планом (ЦТП). В адресный план семантическая и метрическая информация поступает из ЦТП. Семантическая информация, касающаяся адресов, поступает из АП в ЦТП. Взаимодействие происходит следующим образом. ЦТП на основе набора правил формирования объектов для АП из ЦТП в

закрытой сети конвертируется в промежуточное представление, которое сравнивается с текущим АП. Данная подсистема производит контроль идентификационных номеров и состояний объектов АП, получение информации об изменениях адресов. В результате работы подсистемы получается новая актуализированная версия АП. Информация об изменениях адресов вносится в ЦТП конвертором, указанным выше.

Поступление метрической информации в ЦТП производится из исполнительных съемок в электронном виде из программного обеспечения изыскательских и проектных организаций с соответствующим электронным классификатором для внесения изменений в дежурный ЦТП. Исполнительские съемки поступают форматах: Credo, AutoCad, ArcView, ГИС «Карта 2005», универсальном текстовом обменном формате дежурного ЦТП. Конвертация из этих форматов в формат ГИС «Карта 2005» производится с помощью разработанных конверторов. Далее метрическая информация переносится в ЦТП с помощью ГИС «Карта 2005».

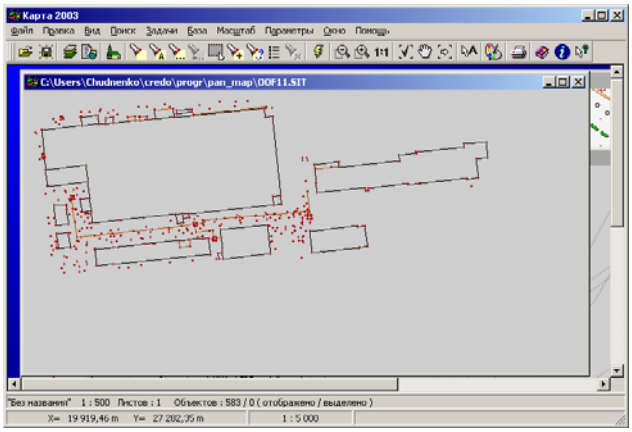


Рис. 3. Пример карты, конвертированной из Credo в Карта 2005

Объекты адресного плана постоянно изменяются и необходимо хранить информацию о снесенных объектах, как метрику, так и семантику. Обработку такой информации осуществляет подсистема формирований историй. Оператор в этой системе может занести информацию об объекте в историю, т.е. сохранить ее в СУБД и удалить из текущего АП. По запросу данная система может сформировать слой снесенных домов на определенную оператором дату.

Взаимодействие АП с АР производится следующим образом. Поступление семантической информации об адресах производится из АР с помощью подсистемы автоматической сверки и анализа адресов. Данная подсистема обращается напрямую к базе данных БТИ и изменения адресной информации сохраняет в своей БД и на карте Адресного плана. Появление новых объектов в АП отслеживается подсистемой автоматического сравнения и актуализации, представленной выше. В результате формируется список новых объектов. Оператором, с помощью подсистемы «Генератор отчетных форм», создаются печатные формы заявок на присвоение адресов. Затем эти заявки отправляются в БТИ, где по мере обработки вносят адреса в Адресный реестр, из которого они попадают в АП.

Предоставление АП пользователям производится с помощью четырех подсистем:

- подсистема Интернет публикация ГИС АП;
- подсистема просмотра векторной и растровой картографической, тематической и аналитической информации АП;
- прикладной программный интерфейс для включения в приложения, разрабатываемые сторонними организациями, функций взаимодействия с АП;
- генератор отчетных форм.

Все системы (кроме последней) позволяют просматривать АП, получать информацию об объектах АП, при этом исключается непосредственный доступ к файлам карт АП. Таким образом предлагается бороться с возможной утечкой содержащейся в АП информации.

Подсистема Интернет публикации использует представление карт в разработанном авторами формате SMD, который оптимизирован для быстрого отображения больших объёмов информации. Разработаны конвертеры в формат SMD из формата ГИС «Карта 2005» (и ряда других), которые обеспечивают не только точную передачу метрики и семантических характеристик объектов, но и близкое к оригиналу представление объектов условными знаками**.** Серверная часть системы работает на базе Web-сервера Internet Information Server (IIS). Подсистема просмотра векторной и растровой картографической, тематической и аналитической информации АП позволяет помимо просмотра АП выполнять редактирование пользовательских слоев. Данная подсистема работает с АП напрямую через сетевое окружение.

Разработан пользовательский интерфейс, выполненный в виде динамической библиотеки, для создания программных систем, работающих с АП, сторонними организациями, который позволяет создавать окна с картой АП, находить на карте объект по адресу, получать информацию по объекту, выбранному пользователем на карте, и т.д.

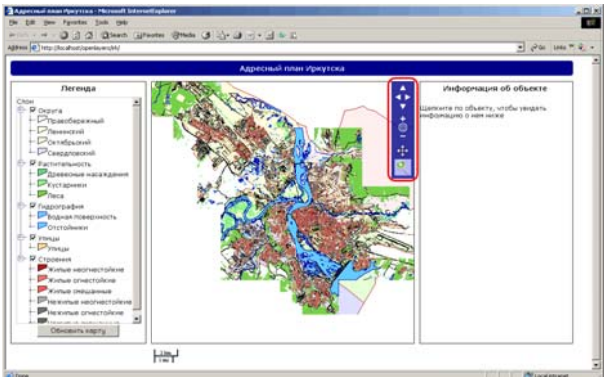


Рис. 4. Навигация по карте

Сверка адресов

Для того чтобы решить проблему с неполнотой и неточностью содержащейся на ЦТП адресной информации была выполнена сверка этой информации с другими источниками.

Для подготовки информации ГИС АП были использованы:

- дежурная цифровая топографическая основа (карта) города, актуализируемая «Департаментом архитектуры и градостроительства комитета по градостроительной политике г. Иркутска»;
- адресный реестр (АР) МУП «Бюро технической инвентаризации г. Иркутска»;
- карта объектов адресации, которая независимо ведётся в МУП БТИ с использованием ГИС «Кредо»;
- космический снимок территории города (Рис. 4).

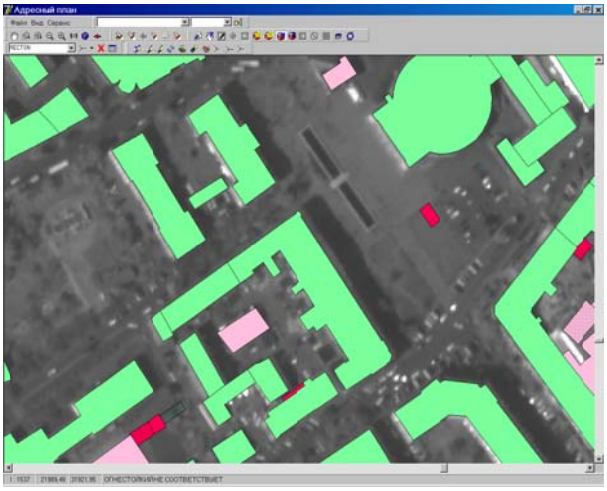


Рис. 4. Обработка космического снимка (цветом отображается степень соответствия космоснимку объекта векторной карты)

Для выполнения сопоставления карты адресуемых объектов ЦТП и карты БТИ была подготовлена таблица пересекающихся объектов двух этих карт, и разработано приложение, позволяющее проанализировать правильность указания адреса при расхождении информации сопоставляемых карт. Помимо обрабатываемых карт, важным источником информации для оператора является отображаемый в приложении космоснимок. Результатом работы приложения является таблица соответствий объектов с указанием уточнённого адреса. Сопоставление карт позволило обнаружить ошибки на каждой их них. В результате выполненной работы были уточнены адреса более 10000 объектов ЦТП.

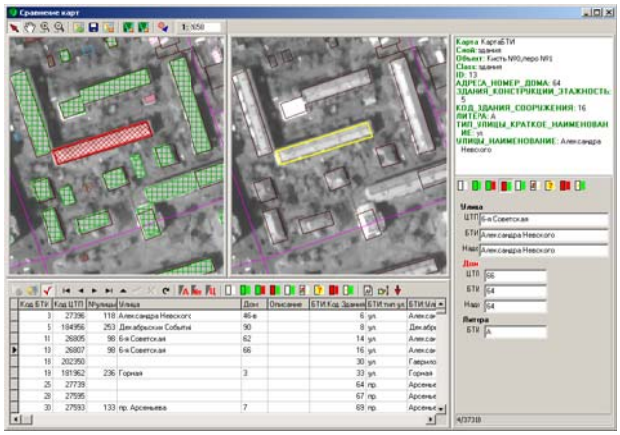


Рис. 5. Сравнение карты адресуемых объектов ЦТП с картой БТИ

Результатом работы по сверке адресов является актуализированная информация (карты, выборки данных, отчеты и т.д.) о состоянии адресного хозяйства.

В ходе подготовки ГИС АП созданы карты (в векторном формате данных ГИС «Карта 2005») и перечни объектов АП: отсутствующих в АР; расположенных вне структуры адресации; имеющих несколько адресов; имеющих одинаковый адрес; отсутствующих на космоснимке; имеющихся на космоснимке, но отсутствующих на АП. В частности, по космоснимку было обнаружено порядка 9000 объектов, которые не были представлены на ЦТП.

Заключение

В ходе подготовки адресного плана было выполнено существенное уточнение адресной составляющей ЦТП. Использование космоснимка позволило в сжатые сроки выявить большое количество новых (не обозначенных на векторной карте) и изменённых (перестроенных) объектов. Внедрение ГИС «Адресный план г. Иркутска» открывает путь к интеграции ЦТП в инфраструктуру информационных ресурсов города. Разработанное

программное обеспечение позволяет организовать работу пользователей различных подсистем МГИС с информацией АП, обеспечивая при этом защиту информации АП.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ грант № 08-07-00163-а и президентской программы «Ведущие научные школы РФ» грант № НШ–1676.2008.1.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Томилин, В.В. Использование ГИС в муниципальном управлении / В.В. Томилин, Г.М. Нориевская // Практика муниципального управления. – 2007. – № 7.
2. Иванникова, А.Д. Геоинформатика / А.Д. Иванникова, В.П. Калугина, А.Н. Тихонова, В.Я. Цветкова. – М.: МАКС Пресс, 2001. – 349 с.
3. Берлянт, А.В. Геоинформатика. Толковый словарь основных терминов / А.В. Берлянт, С.К. Кошкарева. – М.: ГИС-Ассоциация, 1999. – 203 с.
4. Постановление мэра г. Иркутска от 14.01.2002 № 031-06-26/2 «Об упорядочении адресов объектов недвижимости на территории г. Иркутска».
5. Бычков, И.В. Применение ГИС- и ВЕБ-технологий для создания интегрированных информационно-аналитических систем / И.В. Бычков, Е.С. Фереферов, А.Е. Хмельнов // Вычислительные технологии. – 2007. – Т. 12, спец. вып. № 3. – С. 5–20.
6. Гаченко, А.С. Муниципальная информационная система обеспечения градостроительной деятельности / А.С. Гаченко, Г.М. Ружников, Е.С. Фереферов, А.Е. Хмельнов // Вычислительные технологии. – 2008. – Т. 13, спец. вып. № 1. – С. 11–16.
7. Бычков, И.В. Применение ГИС- и Веб- технологий для создания интегрированных информационно-аналитических систем / И.В. Бычков, А.С. Гаченко, А.К. Попова, Г.М. Ружников, Е.С. Фереферов, А.Е. Хмельнов // Вычислительные технологии. – 2007. – Т. 12, спец. вып. № 3. – С. 5–20.
8. Бычков, И.В. Современные информационные технологии в IT-проектах органов государственной власти и местного самоуправления / И.В. Бычков, Г.М. Ружников, А.Е. Хмельнов // Открытое образование. – 2008. – Т. 4 (69). – С. 39–47.

Горнов А.Ю., Зароднюк Т.С. УДК 517.977.58

МЕТОД «КРИВОЛИНЕЙНОГО» ПОИСКА ГЛОБАЛЬНОГО ЭКСТРЕМУМА В ЗАДАЧЕ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ*

Введение. Для задач конечномерной оптимизации известно множество подходов к поиску глобального экстремума, построены достаточно эффективные алгоритмы, имеется большое количество публикаций, в которых представлены прецеденты успешно решенных задач (см., напр., [1–2, 11]). После дискретизации непрерывной задачи оптимального управления (ЗОУ) получается конечномерная экстремальная задача и, формально рассуждая, можно считать, что работоспособные алгоритмы поиска глобального экстремума функционалов также существуют. Однако размерности успешно решаемых невыпуклых конечномерных задач, как правило, невелики и, по утверждениям специалистов, редко превышают число 20 оптимизируемых переменных, причем сложность задачи глобального поиска резко увеличивается с ростом размерности (эффект «проклятия размерности»). Для построения адекватных аппроксимаций ЗОУ обычно требуется не менее 100 узлов дискретизации (конечномерных переменных), что не позво-

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, проект № 09-07-00267; РГНФ, проект № 09-02-00650; интеграционного проекта СО РАН – УрО РАН № 85; междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН № 4.

ляет на практике использовать достижения теории математического программирования при решении таких задач. Выходом из сложившейся ситуации является идея построения специализированных алгоритмов оптимизации, глубоко учитывающих специфику ЗОУ как экстремальной задачи.

В большом обзоре зарубежных публикаций по глобальной оптимизации (см. [3]), несмотря на присутствие раздела по динамическим моделям («4. differential-algebraic models»), не удалось найти ссылок на серьезные работы по исследованию невыпуклых задач оптимального управления, в основном отражены работы по параметрической идентификации систем («parameter estimation»); возможно, исключением являются статьи [4–6], опубликованные в труднодоступных источниках. Известно довольно много публикаций, посвященных построению алгоритмов поиска глобального экстремума функционалов, основанных на генетических методах, привлекаемых, очевидно, как «последнее средство» (см. работы H. Seywald, R.R. Kumar, Y.Yamashita, M. Shima, M.H. Lee, Ch. Han, K.S. Chang, Z. Michalewicz, C.Z. Janikov, J.B. Krawczyk, S. Smith, R. Stonier, N.V. Dakev, A.J. Chipperfield, J.F. Whidborne, P.J. Fleming, H. Muhlenbein, D. Schlierkamp-Voosen, B. de Andres-Toro, J.M. Giron-Sierra, J.A. Lopez-Orozco, J. Bobbin, X. Yao, Y.C. Sim, S.B. Leng, V. Subramaniam, H. Pohlheim, A. Heibner, Q.T. Pham, M.M.A. Hashem, K. Watanabe, K. Izumi, F.S. Wang, J.P. Chiou). Самой последовательной в этом направлении представляется диссертация I.L. Lopez Cruz [10], в которой даже приведены решения трех нелинейных тестовых задач. Однако сам факт наличия у вышеперечисленных авторов не более одной-двух публикаций по рассматриваемой тематике красноречиво говорит о малой эффективности данного подхода.

Среди немногочисленных российских работ, посвященных невыпуклым ЗОУ, следует отметить, прежде всего, фундаментальную монографию В.Ф. Кротова [7]. Большой объем новых результатов получен в группе А.С. Стрекаловского, разработавшего методики исследования задач оптимального управления некоторых частных классов, основанные на DC-разложениях [8–9]. Однако для общей ЗОУ в нелинейной постановке, столь важной в практических приложениях, пока результатов регулярных вычислительных экспериментов не публиковалось. Можно утверждать, что работа по исследованию невыпуклых нелинейных задач оптимального управления пока только начинается.

Вычислительные затраты, необходимые исследования невыпуклых задач оптимизации можно (довольно условно) разделить на две составляющие, соответствующие двум этапам решения: собственно поиск глобального экстремума и доказательство того факта, что полученное решение является глобальным. Практика решения конечномерных задач показывает [1–2, 11], что экстремальное решение можно найти относительно быстро и основное время работы алгоритмов, за редким исключением, тратится на втором этапе. Кроме того, при детальном рассмотрении оказывается, что в любой программной реализации алгоритмов неявно закладываются гипотезы, не позволяющие гарантировать получение глобального экстремума, речь может идти только о повышении вероятности его нахождения. Представляется, что в настоящее время гарантировать получение глобальных решений в ЗОУ не удастся даже при наличии надежного теоретического фундамента, поэтому целесообразно применение других методических подходов к исследованию невыпуклых задач. Авторы предлагают использование «логики предъявления»: задача (временно) считается успешно решенной, если алгоритм способен найти локальный экстремум с достаточно «хорошим» значением целевого функционала. Далее полученный результат публикуется и считается правдоподобным решением задачи до «момента опровержения» – предъявления кем-либо лучшего решения. Отметим, что подобный подход давно используется в конечномерной оптимизации при создании коллекций тестовых задач – принцип «наилучшего из известных» («best of known», см., напр., [12]). Доказательство факта достижения локального экстремума может базироваться, как и в выпуклой оптимизации, на необходимых условиях оптимальности, для задач оптимального управления традиционно это выполнение одного из вариантов принципа максимума Понтрягина.

Важнейшей специфической особенностью ЗОУ как экстремальной задачи является наличие специальной терминологии и значительного числа глубоких теоретических результатов, составляющих важнейшие разделы теории оптимального управления. Одной из красивейших идей в этой области можно считать идею редукции задачи оптимального управления к конечномерной задаче небольшой размерности в терминальном фазовом пространстве, определяемой как минимум функции на множестве достижимости управляемой системы (см., напр., [13–14]). К сожалению, задача аппроксимации множества достижимости при численном решении не намного проще задачи поиска глобального экстремума. Тем не менее, известные из теоретических исследований свойства

множества достижимости (см., напр., [15–17]) могут быть использованы для построения специализированных алгоритмов оптимизации в ЗОУ. В частности, свойство связности позволяет построить механизмы непрерывного варьирования управления, приводящие к непрерывной фазовой траектории на множестве достижимости. Отметим, что идея использования свойства связности при конструировании численных алгоритмов оптимизации принадлежит А.Г. Ченцову [18].

В большинстве известных подходов к построению методов невыпуклой оптимизации решение задачи разделяется на две стадии: «глобальную», на которой выполняется широкое сканирование вариабельного пространства, и «локальную», направленную на локальное уточнение полученного решения (см., напр., [2]). Сочетание различных методов на каждой стадии, а также порядок чередования стадий и определяет конкретный вычислительный алгоритм. Представляется интересной идея совмещения обеих стадий в одной алгоритмической конструкции и построения метода, позволяющего на каждой итерации как выполнять процедуру «глобального сканирования», так и получать локальное улучшение известного решения в случае, когда сканирование не принесло успеха.

В теории глобальной оптимизации принято условно разделять методы на «эвристические» и «математические, рациональные» (см., напр., [11, с. 18]). Под рациональными методами обычно понимаются методы, основанные на конкретной модели целевой функции и, следовательно, сопровождаемые какой-либо математической теорией, под эвристическими – все остальные. Характерным является кардинальное изменение отношения специалистов к эвристическим методам, произошедшее в течение последних десятилетий, отраженное в авторитетнейших источниках [11] и [2], вышедших в свет в 1991 и 2008 гг., соответственно. Если в монографии [11] эвристические методы подвергались серьезной критике и почти приравнивались к «научному шаманству», то в последней книге тех же авторов уже высказывается совершенно другое отношение к эвристическим методам: «некогда презренные, а ныне весьма респектабельные» («heuristic methods: once scorned, now highly respectable») [2, с. 21]. Представляется, что это изменение «общественного мнения» связано как с накоплением опыта практического применения методов глобальной оптимизации, так и с появлением строгих математических доказательств невозможности существования гарантированных методов поиска глобального экстремума любых непрерывных функций за разумное число операций (см., напр., [2, 19]). «Окончательным судьей» в данной многолетней дискуссии, очевидно, является практика применения методов, а не наличие красивых математических теорий.

В работе рассматривается эвристический алгоритм решения невыпуклой задачи оптимального управления с параллелепипедными ограничениями, в котором реализован метод сканирования множества достижимости с одновременным улучшением управления.

Постановка задачи. Предлагаемый подход позволяет решать задачи оптимального управления в следующей эталонной постановке: $\dot{x} = f(x,u,t),\ x(t_0) = x^0$, где $t \in T = [t_0, t_1]$. Вектор-функция $f(x,u,t)$ предполагается непрерывно дифференцируемой по всем аргументам. ЗОУ состоит в поиске допустимого кусочно-непрерывного управления $u^*(t)$ из множества $U = \{u(t) \in R^r : u_l \le u(t) \le u_g\}$, доставляющего минимум терминальному функционалу $I(u) = \varphi(x(t_1))$, где $\varphi(x)$ также предполагается непрерывно дифференцируемой.

Метод «криволинейного» поиска. Реализованный метод представляет собой простейшую схему последовательных вариаций в пространстве управлений, использующую квадратичный способ комбинирования рекордного и вспомогательных управлений с проецированием на множество допустимых. В терминальное фазовое пространство вариации управления проецируются в виде кривых линий, покрывающих множество достижимости, что послужило причиной появления предложенного нами названия метода (метод «криволинейного поиска»). Для построения одномерного пространства поиска на каждой итерации используется два квазислучайных вспомогательных управления релейного типа. При решении вспомогательной задачи поиска глобального экстремума одномерной функции применяется новая модификация «метода парабол» (см. [23]), позволяющая учесть уже имеющуюся информацию и произвести пробы в локальной окрестности рекордного управления. После выполнения заданного числа итераций рассматриваемого метода проверка точности достижения локального экстремума выполняется стандартным алгоритмом, в качестве которого использована эталонная комбинация метода сопряженных градиентов и метода приведенного градиента. Вычислительные свойства предложенного алгоритма исследованы на небольшой коллекции тестовых задач, решения которых, а также

аппроксимации множеств достижимости получены авторами в предыдущих работах (см. [20–25]). В заключительном разделе работы полученные в тестовых задачах решения предъявляются заинтересованным специалистам для опровержения.

Алгоритм 1.

1. Выбирается $u^0(t) \in U$, $t \in T = [t_0, t_1]$.

2. Задаются алгоритмические параметры:

N_C – число итераций метода «криволинейного» поиска; N_P – стартовое число проб одномерного поиска.

3. Вычисляется стартовое рекордное значение функционала $I_{rec} = I(u^0)$, задается $u_{rec}(t) = u^0(t)$.

На k-й итерации ($k \geq 0$):

4. Генерируется псевдослучайное вспомогательное управление $\bar{u}^1(t) \in U$, $t \in T = [t_0, t_1]$.

5. Если $I(\bar{u}^1) < I_{rec}$, то $I_{rec} = I(\bar{u}^1)$ и $u_{rec}(t) = \bar{u}^1(t)$. Переход на шаг 12.

6. Генерируется псевдослучайное вспомогательное управление $\bar{u}^2(t) \in U$, $t \in T = [t_0, t_1]$.

7. Если $I(\bar{u}^2) < I_{rec}$, то $I_{rec} = I(\bar{u}^2)$ и $u_{rec}(t) = \bar{u}^2(t)$. Переход на шаг 12.

8. Формируется управление

$$u^k(\alpha, t) = \alpha^2 \left(\frac{\bar{u}^1(t) + \bar{u}^2(t)}{2} - u_{rec}(t) \right) + \alpha \frac{\bar{u}^2(t) - \bar{u}^1(t)}{2} + u_{rec}(t).$$

9. $u^k(\alpha, t)$ проецируется на допустимую область при $t \in T = [t_0, t_1]$:

если $u^k(\alpha, t) < u_l$, полагается $u^k(\alpha, t) = u_l$,

если $u^k(\alpha, t) > u_g$, полагается $u^k(\alpha, t) = u_g$.

10. Решается задача $\min\limits_{\alpha \in [-1,1]} I(u^k(\alpha))$.

11. Если $I(u^k(\alpha^*)) < I_{rec}$, то $I_{rec} = I(u^k(\alpha^*))$ и $u_{rec}(t) = u^k(\alpha^*, t)$.

12. Запоминаем I_{rec} и $u_{rec}(t)$.

Итерация завершена.

Тестирование предлагаемого алгоритма. Для проведения вычислительных экспериментов использовались следующие значения алгоритмических параметров: $N_C = 1000$, $N_P = 100$, что позволило найти более точные решения, но привело к увеличению процессорного времени, затрачиваемого на его получение (так, например, в ЗОУ динамикой развития вируса иммунодефицита решение, совпадающее с рекордным с точностью до 3-х знаков, удалось получить уже при $N_C = 50$, $N_P = 30$ за 2307 задач Коши). Современные мощности персональных компьютеров позволяют решать тысячи задач Коши за 1 секунду. В данной работе не ставилась задача получения решения за как можно меньшее процессорное время. Поэтому значения алгоритмических параметров выбраны одинаковыми для всех представленных вычислительных экспериментов. Расчеты проводились на персональном компьютере с процессором Intel Core2 Quad 2.33 ГГц и объемом оперативной памяти 8 Гб.

Задача управления осциллятором Даффинга [26]. Управляемый осциллятор Даффинга описывается нелинейным дифференциальным уравнением $\ddot{x} + \omega^2 x + \varepsilon x^3 = u$, которое эквивалентно следующей системе: $\dot{x}_1 = x_2$, $\dot{x}_2 = -\omega^2 x_1 - \varepsilon x_1^3 + u$. Данный динамический процесс рассматривается на интервале $T = [t_0, t_1] = [0, 1]$, управление удовлетворяет следующим ограничениям: $u \in [-10, 10]$. Необходимо минимизировать функционал

$$I(u) = \frac{1}{2} \int_0^1 u^2 dt \to \min$$

с учетом ограничений на траекторию в начальный и конечный моменты времени: $x_1(t_0) = 1.5$, $x_2(t_0) = -1.5$ и $x_1(t_1) = x_2(t_1) = 0$. Учет краевых условий выполняется стандартным методом штрафов путем добавления к терминальному функционалу взвешенных квадратов отклонений траектории от требуемых значений в конечный момент времени. Оптимальное управление и соответствующие ему траектории приведены на рис. 1.

Для получения рекордного значения функционала, равного 2.648442, потребовалось решение 109219 задач Коши за общее процессорное время 27 сек. При этом улучшение функционала выполнялось на каждой итерации метода.

Процесс «покрытия» кривыми множества достижимости при решении задачи отражен на рис. 2. Иллюстрация на рис. 2, а получена при следующих значениях алгоритмически параметров: $N_C = 300$, $N_P = 30$, на рис. 2, б – при $N_C = 1000$, $N_P = 100$.

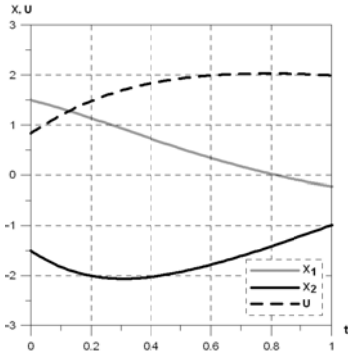


Рис. 1. Оптимальные траектории и управление в задаче 1

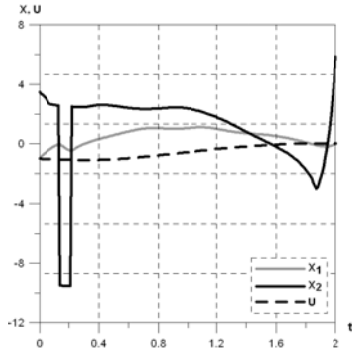


Рис. 3. Оптимальные траектории и управление в задаче 2

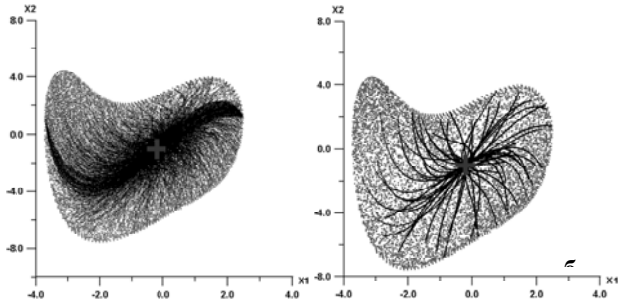


Рис. 2. Иллюстрация работы метода «криволинейного» поиска на примере множества достижимости задачи 1

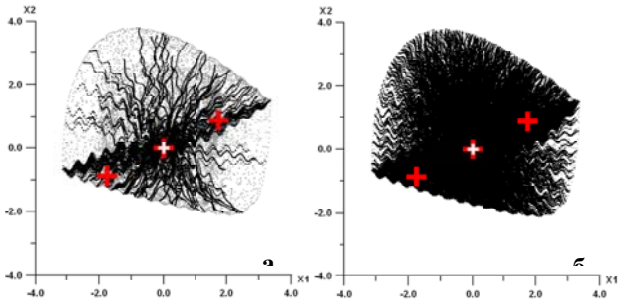


Рис. 4. Иллюстрация работы метода «криволинейного» поиска на примере множества достижимости задачи 2

Тестовая задача 2. Рассмотрим тестовую задачу, динамический процесс в которой описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений

$$\dot{x}_1 = x_2,\ \dot{x}_2 = -2x_1 - 3x_2 - \frac{2}{\pi}\arctan(5x_2) + u - \sin(15x_1),$$

определенной на интервале $T = [t_0, t_1] = [0, 2]$, необходимо найти минимум функционала

$$I(u) = 2x_1^2 - 1.05x_1^4 + x_1^6/6 - x_1x_2 + x_2^2 + 1 \to \min$$

при следующих ограничениях на управляющее воздействие: $u \in [-10, 10]$ и фиксированным значением траектории в начальный момент времени $x_1(t_0) = x_2(t_0) = -1$.

Результаты численного решения приведены на рис. 3.

Оптимальное значение функционала 1.000000 достигнуто за 64 сек в результате решения 110175 задач Коши, при этом улучшение критерия качества выполнялось на 55 итерациях из 1000, это связано с тем, что глобальное значение функционала находится достаточно быстро. Изображение на рис. 4, а получено при $N_C = 100$, $N_P = 50$, на рис. 4, б – при $N_C = 1000$, $N_P = 100$ (рис. 4).

Тестовая задача 3 [21].

$$\dot{x}_1 = \sin x_2,\quad \dot{x}_2 = u - e^{x_1},$$

$$x(t_0) = (1,1),\quad |u| \le 1,\quad t \in T = [0, 5],$$

$$I(u) = x_1(t_1) + x_2(t_1) \to \min.$$

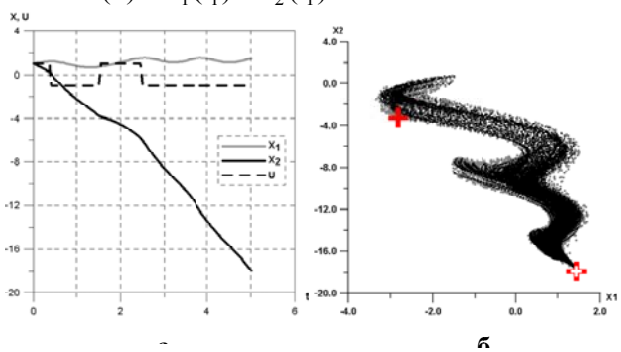


Рис. 5. Оптимальные траектории и управление (а); множество достижимости и экстремальные точки (б) в задаче 3

С помощью предлагаемого подхода найдено оптимальное значение функционала -16.43078 за 60 сек и 119269 задач Коши. На рис.5 изображены оптимальное управление и соответствующие ему траектории, а также множество достижимости с выделенными точками, в которых достигаются минимальные значения целевого функционала (глобальный экстремум дополнительно выделен белой областью в центре).

Тестовая задача 4 [27].

$\dot{x}_1 = (x_1 + x_2)u, \dot{x}_2 = \sin(x_1 + x_2 + u)$,

$x(t_0) = (-9.0,1)$, $-1 \le u(t) \le 1, t \in T = [0,1]$,

$I(u) = -x_1(t_1) \to \min$.

Глобальный минимум равен 0.055868 и достигается в точке (-0.055868, 1.848724), локальный – 0.6282969 при $x_1 = -0.628297$, $x_2 = 0.062108$ (рис. 6). Оптимальное значение функционала получено рассматриваемым методом за 23 сек, при этом на 607 итерациях из 1000 произошло последовательное улучшение значения функционала. Общее число решенных задач Коши равно 96708.

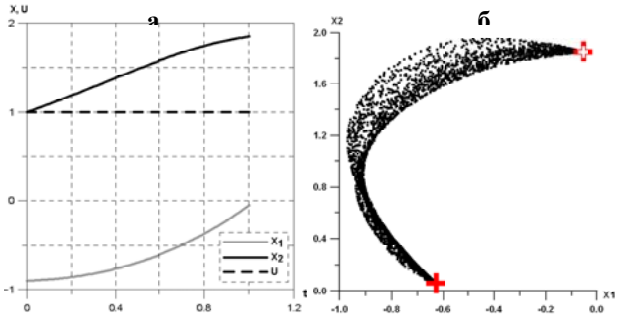


Рис. 6. Оптимальные траектории и управление (а); множество достижимости и экстремальные значения целевого функционала (б) в задаче 4

ЗОУ ядерным ректором (Stirred Tank Reactor, [28, 29]). Эта задача включена в коллекцию тестовых задач, опубликованную в Справочнике тестовых задач локальной и глобальной оптимизации (Handbook of The Test Problems in Local and Global Optimization).

Процесс протекания необратимой химической реакции в ядерном реакторе описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений

$$\dot{x}_1 = -(2+u)(x_1 + 0.25) + (x_2 + 0.5)\exp\left(\frac{25x_1}{x_1 + 2}\right),$$

$$\dot{x}_2 = 0.5 - x_2 - (x_2 + 0.5)\exp\left(\frac{25x_1}{x_1 + 2}\right).$$

ЗОУ заключается в определении управляющего воздействия $u^*(t)$, которое минимизирует интегральный целевой функционал $I(u) = \int_0^{0.78} (x_1^2 + x_2^2 + 0.1u^2)dt \to \min$. Начальные условия заданы: $x_1(0) = x_2(0) = 0.09$. Управляющая функция может принимать значения из интервала $0 \le u(t) \le 5.0$.

Оптимальное значение функционала 0.137102 получено за 99 сек (в первоисточнике рекордное значение равно 0.14433), общее число задач Коши, решенное в процессе численного поиска оптимального значения критерия качества, равно 111901. При этом в 998 итерациях из 1000 получено последовательное улучшение функционала. Оптимальное управление и соответствующие ему траектории сопоставимы с известными из первоисточника (рис. 7).

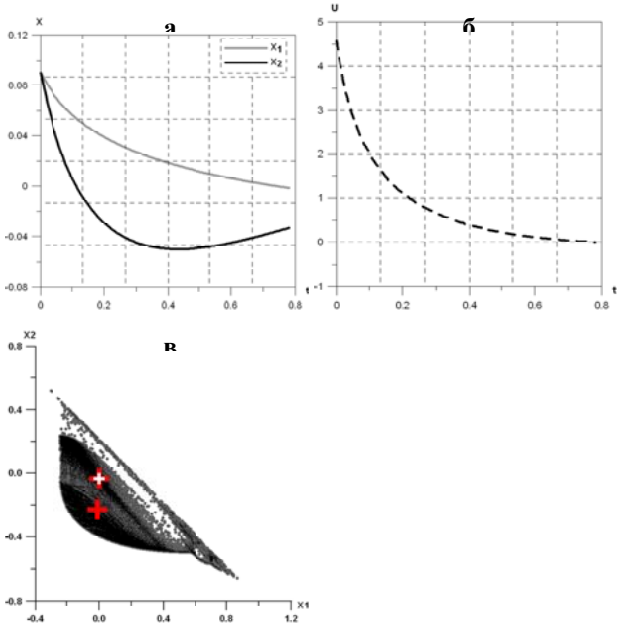


Рис. 7. Оптимальные траектории (а), управление (б) и множество достижимости (в) в ЗОУ ядерным реактором

ЗОУ динамикой развития вируса иммунодефицита (Control of theHIV-1 dynamics, [30]).

Данная модель описывает динамику развития вируса иммунодефицита человека при использовании лекарственного лечения. Входящие в нее дифференциальные уравнения отражают изменение численности неинфицированных клеток C, инфицированных клеток I и развитие вируса V за промежуток времени $T = [t_0, t_1] = [0,1]$:

$$\dot{C} = s + pC\left(1 - \frac{C}{C_{\max}}\right) - d_C C - (1-u)kVC,$$

$$\dot{I} = (1-u)kVC - d_I I,$$

$$\dot{V} = Nd_I I - d_V V.$$

Управляющее воздействие u является мерой эффективности воздействия лекарственных препаратов: если $u = 1$ – осуществляется максимальное препятствие росту численности инфицированных клеток, тогда как при $u = 0$ – сдерживающего воздействия не осуществляется (таким образом, $0 \le u \le 1$). Значения фазовых координат в начальный момент времени t_0 равны 9, 0.8 и 0.2, соот-

ветственно. Минимизируемый функционал зависит от изменения численности I и V, при этом учитывается факт того, что введение большого числа лекарственных препаратов может оказывать негативное воздействие на пациентов:

$$\int_{t_0}^{t_1} M(I^2 + V^2) + u\, dt \to \min .$$

На рис. 8 и 9 отражено оптимальное управление и соответствующее ему развитие C, I и V для следующих значений параметров модели: $s = 0.2$, $p = 0.05$, $C_{\max} = 25$, $k = 0.08$, $d_C = 0.01$, $d_I = 0.3$, $d_V = 0.009$, $N = 0.005$, $M = 8$.

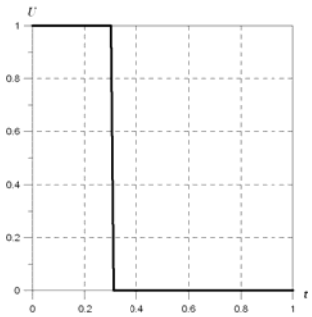


Рис. 8. Оптимальное управление в ЗОУ динамикой развития вируса иммунодефицита

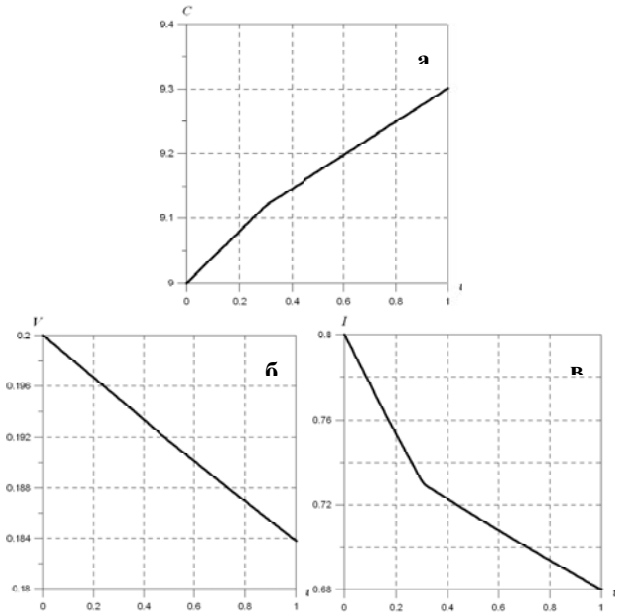


Рис. 9. Динамика изменения численности неинфицированных клеток *C* (а), инфицированных клеток *I* (б) и вируса *V* (в)

Из рис. 9 видно, что численность вирусов монотонно убывает благодаря эффективному использованию лекарственного лечения. В результате расчетов рекомендуется использовать медикаменты в максимально допустимых дозах в первый период и затем совсем прекратить лекарственные инъекции. Во втором периоде рост числа инфицированных клеток и вирусов естественно снижается посредством неконтролируемой динамики. Множество достижимости в рассматриваемой задаче представлено на рис. 10. Решение задачи получено за 37 сек, рекордное значение функционала равно 4.787449, число задач Коши – 115336.

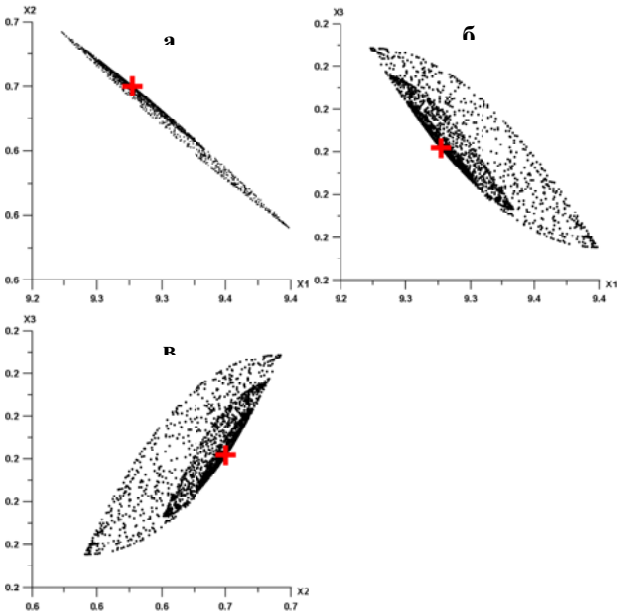


Рис. 10. Множество достижимости в ЗОУ динамикой развития вируса иммунодефицита

Заключение. Во всех рассмотренных задачах предложенный алгоритм позволил найти наилучшее из известных решений за приемлемое расчетное время.

Сравнение результатов расчетов с известными множествами достижимости системы, полученными с применением других вычислительных методов (обсуждение которых выходит за рамки настоящей статьи, см., напр., [31–32]), позволяет сделать вывод о достаточно плотном покрытии множества достижимости фазовыми траекториями, т.е. об адекватности сканирующих возможностей метода в рассматриваемых тестовых задачах. Основным ресурсом дальнейшего повышения качества предложенной алгоритмической схемы авторы считают использование более широкого спектра методов генерации вспомогательных управлений (квазислучайные «сплайн-управления», случайные управления, полученные на основе принципа максимума и т.д., см. [20, 23]).

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Евтушенко, Ю.Г. Параллельные методы решения задач глобальной оптимизации / Ю.Г. Евтушенко, М.А. Половинкин // Тр. IV Междунар. конф. «Параллельные вычисления и задачи управления». – М., 2008. – С. 18–39.
2. Zhigliavsky, A. Stochastic global optimization / A. Zhigliavsky, A. Zilinskas. – Springer Science-Business Media, 2008. – 262 p.
3. Floudas, C.A. A review of recent advanced in global optimization / C.A. Floudas, C.E. Gounaris // J. Global Optimization. – 2008. – (In appear).
4. Chachuat, B. Global methods for dynamic optimization and mixed-integer dynamic optimization / B. Chachuat, A.B. Singer, P.I. Barton // Ind. Eng. Chem. Res. – 2006. – № 45 (25). – P. 8373–8392.
5. Barton, P.I. Optimization of hybrid systems / P.I. Barton, C.K. Lee, M. Yunt // Comput. Chem. Eng. – 2006. – № 30 (10–12). – P. 1576–1589.
6. Lin, Y.D. Deterministic global optimization of nonlinear dynamic systems / Y.D. Lin, M.A. Stadtherr // AIChE J. – 2006. – № 53 (4). – P. 866–875.
7. Krotov, V.F. Global methods in optimal control theory / V.F. Krotov. – N.Y.: Marcel Dekker Inc., 1996. – 384 p.
8. Стрекаловский, А.С. О невыпуклой задаче оптимального управления / А.С. Стрекаловский, Е.В. Шаранхаева // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2005. – Т. 45, № 10. – С. 1785–1800.
9. Стрекаловский, А.С. Задачи оптимального управления с терминальными функционалами, представимыми в виде разности двух выпуклых функций / А.С. Стрекаловский // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2007. – Т. 47, № 11. – С. 1865–1879.
10. Lopez Cruz, I.L. Efficient Evolutionary Algorithms for Optimal Control: PhD Thesis. – Wageningen (The Netherlands): Wageningen University, 2002. – 122 p.
11. Жиглявский, А.А. Методы поиска глобального экстремума / А.А. Жиглявский, А.Г. Жилинскас. – М.: Наука, 1991. – 248 с.
12. Floudas, C.A. A Collection of Test Problems for Constrained Global Optimization Algorithms / C.A. Floudas, P.M. Pardalos. – Springer-Verlag, 1990. – 180 p.
13. Хрусталев, М.М. Необходимые и достаточные условия оптимальности в форме уравнения Беллмана / М.М. Хрусталев // Докл. АН СССР. – 1978. – Т. 242, № 5. – С. 1023–1026.
14. Хрусталев, М.М. Точное описание множеств достижимости и условия глобальной оптимальности динамических систем / М.М. Хрусталев // АиТ. – 1988. – № 5. – С. 62–70.
15. Толстоногов, А.А. Дифференциальные включения в банаховом пространстве / А.А. Толстоногов. – Новосибирск: Наука, 1986. – 295 с.
16. Толстоногов, А.А. Об уравнении интегральной воронки дифференциального включения / А.А. Толстоногов // Мат. заметки. – 1982. – Т. 32, № 6. – С. 841–852.
17. Толстоногов, А.А. О структуре множества решений дифференциального включения с невыпуклой правой частью / А.А. Толстоногов // УМН. – 1981. – № 4. – С. 226–227.
18. Субботин, А.И. Оптимизация гарантии в задачах управления / А.И. Субботин, А.Г. Ченцов. – М., 1981.
19. Torn, A. Global Optimization / A. Torn, A. Zilinskas. – Springer, 1989.
20. Горнов, А.Ю. Реализация метода случайного мультистарта для задачи оптимального управления / А.Ю. Горнов // Ляпуновские чтения: Тез. докл. – Иркутск, 2003. – С. 31.
21. Горнов, А.Ю. Подход к исследованию невыпуклых задач оптимального управления с параллелепипедными ограничениями / А.Ю. Горнов, А.В. Данеева // Вестник Бурятского ун-та. Сер. Математика и информатика. – Улан-Удэ, 2005. – Вып. 2. – С. 122–130.
22. Данеева, А.В. О некотором опыте численного решения невыпуклых задач оптимального управления / А.В. Данеева, А.Ю. Горнов // Материалы Всерос. конф. с междунар. участием «Математика, ее приложения и математическое образование». – Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2005. – С. 75–78.
23. Ливанцова, Т.С. Подход к поиску глобального экстремума в задаче оптимального управления / Т.С. Ливанцова, А.Ю. Горнов // Тр. X Байкальской всерос. конф. «Информационные и математические технологии в науке, технике и образовании». Ч. I. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2005. – С. 154–160.
24. Горнов, А.Ю. Методики конструирования тестовых задач оптимального управления / А.Ю. Горнов, А.В. Данеева // Вестник Бурят-

ского ун-та. Сер. Математика и информатика. – Улан-Удэ: Изд-во Бурятского ун-та, 2006. – Вып. 3. – С. 136–143.
25. Gornov, A.Yu. Optimal Control Problem: Heuristic Algorithm for Global Minimum / A.Yu. Gornov, T.S. Zarodnuk // Proc. of the Second Intern. Conf. on Optimization and Control. – Ulanbaatar (Mongolia), 2007. – P. 27–28.
26. El-Gindy, T.M. A Chebyshev Approximation for Solving Optimal Control Problems / T.M. El-Gindy, H.M. El-Hawary, M.S. Salim, M. El-Kady // Computers Math. Applic. – 1995. – Vol. 29, № 6. – P. 35–45.
27. Зароднюк, Т.С. Технология поиска глобального экстремума в задаче оптимального управления / Т.С. Зароднюк, А.Ю. Горнов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: ИрГУПС, 2008. – № 3 (19). – С. 70–76.
28. Dadebo, S. Optimal control of time-delay systems by dynamics programming / S. Dadebo, R. Luus // Optimal Control Application & Methods. – 1992. – № 13. – P. 29–41.
29. Meyer, C.A. A Global Optimization with non-analytical constraints / C.A. Meyer, C.A. Floudas, A. Neumaier. – http://en.scientificcommons.org/clifford_a_meyer. – 2002. – 40 p.
30. Carlini, E. An efficient algorithm for Hamilton-Jacobi equations in high dimension / E. Carlini, M. Falcone, R. Ferretti // Comput. Vis. Sci. – 2003. – № 7. – P. 15–29.
31. Gornov, A.Yu. On a Class of Algorithms for Constructing Internal Estimates of Reachable Set / A.Yu. Gornov // Proc. of the Intern. Workshop DIC-98. Sept. 7–11, 1998. – Pereslavl-Zalessky, 1998. – P. 10–12.
32. Горнов, А.Ю. Метод максимизации объема для аппроксимации интегральной воронки нелинейной управляемой динамической системы на плоскости / А.Ю. Горнов // Тез. докл. Междунар. симп. «Обобщенные решения в задачах управления». 27–31 августа 2002 г. – Переславль-Залесский, 2002. – С. 200–204.

Казаков А.Л., Маслов А.М.

УДК 656.212+519.876.2:872.6

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ НЕРАВНОМЕРНОГО ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА НА ПРИМЕРЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ГРУЗОВОЙ СТАНЦИИ

Для железнодорожных станций одним из главных объектов исследования является транспортный поток. От его параметров зависят технико-технологические параметры станций, которые в свою очередь входят в иерархическую структуру транспортно-логистических комплексов. Поэтому прогнозирование транспортного потока является актуальной задачей для совершенствования работы транспортно-логистических комплексов [1].

Одним из методов исследования транспортного потока является статистическое моделирование. При использовании стохастических методов главной задачей является определение законов распределения случайных величин, входящих в модель. Однако для повышения точности и достоверности прогнозных оценок целесообразно использование нескольких подходов прогнозирования с применением альтернативных источников информации [2]. Такой подход особенно актуален, когда функции, построенные по эмпирическим данным, существенно отличаются от известных теоретических законов. В таком случае одним из вариантов будет принятие гипотезы о наиболее подходящем виде закона даже при получении неудовлетворительных значениях критериев согласия. Это допустимо, если последствия постоянной ошибки прогноза, вызванной грубой аппроксимацией не приведут к значимым негативным последствиям в работе модели [1]. Другим вариантом будет введение дополнительных условий и ограничений, которые следуют из физических свойств модели и позволяют принять гипотезу о виде за-

кона аппроксимирующей функции с некоторыми условно оптимальными параметрами [3].

Тем не менее, не всегда есть возможность произвести аппроксимацию эмпирических данных с помощью известных теоретических законов распределения случайной величины.

Рассмотрим распределение моментов прибытия поездов на грузовую станцию общего пользования Свердловского железнодорожного узла, статистические данные (табл. 1) для которой были получены ранее [3]. Данное распределение представляет собой временную характеристику транспортного потока. В течение суток распределение имеет следующий вид (рис. 1).

Таблица 1

Распределение моментов прибытия поездов на станцию в течение суток

Интервал врем. *t* (ч)	Кол. событий, *n*
0-1	46
1-2	67
2-3	79
3-4	54
4-5	58
5-6	65
6-7	5
7-8	27
8-9	58
9-10	36
10-11	43
11-12	44
12-13	30
13-14	46
14-15	46
15-16	58
16-17	71
17-18	47
18-19	9
19-20	24
20-21	58
21-22	75
22-23	37
23-24	30

По табличным данным построим гистограмму. Гистограмма получилась полимодальной, что говорит о неоднородности данных выборки. Для того чтобы определить аппроксимирующую функцию для эмпирических данных, нужно их реструктуризировать. Для этого применим методику, которую предложил Г. Поттгофф (G. Potthoff) [4], согласно которой для получения распределения частот площадь поступления поездов перемещается параллельно оси времени до оси количества поступающих поездов (рис. 1). Тогда по вертикальной оси времени можно считывать время Σh, в течение которого поступление не превышает определенный процент d от общего количества поступающих поездов (рис. 2).

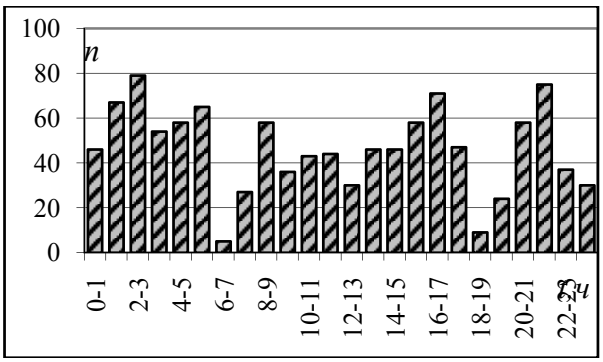


Рис. 1. Гистограмма распределения моментов прибытия поездов на станцию в течение суток

$$h = \sum_{i=0}^{n} h_i = f(d). \qquad (1)$$

Таблица 2

Эмпирические значения суммарного времени *h*, в течение которого частости превышают значения *d*

d, %	0	1	2	3	4	5	6	7	8
h, ч.	24	22	22	18	14	9	4	1	0

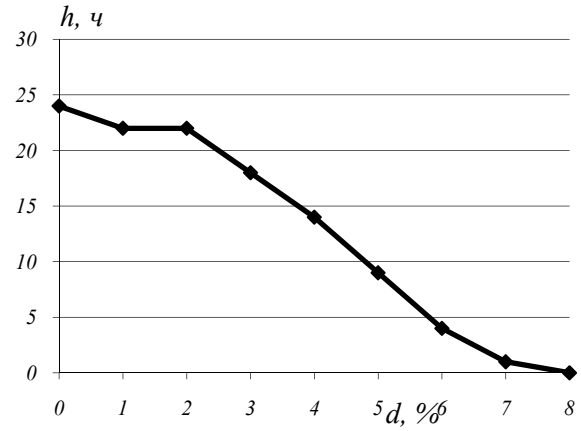


Рис. 2. Эмпирическая функция зависимости суммарной частоты поступления поездов на станцию в течение суток

Далее производится структурная и параметрическая идентификация функции. Для структурной идентификации эмпирическая функция сравнивается с некоторыми теоретическими.

Параметрическая идентификация проводится по методу наименьших квадратов. Результаты вычислений параметров аппроксимирующих

функций и соответствующие им значения среднего квадратичного уклонения сведем в итоговую таблицу.

Из табл. 3 видно, что ни одна из рассмотренных функций не подходит для описания эмпирических данных, так как значения среднего квадратичного уклонения достаточно велики по сравнению со значениями, которые принимает исследуемая величина.

Таблица 3

Аппроксимирующие теоретические функции с условно оптимальными параметрами

Название функции	Функции с установленными оптимальными параметрами	Среднее квадратичное уклонение
Линейная	$y = 26,267 - 3,4d$	1,746
Квадратичная (парабола)	$y = 21,792 - 0,43d^2$	2,555
Экспонента	$y = 23,879 \cdot e^{-0,401 \cdot d}$	7,102
«Показательная квадратичная»	$y = 29,02 \cdot e^{-0,061 d^2}$	3,225

Таким образом, методика, предложенная Г. Поттгоффом, в данном случае не позволяет достичь необходимого результата. Внесем в нее следующие изменения. Определим процент поездов D от общего суточного поступления, прибывающих в каждый час h. Суммируя проценты каждого часа, мы получаем количество часов за сутки, в течение которых не будет превышен процент D (табл. 4). Таким образом, мы получаем следующую зависимость (рис. 3).

Далее проведем сравнительный анализ с некоторыми функциями для подбора аппроксимирующей теоретической функции.

Параметрическая идентификация также производится по методу наименьших квадратов, процедура здесь не приводится.

Линейная функция с оптимальными параметрами (рис. 4) имеет вид

$$y = 20,972 - 0,23D. \qquad (2)$$

Таблица 4

Эмпирическая зависимость времени *h(D)*, в течение которого процент поступивших поездов в сутки не превышает *D*

№ п/п	D, %	h, ч	№ п/п	D, %	h, ч
1	0,000	24	14	38,005	11
2	0,449	23	15	42,228	10
3	1,258	22	16	47,080	9
4	3,414	21	17	52,291	8
5	5,840	20	18	57,502	7
6	8,535	19	19	62,713	6
7	11,231	18	20	67,925	5
8	14,465	17	21	73,765	4
9	17,790	16	22	79,784	3
10	21,653	15	23	86,164	2
11	25,606	14	24	92,902	1
12	29,739	13	25	100	0
13	33,872	12	26	-	-

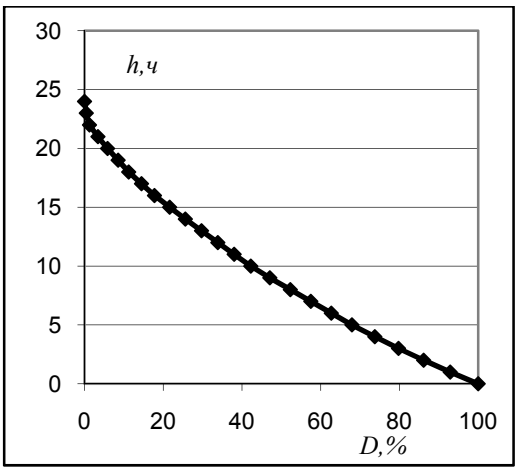


Рис. 3. Эмпирическая функция зависимости времени *h*(*D*), в течение которого процент поступивших поездов в сутки не превышает *D*

Среднее квадратичное уклонение для линейной аппроксимирующей функции с оптимальными параметрами равно 1,216.

С учетом оптимальных параметров квадратичная аппроксимирующая функция (рис. 5) имеет вид

$$y = 22,371 - 0,349 \cdot D + 0,0013 \cdot D^2. \qquad (3)$$

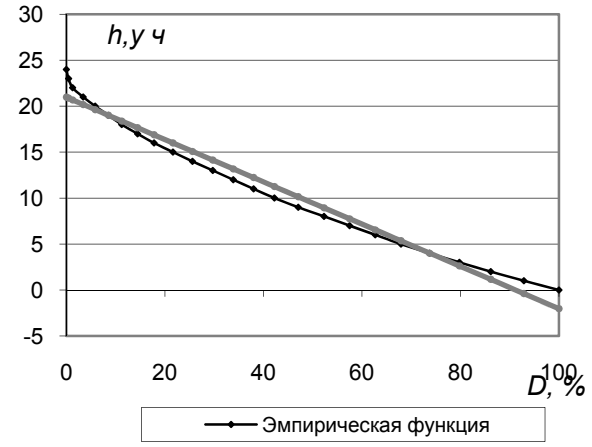


Рис. 4. Эмпирическая функция зависимости процента поступивших поездов в сутки *D* от времени *h* и теоретическая линейная функция *y(D)*

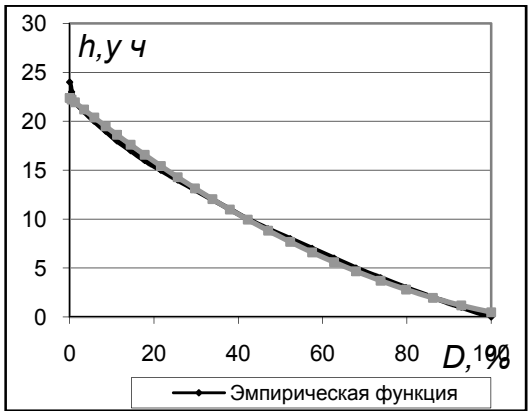


Рис. 5. Эмпирическая функция зависимости процента поступивших поездов в сутки *D* от времени *h* и теоретическая линейная квадратичная функция *y(D)*

Среднее квадратичное уклонение для квадратичной (параболической) функции равно 0,483.

Для экспоненциальной аппроксимирующей функции уравнение с оптимальными параметрами имеет вид

$$y = 26,417 \cdot e^{-0,027D}. \quad (4)$$

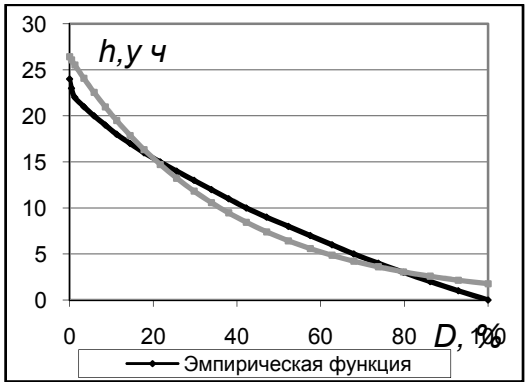


Рис. 6. Эмпирическая функция зависимости процента поступивших поездов в сутки *D* от времени *h* и теоретическая экспоненциальная функция *y(D)*

Среднее квадратичное уклонение для экспоненциальной функции с оптимальными параметрами равно 1,726.

«Показательная квадратичная» (рис. 7) функция с оптимальными параметрами имеет вид

$$y = 19,375e^{0,0003155D^2}.$$

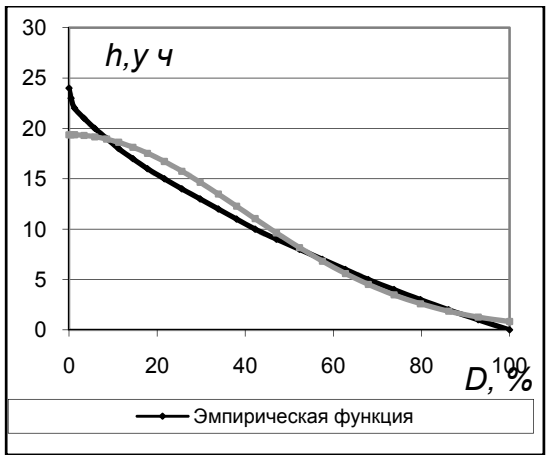


Рис. 7. Эмпирическая функция зависимости процента поступивших поездов в сутки *D* от времени *h* и теоретическая «показательная квадратичная» функция *y(D)*

Среднее квадратичное уклонение для «показательной квадратичной» функции равно 1,639. Анализируя вид графика эмпирической функции, выдвинем гипотезу о том, что аппроксимирующей будет степенная функция, имеющая вид

$$y = 24 - a_0 D^{a_1}. \quad (5)$$

По методу наименьших квадратов определим оптимальные параметры степенной аппроксимирующей функции (рис. 8), которая имеет вид

$$y = 24 - 1,519D^{0,591}. \quad (6)$$

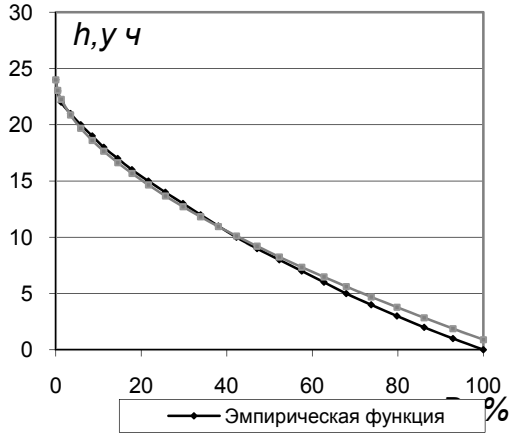


Рис. 8. Эмпирическая функция зависимости процента поступивших поездов в сутки *D* от времени *h* и теоретическая степенная функция *y(D)*

Среднее квадратичное уклонение для степенной функции равно 0,434. Результаты вычислений сведем в итоговую таблицу и на основании выбранного критерия оптимальности, которым в нашем случае является минимум среднего квадратичного уклонения, выберем аппроксимирующую функцию.

Таблица 5

Аппроксимирующие теоретические функции с условно оптимальными параметрами

Название функции	Функции с установленными оптимальными параметрами	Среднее квадратичное уклонение
Линейная	$y = 20,972 - 0,23D$	1,216
Парабола	$y = 22,371 - 0,349 \cdot D + +0,0013 \cdot 10^{-3} \cdot D^2$	0,483
Экспонента	$y = 26,417 \cdot e^{-0,027D}$	1,726
Степенная	$y = 24 - 1,519D^{0,591}$	0,434
Показательная квадратичная	$y = 19,375e^{0,0003155D^2}$	1,639

Как видно из табл. 5, среднее квадратичное уклонение имеет удовлетворительные значения для двух теоретических функций: параболы и степенной. Однако наилучшим образом требованиям удовлетворяет степенная функция (5), так как у нее на один параметр меньше.

Таким образом, предложенная здесь модификация методики Г. Поттгоффа [4], позволяет производить функциональную идентификацию при описании транспортных потоков грузовых железнодорожных станций. Она позволила идентифицировать аппроксимирующую функцию транспортного потока для исследуемой грузовой станции, в то время как оригинальная методика не дала удовлетворительных результатов.

Для улучшения качества прогноза рассмотрим альтернативный подход к построению модели транспортного потока. Для этого используем ряды Фурье. Тогда для аппроксимации эмпирических данных мы можем использовать не теоретическую функцию, а отрезок ряда, который будет служить в модели в качестве закона распределения случайной величины. Таким образом, появляется возможность сравнивать результаты, полученные с помощью разных методов.

В общем виде ряд Фурье записывается следующим образом:

$$S(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \left[A_к \cos(K\text{Щ}t) + B_k \sin(K\text{Щ}t) \right],$$

где A_0, $A_к$ и B_k – коэффициенты Фурье, Щ – основная частота периодической функции,

$$A_0 = \left(\frac{2}{T} \right) \cdot \int_0^T x(t)dt , \qquad (7)$$

$$A_k = \left(\frac{2}{T} \right) \cdot \int_0^T x(t) \cos(K\Omega \cdot t)dt , \qquad (8)$$

$$B_k = \left(\frac{2}{T} \right) \cdot \int_0^T x(t) \sin(K\Omega \cdot t)dt . \qquad (9)$$

Определение коэффициентов Фурье производится с помощью вычисления определенного интеграла по методу Симпсона.

Коэффициенты отрезка ряда Фурье приведены ниже.

Таблица 6

A_0	A_1	B_1	A_2
0,0842	0,0052	0,0001	0,0000
B_2	A_3	B_3	A_4
0,0000	0,0000	0,0001	-0,0115
B_4	A_5	B_5	A_6
-0,0005	-0,0015	0,0000	0,0051
B_6	-		
-0,0014	-		

Таблица 7

Изменение среднего квадратичного уклонения в зависимости от количества членов ряда Фурье

Количество членов ряда	Среднее квадратичное уклонение	Изменение приращения среднего квадратичного уклонения (точность до 0,001)
4	0,016	0
5	0,015	0,001
6	0,011	0,004
7	0,01	0,001
8	0,01	0

Из табл. 7 видно, что, начиная с N =7, дальнейшее увеличение количества членов ряда приводит к незначительному уменьшению среднего квадратичного уклонения. Таким образом, можно описать времени прибытия поезда на станцию t с помощью отрезка ряда Фурье из 7 первых членов.

Рис. 9. Отрезок ряда Фурье с 7-ю членами

К преимуществам метода, основанного на применении рядов Фурье, для создания модели транспортного потока относится то, что с ростом количества членов ряда отклонение его значений от эмпирической функции уменьшается. Т.е. с помощью такого ряда можно аппроксимировать практически любую эмпирическую функцию. Это дает более широкие возможности для глубокого анализа исследуемых процессов. Благодаря применению рядов Фурье появляется возможность структурировать данные о параметрах транспортного потока в том виде, как это требуется для создаваемой математической или имитационной модели.

Таким образом, для создания модели транспортного потока грузовых станций кроме математического аппарата классической теории вероятностей и математической статистики [1, 3, 5] можно использовать рассмотренные в данной статье методы. Методика Г. Поттгоффа может применяться как в том виде, в котором ее приводит автор [4], так и в модифицированном виде, предложенном авторами в данной статье.

Рассмотренные в статье методы могут применяться не только для моделирования транспортного потока, но и для других процессов, описание которых связано с применением временных рядов. Во-первых, они позволяют получать законы распределения случайных величин в тех случаях когда метод, основанный на классическом математическом аппарате теории вероятностей и математической статистики, не дал удовлетворительных результатов. Во-вторых, они могут использоваться как вспомогательные методы для получения дополнительной информации в целях улучшения качества прогноза и создания более точных и адаптивных методик моделирования потоков.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Правдин, Н.В. Прогнозирование грузовых потоков / Н.В. Правдин, М.Л. Дыканюк, В.Я. Негрей. – М.: Транспорт, 1987. – 247 с.
2. Лукинский, В.С. Модели и методы теории логистики: 2-е изд. / Под. ред. Лукинского В.С. – СПб.: Питер, 2007. – 448 с.
3. Маслов, А.М. Определение параметров входящего транспортного потока на грузовой станции общего пользования с помощью стохастических методов / А.М. Маслов, А.Л. Казаков // Екатеринбург: УрГУПС, 2007. – 52 с. – Деп. ВИНИТИ 22.11.2007, №1090-В2007.
4. Поттгофф, Г. Учение о транспортных потоках. Пер. с нем. / Г. Поттгофф. – М.: «Транспорт», 1975. – 344 с.
5. Маслов А.М. Математическая модель входящего вагонопотока для определения уровня загрузки грузовой станции / А.М. Маслов, А.Л. Казаков // Вычислительные технологии. – 2008. – Т. 13, №3(58), Ч. II. – С. 419-425.

Климентова К.Б.

УДК 519.854.2

ПРИЛОЖЕНИЕ ЗАДАЧИ О *P*-МЕДИАНЕ С ПРЕДПОЧТЕНИЯМИ КЛИЕНТОВ ДЛЯ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА КЛЕТОК РАКА

1. Введение. Технологическое развитие последних десятилетий ведет к накоплению большого количества информации в различных областях науки. В связи с этим все более актуальными являются задачи, связанные с обработкой данных, в частности, задачи кластерного анализа [4]. В таких задачах имеется некоторое множество объектов, которое необходимо разбить на заданное число групп схожих объектов, называемых кластерами. Затем в каждой группе выявляется наиболее «типичный» представитель – медиана. Схожесть объектов обычно оценивают расстоянием между векторами, описывающими объект, вычисленным в определенной метрике. Для решения задачи кластерного анализа известно большое количество методов, таких как K-means, linkage [4, 7, 9]. Одним из альтернативных подходов к решению задачи кластеризации является использование методов дискретной оптимизации. Например, задача кластерного анализа может быть сформулирована в виде хорошо известной задачи комбинаторной оптимизации – задачи о p-медиане [5]. В данной задаче рассматривается граф, в котором каждой вершине сопоставлен один из объектов. Расстояние между вершинами (вес дуг) определяется схожестью соответствующих объектов. Таким образом, чтобы разбить исходное множество на определенное количество кластеров (скажем, p), необходимо найти p медианных вершин графа, минимизирующих сумму весов дуг до остальных вершин.

На практике применение такого подхода к решению задачи кластеризации мало распространено, так как его применение связано с серьезными вычислительными трудностями. Используемые задачи дискретной оптимизации оказываются NP-трудными, т.е. сложность решения задачи растет экспоненциально относительно ее размерности. Однако накопленный опыт решения такого сорта задач позволяет успешно работать с примерами достаточно большой размерности [2, 5].

Большое значение играют задачи кластерного анализа данных в генетике. Например, в [12, 13] рассматривалась задача выявления взаимосвязей между образцами экспрессии генов и действия медикаментов в злокачественных клетках. Авторами работы [12] было проведено исследование 60 колоний человеческих клеток ($n = 60$) из 9 различных видов рака ($L = 9$): рак прямой кишки, почек, яичек, молочной железы, простаты, легких, ЦНС, а также лейкемия и меланома. Для каждой клетки измерены образцы экспрессии генов с помощью технологии кДНК микроматриц для 1375 генов, кроме того, оценены 40 молекулярных мишеней. Помимо этого для каждой колонии клеток протестировано 1400 лекарственных препаратов [12], некоторые из которых применяются на практике для борьбы с раком.

Таким образом, исследуемые 60 колоний клеток представлены двумя матрицами. Первая матрица A – $(m_1 \times n)$-матрица действия медикаментов, $m_1 = 1400$; вторая матрица T значений экспрессии генов имеет размерность $(m_2 \times n)$, $m_2 = 1415$. Стоит задача разбить колонии клеток на определенное количество групп сходных друг с другом колоний (кластеры), используя информацию из обеих матриц A и T [12, 13]. В данной задаче кластеризации возникают две матрицы, определяющие расстояние между каждой парой колоний клеток. Как правило, в такой ситуации применяются различные свертки двух матриц.

В данной работе предлагается использовать для решения задачи кластеризации колоний клеток задачу о p-медиане с предпочтениями клиентов [1-3]. Такая задача относится к классу двухуровневых задач целочисленного линейного программирования, поэтому имеющиеся матрицы расстояний могут быть использованы в целевых

функциях верхнего и нижнего уровней данной задачи. Для предложенного подхода был проведен вычислительный эксперимент с использованием различных метрик для вычисления расстояния между клетками и различными значениями параметра p (количество кластеров). Сравнение с расчетами для классической задачи о p-медиане подтвердило эффективность такого подхода для рассмотренной практической задачи кластеризации колоний клеток.

2. Задача о p-медиане с предпочтениями клиентов. Задача о p-медиане с предпочтениями клиентов представляет собой специальный случай классической задачи о p-медиане, где предполагается, что прикрепление немедианных вершин к медианам осуществляется не на основании матрицы схожести объектов, а из некоторых предпочтений. В связи с этим в такой задаче возникает двухуровневая структура, которая создает дополнительные трудности при решении. Прежде чем переходить к постановке задачи, обратимся к вопросу вычисления матрицы схожести. Как уже упоминалось, для измерения схожести объектов, представленных векторами в пространстве $\mathbf{R}^m$, можно использовать различные способы, например, метрики (евклидова, Манхэттен), коэффициент корреляции [12, 13]. В данном случае было выбрано два вида измерений.

В первом способе измерения расстояния между колониями клеток используется коэффициент корреляции Пирсона. Значения экспрессии генов и действия медикаментов для каждой колонии были отцентрованы, поэтому значение коэффициента корреляции для каждой пары векторов равно косинусу угла между ними

$$corr_{ij} = \cos(v^i, v^j) = \frac{\langle v^i, v^j \rangle}{\|v^i\| \, \|v^j\|},$$

где $v^i, v^j \in \mathbf{R}^{m_1}(\mathbf{R}^{m_2})$ – это столбцы матрицы A (T, соответственно), $i, j = 1, \ldots, n$. Тогда расстояние между двумя колониями i и j может быть выражено следующим образом:

$$dist_{ij} = 1 - corr_{ij}. \qquad (1)$$

Второй способ измерения расстояния, который использовался для данной задачи, это евклидова метрика. Отметим, что для этой метрики векторы-столбцы матриц A и T не были отцентрованы. Таким образом, расстояние между двумя колониями клеток в данном случае выражается следующей формулой:

$$dist_{ij} = \|v^i - v^j\|_2 = \sqrt{\sum_{k=1}^{q} (v_k^i - v_k^j)^2}, \qquad (2)$$

где $q = m_1$ или m_2, соответственно, для матриц A и T, $i, j = 1, \ldots, n$.

Обозначим через D и G матрицы расстояний, вычисленные по одному из правил (1) или (2), для матриц A и T, соответственно.

Перейдем к постановке задачи о p-медиане с предпочтениями клиентов. Пусть дан полный, взвешенный ориентированный граф $G(V, A)$, где $V = \{1, \ldots, n\}$ – множество вершин графа, $A = \{ij : i \in V, j \in V, i \neq j\}$ – множество дуг графа. Матрица $C = \{c_{ij}\}, ij \in A,$ определяет веса дуг (расстояние между объектами), матрица $B = \{b_{ij}\}, ij \in A,$ задает предпочтения: если $b_{i_1 j} \le b_{i_2 j}$, то вершина j будет прикреплена к вершине i_1 в случае, если обе вершины i_1 и i_2 являются медианами. Причем в общем случае предполагается, что $c_{ij} \neq b_{ij}$. Кроме того, задан параметр задачи число $p \in \mathrm{Z}_+$, определяющий количество кластеров. Стоит задача выбрать в точности p медианных вершин, минимизируя суммарное расстояние до немедианных вершин и учитывая при этом предпочтения.

Для представления математической модели данной задачи в виде задачи целочисленного линейного программирования (ЦЛП) введем следующие бинарные переменные:

$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{если вершина } i \text{ - медиана,} \\ 0 & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } j \text{ вершина относится к кластеру,} \\ & \text{определяемому медианой } i, \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где $i \in V, ij \in A$. Тогда сформулированная задача может быть записана в виде следующей двухуровневой задачи ЦЛП:

$$\min_y \sum_{ij \in A} c_{ij} x_{ij}(y), \qquad (3)$$

$$\sum_{i \in V} y_i = p, \qquad (4)$$

$$y_i \in \{0,1\}, \qquad i \in V, \qquad (5)$$

где $x(y)$ – решение задачи нижнего уровня:

$$\min_x \sum_{ij \in A} b_{ij} x_{ij}, \qquad (6)$$

$$\sum_{j \in V, i \neq j} x_{ij} + y_i = 1, \ \forall i \in V, \qquad (7)$$

$$x_{ij} \le y_i, \quad i \in V, ij \in A, \tag{8}$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \qquad ij \in A. \tag{9}$$

Целевая функция (3) задачи верхнего уровня минимизирует суммарный вес дуг от медианных вершин к немедианным. Целевая функция (6) задачи нижнего уровня гарантирует, что прикрепление к медианам будет осуществляться согласно предпочтениям. Ограничение (4) на верхнем уровне определяет количество медиан. Ограничение (7) на нижнем уровне гарантирует, что каждая вершина i является либо медианой, либо имеет одну входящую дугу из медианной вершины. Неравенства (8) исключают существование выходящих дуг из немедианных вершин, ограничения (5) и (9) задают условия бинарности переменных.

Сформулированная таким образом задача имеет естественную двухуровневую структуру. На верхнем уровне выбирается множество медианных вершин, минимизируя расстояние до немедианных (3), в то время как на нижнем уровне происходит прикрепление немедианных вершин к выбранным на верхнем уровне медианам, минимизируя функцию предпочтений (6). Допустимая точка в такой задаче представляет собой p «звезд», вершины которых образуют кластеры с медианами посредине (см. рис. 1).

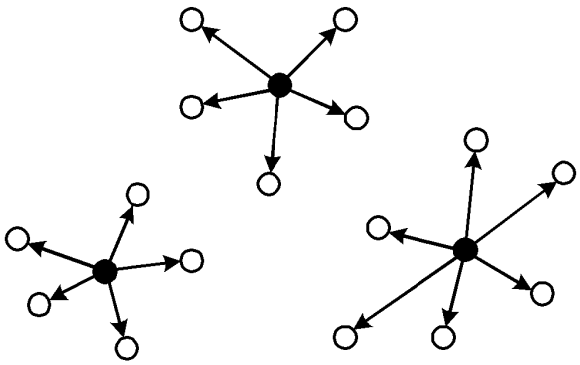


Рис. 1. Допустимая точка в задаче о p -медиане с предпочтениями клиентов

Таким образом, предлагается использовать матрицы расстояний D и G на верхнем и нижнем уровнях представленной задачи о p-медиане с предпочтениями клиентов. Множество вершин $V = \{1,\ldots,n\}$ в этом случае будет представлять собой множество колоний клеток. В результате решения такой задачи будет получено некоторое разбиение колоний клеток на кластеры, учитывающее информацию о действии медикаментов и образцы экспрессии генов.

Известно [1, 3, 8], что для рассмотренной двухуровневой задачи ЦЛП (3)-(9) можно предложить формулировку в виде одноуровневой задачи ЦЛП.

С этой целью введем обозначения $W_{ij} = \{k \in V : b_{ij} < b_{kj}\}, \quad ij \in A$. Тогда рассмотренную двухуровневую задачу (3)-(9) можно записать в виде следующей одноуровневой задачи ЦЛП:

$$\min_{y} \sum_{ij \in A} c_{ij} x_{ij}, \tag{10}$$

$$y_i + \sum_{k \in W_{ij}} x_{kj} \le 1, \; i \in V, ij \in A, \tag{11}$$

$$\sum_{i \in V} y_i = p, \tag{12}$$

$$\sum_{j \in V, i \ne j} x_{ij} + y_i = 1, \; \forall i \in V, \tag{13}$$

$$x_{ij} \le y_i, \quad i \in V, ij \in A, \tag{14}$$

$$y_i, x_{ij} \in \{0,1\}, \qquad i \in V, ij \in A. \tag{15}$$

Для оптимального решения такой задачи ЦЛП все ограничения исходной задачи (3)-(9) будут выполнены, а ограничения (11) гарантируют выполнение предпочтений, т.е. матрица $x \in \{0,1\}^{|A|}$ будет оптимальным решением задачи нижнего уровня при любом выборе $y \in \{0,1\}^{|V|}$. Действительно, если i – медиана (т.е. $y_i = 1$), то вершина j не будет прикреплена к менее предпочтительным вершинам множества W_{ij}. Отметим, что формулировка (10), (12)-(15), т.е. без ограничений (11), представляет собой формулировку классической задачи о p-медиане, в которой не учитывается матрица предпочтений B.

Традиционным методом решения задач ЦЛП является метод ветвей и отсечений [11], в основе которого лежит стратегия «разделяй и властвуй». Допустимая область (т.е. множество допустимых точек) разделяется на непересекающиеся подобласти, и задача решается на каждой из них в отдельности. Кроме того, данный метод предполагает использование неравенств (отсечений), с помощью которых улучшается нижняя оценка оптимального значения задачи. Для многогранника задачи (10)-(15) известен ряд семейств неравенств [2, 6]. Эти неравенства использовались при поиске оптимального решения в задаче (10)-(15) методом ветвей и отсечений.

3. Вычислительный эксперимент. Для решения задач ЦЛП при проведении вычислительного эксперимента использовался коммерческий

решатель Xpress-MP [10], в котором реализован упомянутый выше метод ветвей и отсечений.

Результаты работы для задачи о p-медиане с предпочтениями клиентов сравнивались с расчетами для классической задачи о p-медиане, т.е. без учета второй матрицы (формулировка (10), (12)-(15)).

Для оценки качества получаемых кластеров принято пользоваться различными коэффициентами [13]. Для указанного типа задач обычно подсчитывается средний коэффициент корреляции Пирсона

$$R = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{p}\frac{2}{|K_j|-1}\sum_{\substack{i,k\in K_j\\ i<k}} corr_{ik},$$

где K_j – это j-й кластер. Чем больше значение коэффициента R, тем лучше результаты кластеризации с точки зрения сходства внутри кластера согласно коэффициенту корреляции. Средний коэффициент корреляции R вычислялся двумя способами. В первом случае в качестве матрицы корреляции использовалась матрица, подсчитанная для матрицы A (значений действия медикаментов) $corr^D$, в этом случае мы будем обозначать соответствующий средний коэффициент Пирсона через R^D. Во втором случае использовалась матрица корреляции экспрессии генов $corr^G$, и соответствующий коэффициент будет обозначаться R^G.

Кроме того, вычислялось значение энтропии для полученных кластеров [13]

$$E = -\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{p}\sum_{l=1}^{L} N_{jl}\log\left(\frac{N_{jl}}{|K_j|}\right),$$

где L – это количество органов, из которых были взяты клетки, N_{jl} – это количество клеток из органа l в j-м кластере. Чем больше значение энтропии, тем меньше отвечает структура кластеров распределению по органам, из которых были получены данные колонии клеток.

Проведенные вычислительные эксперименты можно разбить на две группы.

В первом случае в качестве матрицы верхнего уровня C выступает матрица D, а в качестве матрицы нижнего уровня B – матрица G. В классической задаче о p-медиане в данной группе используется только матрица D, а матрица G не учитывается.

Во втором случае наоборот, на верхнем уровне используется G, а на нижнем – D. В классической задаче о p-медиане используется лишь матрица G.

Для каждой группы проводились расчеты с двумя значениями параметра p (количество кластеров), а именно, 9 и 16, а также с использованием двух способов измерения схожести объектов (см. раздел 2).

Таким образом, результаты для первой группы экспериментов представлены в табл. 1, 2, соответственно, для двух различных способов вычисления расстояний между объектами.

В таблицах использовались следующие обозначения. Name – имя задачи, которое конструируется следующим образом: $p-\langle type\rangle-\langle matrix\rangle$, где p – количество кластеров(медиан) ; $\langle type\rangle$ – тип задачи, BL обозначает, что решалась задача о p-медиане с предпочтениями клиентов, и pmed означает, что решалась классическая задача о p-медиане без учета второй матрицы (формулировка (10), (12)-(15)); $\langle matrix\rangle$ – главная матрица (D, если $C=D$, и G, если $C=G$). Time – время поиска оптимального решения. Жирным шрифтом в таблицах выделены лучшие значения коэффициентов.

В табл. 1 расстояние вычислялось с помощью коэффициента корреляции.

Таблица 1

Значения коэффициентов $C=D$ и $B=G$. Расстояние вычислялось с использованием коэффициента корреляции

Name	Time	E	R^D	R^G
9-BL-D	70.81	0.985	0.7379	0.4699
16-BL-D	12.11	**0.6305**	0.7733	**0.4854**
9-pmed-D	0.06	1.1732	**0.7955**	0.3398
16-pmed-D	0.06	0.9577	0.7283	0.3215

Результаты работы для задачи 16-BL-D выглядят лучшими для данной серии расчетов. Несмотря на то, что значение коэффициента R^D в этом случае хуже на 0.02, чем лучшее значение, тем не менее оба коэффициента лучше, чем в литературе [13]. В работе [13] наилучшие из полученных авторами значения коэффициентов не превосходят 0.35.

Результаты вычислений для евклидовой метрики представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения коэффициентов $C = D$ и $B = G$. Евклидова метрика

Name	Time	E	R^D	R^G
9-BL-D	36.5	0.9098	0.6982	0.4553
16-BL-D	12.84	**0.5559**	0.7392	**0.4869**
9-pmed-D	0.06	1.2936	**0.7915**	0.3544
16-pmed-D	0.17	0.9946	0.7139	0.3225

Данные результаты согласуются с результатами для расстояний, вычисленных с помощью коэффициента корреляции. Вновь результаты для задачи 16-BL-D выглядят наиболее удачными. Кроме того, здесь было получено лучшее значение энтропии.

Результаты расчетов для второй группы экспериментов представлены в табл. 3, 4. Как упоминалось, в классической задаче о p-медиане и на верхнем уровне задачи о p-медиане с предпочтениями клиентов использовалась матрица G.

Таблица 3

Значения коэффициентов $C = G$ и $B = D$. Расстояние вычислялось с использованием коэффициента корреляции

Name	Time	E	R^D	R^G
9-BL-G	34.45	1.1482	**0.793**	0.4115
16-BL-G	77.22	0.8553	0.7361	0.4138
9-pmed-G	0.05	0.6984	0.6506	**0.5415**
16-pmed-G	0.06	**0.5558**	0.5559	0.5189

Таблица 4

Значения коэффициентов $C = G$ и $B = D$. Евклидова метрика

Name	Time	E	R^D	R^G
9-BL-G	9.5	1.0786	**0.7943**	0.4114
16-BL-G	14.48	0.8939	0.7308	0.4071
9-pmed-G	0.05	0.8214	0.6502	0.5109
16-pmed-G	0.05	**0.6346**	0.6356	**0.5329**

Как ни странно, результаты для задачи о p-медиане с предпочтениями клиентов (9-BL-G и 16-BL-G) в данных таблицах по коэффициентам R^G оказались хуже, чем в табл. 1, 2, несмотря на то, что матрица G использовалась на верхнем уровне.

По результатам проведенных вычислительных экспериментов можно также заметить, что наилучшие значения коэффициентов R^D и R^G были получены при решении классической задачи о p-медиане с соответствующими матрицами расстояний. Однако, если анализировать оба коэффициента одновременно, то результаты работы для задачи о p-медиане с предпочтениями клиентов выглядят более сбалансированными. Действительно, например, в табл. 1 для задачи 9-pmed-D было получено лучшее значение коэффициента R^D, однако R^G имеет одно из самых худших значений среди всех экспериментов.

Резюмируя вышеизложенное, можно сделать вывод, что задача о p-медиане с предпочтениями клиентов более адекватно отражает специфику данной задачи, благодаря учету информации из обеих матриц и может быть использована для решения такого сорта задач кластеризации.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Алексеева, Е.В. Генетический локальный поиск для задачи о p-медиане с предпочтениями клиентов / Е.В. Алексеева, Ю.А. Кочетов // Дискретный анализ и исследование операций. – 2007. – Т. 14, № 1. – С. 3-31.
2. Васильев, И.Л. Новые нижние оценки для задачи размещения с предпочтениями клиентов / И.Л. Васильев, К.Б. Климентова, Ю.А. Кочетов // Журн. выч. мат. и матем. физики. – 2009. – Т. 49, № 6 (в печати).
3. Горбачевская, Л.Е. Двухуровневая задача стандартизации с условием единственности оптимального потребительского выбора / Л.Е. Горбачевская, В.Т. Дементьев, Ю.В. Шамардин // Дискретный анализ и исследование операций. – 1999. – Т. 6, № 2. – С. 3-11.
4. Мандель, И.Д. Кластерный анализ / И.Д. Мандель. – М: Финансы и статистика, 1988. – 176 с.
5. Avella, P. Computational study of large-scale p-median problems / P. Avella, A. Sassano, I. Vasil'ev // Mathematical Programming. — 2007. – V. 109, № 1. – P. 89-114.
6. Cánovas, L. A strengthened formulation for the simple plant location problem with order / L. Cánovas, S. García, M. Labbé, and A. Marín // Operations Research Letters. – 2007. – V. 35, № 2. – P. 141-150.
7. Eisen, M.B. Cluster analysis and display of genome-wide expression patterns / M.B. Eisen, P.T. Spellman, P.O. Brown, D. Botstein // Proc. of the National Academy of Science of the USA. Genetics. – 1998. – V. 95. – P. 14863-14868.

8. Hanjoul, P. A facility location problem with clients' preference orderings / P. Hanjoul and D. Peeters // Regional Sci. Urban Econom. – 1987. – V. 17. – P. 451-473.
9. MacQueen, J.B. Some methods of classification and analysis of multivariate observations / J.B. MacQueen // Proc. of the fifth Berkeley symposium of mathematical statistics and probability. – Berkley: University of California Press, 1967. – P. 281-297.
10. Xpress-MP. – http://www.dashoptimisation.com
11. Nemhauser, G.N. Integer and Combinatiorial Optimization / G.N. Nemhauser and L.A. Wolsey. – N.Y.: A Wiley-Interscience Publication, 1999. – 766 p.
12. Scherf, U. A gene expression database for the molecular pharmacology of cancer / U. Scherf, D.T. Ross, M. Waltham, L.H. Smith et al // Nature Genetics. – 2000. – V. 24. – P. 236-244.
13. Zhang, B.T. Analysis of gene expression profiles and drug activity patterns by clustering and bayesian network learning. Methods of Microarray Data Analysis II / B.T. Zhang, J.H. Chang, K.B. Hwang. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002. – P. 169-184.

Косов А.А., Овдиенко Е.В. УДК 004.94

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ АНАЛИЗА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГРУЗОПЕРЕВОЗОК НА ВСЖД НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ И ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК

Введение. Данные по грузовым перевозкам на железных дорогах вводятся, корректируются, хранятся и обрабатываются в различных существующих информационных системах, местных или доступных для персонала различных дорог. Каждая такая информационная система предназначена для узконаправленных целей и выполняет определенные задачи. Проанализировав существующие системы, их функции и технологическую схему передачи данных между ними, можно сказать, что функции ввода информации по грузоперевозкам, ее корректировки осуществляются, отлажены и полностью удовлетворяют предъявляемым требованиям в различных системах, но задачи системного анализа данных и особенно прогнозирования не соответствуют современным требованиям, необходимо их дальнейшее развитие. В существующих системах предусмотрены функции вывода информации в табличном виде для статистической отчетности. Задача динамического анализа информации, накопленной более чем за 10 лет, более масштабная, чем вывод и сравнение отчетов, не реализована ни в одной системе, как и задача прогнозирования – получения прогнозов на будущее, которые, в свою очередь, могли бы повлечь за собой некоторые управленческие решения. Для решения задач прогнозирования на основе статистических данных о ходе процесса на предшествующем интервале времени существует множество математических методов и подходов, сравнительный анализ эффективности некоторых из них приведен в [1]. Необходимо отметить, что при применении любого математического метода обработки статистических данных прогнозирование по существу связано с экстраполяцией выявляемых тенденций на будущее, что далеко не всегда позволяет адекватно учесть непосредственно в математической модели имеющиеся у специалистов высокого уровня (экспертов) сведения о возможных и даже вполне ожидаемых изменениях хода протекания процесса. В такого рода ситуациях прогнозирование поведения сложных технических, экономических, экологических, социальных, военных, гуманитарных и других систем может быть успешным и должно осуществляться не только с учетом статистических данных, но и с обязательным привлечением экспертной информации [2]. Такой комплексный подход, основанный на одновременном использовании статистической и экспертной информации, давно и успешно применяется [3] и хорошо себя зарекомендовал при решении разнообразных прикладных задач.

В данной статье приводится описание информационной системы, разрабатываемой на основе названного подхода и предназначенной для анализа и прогнозирования грузоперевозок на ВСЖД. При этом статистические данные накоплены в большом объеме в БД уже существующих информационных систем и их можно использовать, в том числе и для решения задач прогнозирования. Экспертная информация может отражать предстоящие изменения в экономической политике, ввод новых производственных мощностей и т.п., другие факторы, способные существенным образом повлиять на объемы и характер грузоперевозок. Поэтому целесообразна разработка соответствующего инструментария в рамках единой информационной системы.

Краткий анализ существующих информационных систем и схем передачи данных между ними. Данные по грузовым перевозкам на железных дорогах вводятся, фиксируются, хранятся и обрабатываются в различных системах, местных или общих, доступных для всех дорог МПС, например, АСОУП (Автоматизированная система оперативного управления перевозками), ЕК ИОДВ (Единый Комплекс Интегрированной Обработки Дорожной Ведомости по отправлению и прибытию), АКФО (Автоматизация Кассовой-Финансовой Отчетности), Грузовая модель, Грузы и Тарифы, ЭТРАН (Электронная Транспортная Накладная), Грузовой экспресс. Каждая система отвечает за выполнение своих задач, и единственной общей универсальной системы нет. Так в ЭТРАН, например, непосредственно вводится информация по затратам железной дороги на отправление, прибытие, погрузки / выгрузки, а доходы, полученные за эту работу, оплаченные через банк, вносятся в систему R3 ЕК АСУФР (Единая Корпоративная Автоматизированная Система Управления Финансами и Ресурсами МПС России) УДП (Учет Доходных Поступлений). На схеме взаимодействия ИС (рис. 1) показан ввод данных и обмен ими между системами. Данные передаются сообщениями, которым присвоены номера, идентифицирующие суть данных сообщения.

Анализ баз данных. Из рис. 1 видно, что на сервер, имеющий название “DOM”, под управлением СУБД Oracle DOM, в базы данных, которые на нем расположены, в разном виде поступает информация из различных систем и по доходам, и по расходам. Таким образом, информационные системы, использующие его базы данных, имеют возможность наиболее полно отражать состояние по грузоперевозкам, поэтому было решено использовать этот сервер в качестве источника данных для информационной системы. Но ни в одной информационной системе, основанной на данных сервера DOM, не ставилось целью добиться макроанализа данных, чтобы, имея базу данных по перевозкам более чем за 10 лет, можно было реализовать задачу прогнозирования объемов, которая бы была полезна и могла бы помочь в принятии некоторых управленческих решений, таких как, например, увеличение тарифа на перевозку угля, если объемы погрузки-выгрузки для угля большие, а доходы низкие, или увеличение парка определенного типа подвижного состава.

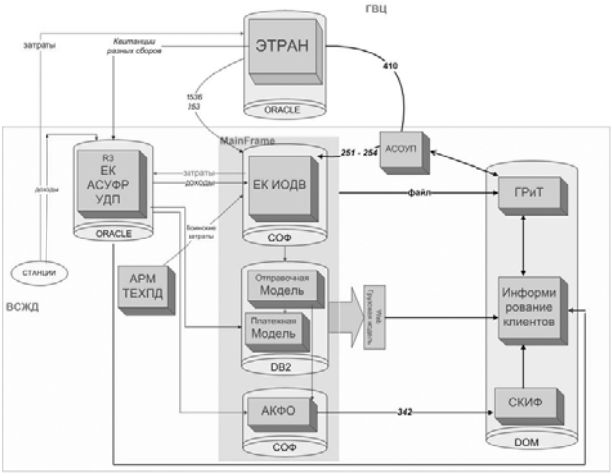


Рис. 1. Схема передачи данных по грузоперевозкам между информационными системами

Структура используемой БД СУБД Oracle на сервере DOM сложна и не приводится в полном объеме. На рис. 2 показан фрагмент структуры базы данных с таблицами, непосредственно необходимыми и задействованными в информационной системе.

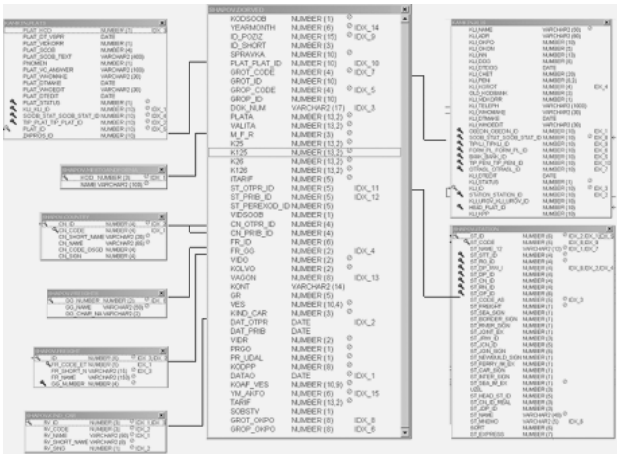


Рис. 2. Фрагмент структуры базы данных

Имя поля	Расшифровка имени	Тип данных	Длинна
KODSOOB	1-251,2-252,3-253,4-254	NUMBER	0
YEARMONTH	ОТЧЕТНЫЙ ГОД И МЕСЯЦ	NUMBER	0
ID_POZIZ	ID ПОЗИЦИОННОЙ ФРАЗЫ	NUMBER	0
ID_SHORT	НОМЕР КОРОТКОЙ ФРАЗЫ	NUMBER	0
SPRAVKA	КОД ПЛАТЕЛЬЩИКА	NUMBER	0
PLAT_PLAT_ID	ID ПЛАТЕЛЬЩИКА	NUMBER	0
GROT_CODE	КОД ГРУЗООТПРАВИТЕЛЯ	NUMBER	0
GROT_ID	ID ГРУЗООТПРАВИТЕЛЯ	NUMBER	0
GROP_CODE	КОД ГРУЗОПОЛУЧАТЕЛЯ	NUMBER	0
GROP_ID	ID КОД ГРУЗОПОЛУЧАТЕЛЯ	NUMBER	0
DOK_NUM	НОМЕР ДОКУМЕНТА	VARCHAR2	17
PLATA	ПРОВОЗНАЯ ПЛАТА - ВСЕГО ВЗЫСКАНО ЗА ДОКУМЕНТ	NUMBER	0
VALITA	ПРОВОЗНАЯ ПЛАТА (В ВАЛЮТЕ)- ВСЕГО ВЗЫСКАНО ЗА ДОК...	NUMBER	0
M_F_R	МЕСТО И ФОРМА РАСЧЕТА	NUMBER	0
K25	СУММА НЕДОБОРА -25 КООРДИНАТА	NUMBER	0
K125	СУММА НЕДОБОРА -125 КООРДИНАТА	NUMBER	0
K26	СУММА ПЕРЕБОРА -26 КООРДИНАТА	NUMBER	0
K126	СУММА ПЕРЕБОРА -126 КООРДИНАТА	NUMBER	0
ITARIF	КОД ИСКЛЮЧИТЕЛЬНОГО ТАРИФА	NUMBER	0
ST_OTPR_ID	ID СТАНЦИИ ОТПРАВЛЕНИЯ	NUMBER	0
ST_PRIB_ID	ID СТАНЦИИ НАЗНАЧЕНИЯ	NUMBER	0
ST_PEREXOD_ID	ID СТАНЦИИ ПЕРЕХОДА	NUMBER	0
VIDSOOB	ВИД СООБЩЕНИЯ -55 КООРДИНАТА	NUMBER	0
CN_OTPR_ID	ID СТРАНЫ ОТПРАВЛЕНИЯ	NUMBER	0
CN_PRIB_ID	ID СТРАНЫ НАЗНАЧЕНИЯ	NUMBER	0
FR_ID	ID ГРУЗА	NUMBER	0
FR_GG	ГРУППА ГРУЗА	NUMBER	0
VIDO	ВИД ОТПРАВКИ	NUMBER	0
KOLVO	КОЛ-ВО ВАГОНО/КОНТЕЙНЕРОВ	NUMBER	0
VAGON	НОМЕР ВАГОНА	NUMBER	0
KONT	НОМЕР КОНТЕЙНЕРА	VARCHAR2	14
GR	ГРУЗОПОДЬЕМНОСТЬ	NUMBER	0
VES	ВЕС ГРУЗА	NUMBER	0
KIND_CAR	ID РОД ПОДВИЖНОГО СОСТАВА	NUMBER	0
DAT_OTPR	ДАТА ОТПРАВЛЕНИЯ	DATE	0
DAT_PRIB	ДАТА ПРИБЫТИЯ	DATE	0
VIDR	ВИД РАБОТЫ	NUMBER	0
PRGO	ПРИЗНАК ВХОЖДЕНИЯ В ГО-10	NUMBER	0
PR_UDAL	ПРИЗНАК УДАЛЕНИЯ 1,-1	NUMBER	0
KODPP	КОД ПУНКТА ПЕРЕДАЧИ - (999- КОРРЕКТИРОВАЛО ТЕХПД	NUMBER	0
DATAO	ДАТА ВВОДА В MF	DATE	0
KOAF_VES	КОЭФИЦИЕНТ ВЕСА- ОТНОШЕНИЕ ВЕСА ДАННОГО ВАГОНА ...	NUMBER	0
YM_AKFO	ОТЧЕТНЫЙ МЕСЯЦ В ЗАДАЧЕ АКФО	NUMBER	0
TARIF	ТАРИФ	NUMBER	0
SOBSTV	ПРИЗНАК СОБСТВЕННОСТИ ВАГОН КОНТЕЙНЕРА	NUMBER	0
GROT_OKPO		NUMBER	0
GROP_OKPO		NUMBER	0

Рис. 3. Структура главной таблицы по грузоперевозкам

Из физической структуры главной таблицы по грузоперевозкам Dorved на рис. 3 видно, что имеется возможность создавать различные запросы для макроанализа грузоперевозок, такие как:

- сравнение объемов грузоперевозок по станциям при выбранном роде груза;
- анализ объемов погрузки и выгрузки по станциям при выбранном роде груза и объемов прибыли;
- анализ объемов грузоперевозок в зависимости от рода подвижного состава по станциям;
- сравнение объемов грузоперевозок прямых и на экспорт по станциям при выбранном роде подвижного состава;
- анализ объемов грузоперевозок прямых и на экспорт и прибыли в зависимости от рода груза.

Выбор инструментов разработки. В качестве среды разработки был выбран объектно-ориентированный язык программирования Delphi, потому что он имеет большие возможности работы с графикой.

Интерфейс системы. Результаты запросов представлены в программе не только в табличном виде, как это было в предыдущих системах, а в основном в графическом виде на карте ВСЖД, что облегчает восприятие информации и способствует макроанализу грузоперевозок по ВСЖД. Окно программы с показанными условиями выбора данных из базы и одновременно с графическим результатом этого запроса представлено на рис. 4.

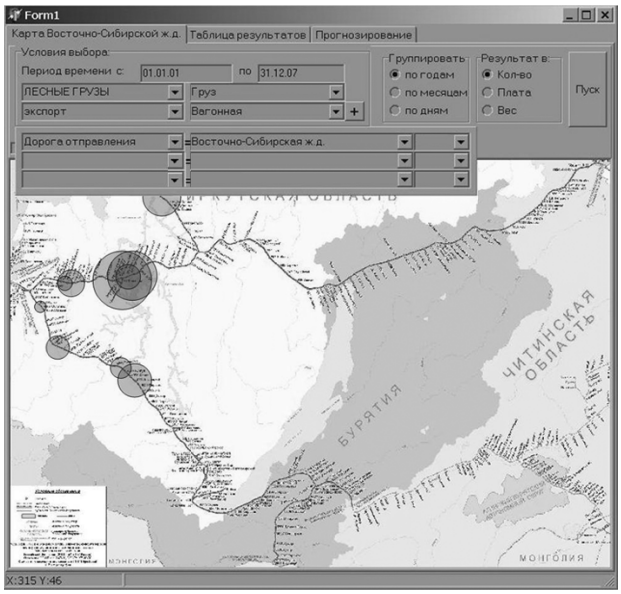


Рис. 4. Внешний вид окна запроса и графического результата

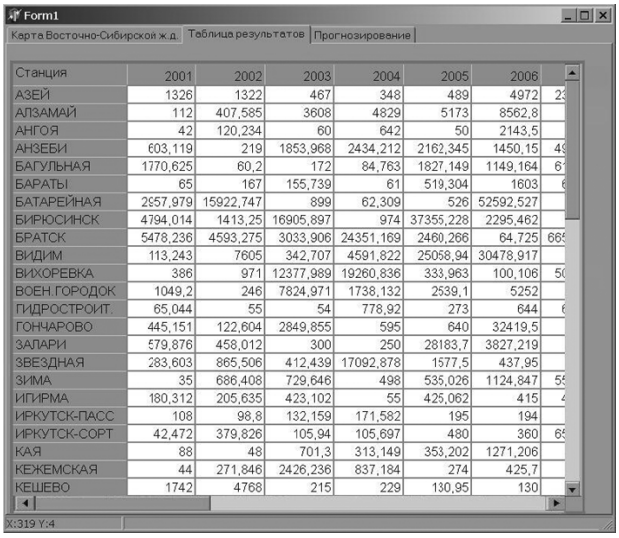
На рис. 4 показан внешний вид окна программы, с указанными параметрами запроса: требуется показать объем погрузки лесных грузов, которые пойдут на экспорт, в динамике по годам с 2001 по 2007 год по Восточно-Сибирской железной дороге. Так, в верхней части окна выбираются условия, а после выполнения запроса обновляются показания на карте и заполняется таблица результатов.

В графическом представлении результатов радиус окружности означает объем грузоперевозок – загрузки по станциям. Для того чтобы не загромождать карту, ведь показатели не равны нулю по очень большому числу станций, на карте окружностями выделяют 10 наиболее активных по данному запросу станций, хотя пользователь имеет возможность указать их иное количество.

Данные, представленные в табличном виде, можно увидеть, перейдя по вкладке “Таблица результатов”, внешний вид окна показан на рис. 5.

Экстраполяция. Применяя экстраполяционный подход, который предполагает, что развитие любой системы происходит достаточно гладко и непрерывно, с сохранением тенденций, к выбранным по запросу данным, описывающим со-

стояние грузоперевозок на протяжении нескольких лет, можно построить прогноз на будущее: как, например, изменится объем грузоперевозок для некоторого рода груза, т.е. прогноз может быть простой проекцией (экстраполяцией) прошлого в будущее. Для составления такого прогноза достаточно оценить прошлые показатели объемов грузоперевозок, а затем перенести эти тенденции в будущее.



Станция	2001	2002	2003	2004	2005	2006	
АЗЕЙ	1326	1322	467	348	489	4972	2
АЛЗАМАЙ	112	407,585	3608	4829	5173	8562,8	
АНГОЯ	42	120,234	60	642	50	2143,5	
АНЗЕБИ	603,119	219	1853,968	2434,212	2162,345	1450,15	4
БАГУЛЬНАЯ	1770,625	60,2	172	84,763	1827,149	1149,164	6
БАРАТЫ	65	167	155,739	61	519,304	1603	6
БАТАРЕЙНАЯ	2657,979	15922,747	899	62,309	526	52592,527	
БИРЮСИНСК	4794,014	1413,25	16905,897	974	37355,228	2295,462	
БРАТСК	5478,236	4593,275	3033,906	24351,169	2460,266	64,725	669
ВИДИМ	113,243	7605	342,707	4591,822	25058,94	30478,917	
ВИХОРЕВКА	386	971	12377,989	19260,836	333,963	100,106	5
ВОЕН.ГОРОДОК	1049,2	246	7824,971	1738,132	2539,1	5252	
ГИДРОСТРОИТ.	65,044	55	54	778,92	273	644	6
ГОНЧАРОВО	445,151	122,604	2849,855	595	640	32419,5	
ЗАЛАРИ	579,876	458,012	300	250	28183,7	3827,219	
ЗВЕЗДНАЯ	283,603	865,506	412,439	17092,878	1577,5	437,95	
ЗИМА	35	686,408	729,646	498	535,026	1124,847	55
ИГИРМА	180,312	205,635	423,102	55	425,062	415	4
ИРКУТСК-ПАСС	108	98,8	132,159	171,582	195	194	
ИРКУТСК-СОРТ	42,472	379,826	105,94	105,697	480	360	69
КАЯ	88	48	701,3	313,149	353,202	1271,206	
КЕЖЕМСКАЯ	44	271,846	2426,236	837,184	274	425,7	
КЕШЕВО	1742	4768	215	229	130,95	130	

Рис. 5. Внешний вид окна табличных результатов

Экспертные решения. В условиях неравномерного развития общества, особенно настоящего экономического кризиса, затрагивающего различные сферы человеческой деятельности в экономике, в социальной сфере, в технике, в технологии и в других областях, когда происходят какие-то кардинальные изменения, эффективность применения статистических методов для прогнозирования и планирования, особенно на длительный период, снижается. Существует также опасность, что лица, принимающие решения, станут чрезмерно полагаться на статистические методы и полученные на их основе результаты и поэтому могут не заметить существенных изменений, значение которых мог бы оценить другой специалист. В таких условиях особую роль в предвидении будущего приобретает интуиция и специальные знания высококвалифицированных специалистов-экспертов. Экспертные методы в большей мере соответствуют нормативному прогнозированию скачкообразных процессов, вероятность которых не может быть исключена при анализе грузоперевозок на ВСЖД.

Таким образом, планируется опрашивать экспертов, проводя интервью и задавая вопросы о ситуации с грузоперевозками в прошлом и будущем. Основываясь на правильности ответов эксперта о прошедшем периоде времени, можно присваивать ему коэффициент достоверности, который будет ранжировать достоверность его прогнозов на будущее по сравнению с другими экспертами, участвующими в опросе.

Комплексный подход, основанный на одновременном использовании статистической и экспертной информации, позволяет получать более взвешенные и обоснованные прогнозы. Причем в связи с продолжающимся финансовым кризисом, вызывающим падение производства и уменьшение объемов грузоперевозок, значимость экспертных оценок будет все более возрастать. Использование экспертных оценок будет особенно полезным и для своевременного выявления начальной точки роста объема грузоперевозок после преодоления кризиса, что почти невозможно предсказать на основе одних только статистических данных.

Авторы благодарны профессору Л.В. Массель за ценные критические замечания, способствовавшие улучшению первоначального варианта статьи.

Работа поддержана грантом Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ (проект НШ-1676.2008.1).

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Сальникова, М.К. Анализ эффективности методов спектрального и сингулярного разложения в задачах прогнозирования сигналов с переменной структурой / М.К. Сальникова, К.В. Герасименко, Я.Н. Макаренко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2008. – № 2. – С. 137–139.
2. Новая парадигма развития России (Комплексные исследования проблем устойчивого развития) / Под ред. В.А. Коптюга, В.М. Матросова, В.К. Левашова. – М.: Academia, 1999. – 460 с.
3. Носков, С.И. Технология моделирования объектов с нестабильным функционированием и неопределенностью в данных / С.И. Носков. – Иркутск: РИЦ ГЦ “Облинформпечать”, 1996. – 320 с.

Лакеев А.В.

УДК 519.6

СИСТЕМЫ ЛИНЕЙНЫХ ИНТЕРВАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ С КОНЕЧНЫМ МНОЖЕСТВОМ РЕШЕНИЙ

В работе будем использовать стандартные обозначения $R, Q, Z,\ N$ для множеств вещественных, рациональных, целых и натуральных чисел, соответственно, и $N_+ = N \setminus \{0\}$. При этом через R^n (Q^n, Z^n, …) обозначается множество n-мерных векторов (столбцов) с координатами из $R(Q, Z, \ldots)$, а через $R^{m\times n}(Q^{m\times n}, Z^{m\times n}, \ldots)$ – множество $m\times n$-матриц с элементами из $R(Q, Z, \ldots)$.

Для векторов $a, b \in R^n$ (матриц $A, B \in R^{m\times n}$) неравенство $a \le b$ ($A \le B$), модуль $|a|$ ($|A|$) и операции $a^+ = \max\{\mathbf{0}_n, a\}$, $a^- = \max\{\mathbf{0}_n, -a\}$ ($A^+ = \max\{\mathbf{0}_{m\times n}, A\}$, $A^- = \max\{\mathbf{0}_{m\times n}, -A\}$) будем понимать покоординатно (поэлементно), где $\mathbf{0}_n$ – нулевой n-мерный вектор ($\mathbf{0}_{m\times n}$ – нулевая $m\times n$-матрица).

Также будем использовать стандартные обозначения, принятые в интервальном анализе (см., например, [1]).

Если заданы два вектора $\underline{b}, \overline{b} \in R^m$, $\underline{b} \le \overline{b}$ (матрицы $\underline{A}, \overline{A} \in R^{m\times n}$, $\underline{A} \le \overline{A}$), то интервальным вектором $\mathbf{b} = [\underline{b}, \overline{b}]$ (интервальной матрицей $\mathbf{A} = [\underline{A}, \overline{A}]$) будем называть множество $\mathbf{b} = [\underline{b}, \overline{b}] = \{b \in R^m \mid \underline{b} \le b \le \overline{b}\}$ ($\mathbf{A} = [\underline{A}, \overline{A}] = \{A \in R^{m\times n} \mid \underline{A} \le A \le \overline{A}\}$). Множество всех n-мерных интервальных векторов обозначим IR^m и множество всех интервальных $m\times n$-матриц – $IR^{m\times n}$.

Основным объектом исследования данной работы является система линейных интервальных уравнений [1] вида

$$\mathbf{A}x = \mathbf{b}, \qquad (1)$$

где $\mathbf{A} = [\underline{A}, \overline{A}] \in IR^{m\times n}$ – интервальная $m\times n$-матрица, $\mathbf{b} = [\underline{b}, \overline{b}] \in IR^m$ – интервальный m-мерный вектор.

Под множеством решений системы (1) будем понимать множество

$$\Sigma(\mathbf{A}, \mathbf{b}) = \{x \in R^n \mid \exists A \in \mathbf{A}\ \exists b \in \mathbf{b}\ \ Ax = b\}, \qquad (2)$$

называемое обычно объединенным множеством решений системы (1) [1].

При исследовании вычислительной сложности различных задач, связанных с интервальными системами линейных уравнений, большую роль играют системы, имеющие конечное объединенное множество решений [2–4]. Хорошо известно, что для обычных неинтервальных систем линейных уравнений множество решений будет либо пустым, либо одноэлементным, либо бесконечным.

В случае, когда число m уравнений системы (1) не больше, чем число n переменных, в принципе, ситуация такая же. Т.е. если $m = n$, то можно показать [2], что объединенное множество решений либо пусто, либо одноэлементно, либо бесконечно (однако, в отличие от неинтервальных систем, может быть невыпуклым). Также нетрудно показать, что если $m < n$, то множество решений либо пусто, либо бесконечно (содержит некоторый луч). Таким образом, эффект конечности множества решений появляется только при $m > n$.

В связи с вышесказанным представляется интересным получить некоторые критерии конечности объединенного множества решений, а также выяснить вычислительную сложность вопроса о конечности этого множества и вычислительную сложность задачи максимизации линейного функционала на нем, в случае его непустоты.

Приведем вначале критерий конечности $\Sigma(\mathbf{A}, \mathbf{b})$, аналогичный одному из критериев регулярности интервальной матрицы из работы [5]. Для этого проясним структуру множества $\Sigma(\mathbf{A}, \mathbf{b})$.

Введем следующие обозначения, которыми будем пользоваться в дальнейшем. Для $n \in N_+$ обозначим $Q_n = \{x \in R^n \mid x_i \in \{-1, 1\},\ \ i = \overline{1, n}\}$ – дискретный куб в R^n.

Для любого $y \in Q_n$ обозначим через R^n_y ортант в R^n, соответствующий набору знаков y, т.е.

$$R_y^n = \{x \in R^n \mid y_i x_i \geq 0,\ i = \overline{1,n}\}.$$

Согласно теореме Оеттли–Прагора [6] объединенное множество решений для системы (1) можно записать в следующем виде:

$$\Sigma(\mathbf{A},\mathbf{b}) = \{x \in R^n \mid \mid A_c x - b_c \mid \leq \Delta \mid x \mid + \delta\}, \qquad (3)$$

где $A_c = \frac{1}{2}(\overline{A} + \underline{A})$, $\Delta = \frac{1}{2}(\overline{A} - \underline{A})$, $b_c = \frac{1}{2}(\overline{b} + \underline{b})$, $\delta = \frac{1}{2}(\overline{b} - \underline{b})$. Заметим, что для $x \in R_y^n \mid x \mid = T_y x$, где $T_y = \mathrm{diag}\,(y_1,...,y_n)$ – диагональная матрица. Поэтому пересечение $\Sigma(\mathbf{A},\mathbf{b})$ с R_y^n можно записать в следующем виде:

$$\Sigma(\mathbf{A},\mathbf{b}) \cap R_y^n = \{x \in R^n \mid$$
$$-\Delta T_y x - \delta \leq A_c x - b_c \leq \Delta T_y x + \delta, T_y x \geq 0\} =$$
$$= \{x \in R^n \mid (A_c + \Delta T_y)x \geq b_c - \delta,$$
$$(A_c + \Delta T_y)x \leq b_c + \delta, T_y x \geq 0\},$$

т.е. оно является множеством решений системы $(2m+n)$ линейных неравенств от n переменных. Поэтому $\Sigma(\mathbf{A},\mathbf{b})$ конечно тогда и только тогда, когда для любого $y \in Q_n$ множество $\Sigma(\mathbf{A},\mathbf{b}) \cap R_y^n$ не более чем одноэлементно. В дальнейшем нам также понадобится следующее утверждение.

Лемма 1. *Пусть* $A \in R^{m\times n}, b \in R^m, c \in R^n$ *и система линейных неравенств вида*

$$\begin{cases} A\mathrm{x} \leq b, \\ \mathrm{x} \geq 0 \end{cases} \qquad (4)$$

разрешима. Все решения этой системы лежат в некоторой гиперплоскости $c^T\mathrm{x} = \mathrm{const}$ (^{T} *– знак транспонирования*) *тогда и только тогда, когда существует решение системы*

$$\begin{cases} y_1^T A \geq c^T; \\ y_2^T A \geq -c^T; \\ (y_1^T + y_2^T)b = 0; \\ y_1 \geq 0,\ y_2 \geq 0. \end{cases} \qquad (5)$$

Доказательство. Рассмотрим "удвоенную" систему (4), т.е.

$$\begin{cases} A\mathrm{x}_1 \leq b; \\ A\mathrm{x}_2 \leq b; \\ -\mathrm{x}_1 \leq 0; \\ -\mathrm{x}_2 \leq 0. \end{cases} \qquad (6)$$

Очевидно, что для того чтобы все решения системы (4) лежали в некоторой гиперплоскости $c^T\mathrm{x} = \mathrm{const}$, необходимо и достаточно, чтобы для любого решения $\mathrm{x}_1, \mathrm{x}_2$ системы (6) выполнялось неравенство

$$c^T(\mathrm{x}_1 - \mathrm{x}_2) \leq 0, \qquad (7)$$

т.е. неравенство (7) – следствие системы неравенств (6).

Представляя систему (6) и неравенство (7) в виде

$$\begin{pmatrix} A & 0 \\ 0 & A \\ -E & 0 \\ 0 & -E \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \mathrm{x}_1 \\ \mathrm{x}_2 \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} b \\ b \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (c^T - c^T)\begin{pmatrix} \mathrm{x}_1 \\ \mathrm{x}_2 \end{pmatrix} \leq 0,$$

где E – единичная матрица, получаем [7, следствие 7.1h], что (7) является следствием (6) тогда и только тогда, когда разрешима следующая система:

$$\begin{cases} (y_1^T\ y_2^T\ y_3^T\ y_4^T)\begin{pmatrix} A & 0 \\ 0 & A \\ -E & 0 \\ 0 & -E \end{pmatrix} = (c^T - c^T), \\ (y_1^T\ y_2^T\ y_3^T\ y_4^T)\begin{pmatrix} b \\ b \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \leq 0, \\ y_1 \geq 0,\ y_2 \geq 0,\ y_3 \geq 0,\ y_4 \geq 0. \end{cases}$$

Расписывая эту систему, получаем

$$\begin{cases} y_1^T A - y_3^T = c^T, \\ y_2^T A - y_4^T = -c^T, \\ y_1^T b + y_2^T b \leq 0, \\ y_1 \geq 0,\ y_2 \geq 0,\ y_3 \geq 0,\ y_4 \geq 0. \end{cases} \qquad (8)$$

Исключая из системы (8) переменные y_3 и y_4, получаем, что разрешимость этой системы эквивалентна разрешимости следующей системы неравенств:

$$\begin{cases} y_1^T A \geq c^T, \\ y_2^T A \geq -c^T, \\ (y_1^T + y_2^T)b \leq 0, \\ y_1 \geq 0,\ y_2 \geq 0. \end{cases} \qquad (9)$$

Далее заметим, что, так как система (4) имеет решение, то по одному из вариантов леммы Фаркаша [7, следствие 7.1f] не существует решений системы

$$\begin{cases} y^T A \ge 0, \\ y^T b < 0. \end{cases} \qquad (10)$$

Если y_1, y_2 – решение системы (9), то, складывая два первых неравенства этой системы, получим, что $(y_1^T + y_2^T)A \ge 0$, и из неразрешимости системы (10) получаем, что строгое неравенство $(y_1^T + y_2^T)b < 0$ выполняться не может. Поэтому система (9) эквивалентна системе (5). Лемма доказана.

Теорема 1. *Для того чтобы множество* $\Sigma(\mathbf{A}, \mathbf{b})$ *было конечным, необходимо и достаточно, чтобы при любом* $y \in Q_n$ *существовало решение одной из следующих линейных систем:*

$$\begin{cases} (x_1^T + x_2^T)\Delta \le (x_1^T - x_2^T)A_c T_y, \\ (x_1^T + x_2^T)\delta + (x_1^T - x_2^T)b_c < 0, \\ x_1 \ge 0,\ x_2 \ge 0, \end{cases} \qquad (11)$$

$$\begin{cases} (X_{11} + X_{12})\Delta + E_n \le (X_{11} - X_{12})A_c T_y, \\ (X_{21} + X_{22})\Delta - E_n \le (X_{21} - X_{22})A_c T_y, \\ (X_{11} + X_{12} + X_{21} + X_{22})\,\delta + \\ (X_{11} - X_{12} + X_{21} - X_{22})\,b_c = 0, \\ X_{11} \ge 0,\ X_{12} \ge 0,\ X_{21} \ge 0,\ X_{22} \ge 0, \end{cases} \qquad (12)$$

где $T_y = \mathrm{diag}(y_1, \ldots, y_n)$, $\mathbf{A} = [A_c - \Delta, A_c + \Delta]$, $\mathbf{b} = [b_c - \delta, b_c + \delta]$, $x_i \in R^n$, $i = 1,2$, $X_{ij} \in R^{n \times m}$, $i, j = 1,2$, E_n *– единичная* $n \times n$*-матрица.*

Доказательство. Как уже отмечалось выше, для того чтобы множество $\Sigma(\mathbf{A}, \mathbf{b})$ было конечным, необходимо и достаточно, чтобы при любом $y \in Q_n$ множество $\Sigma(\mathbf{A}, \mathbf{b}) \cap R_y^n$ было не более чем одноэлементным. Это множество совпадает с множеством решений следующей системы неравенств:

$$\begin{cases} (A_c - \Delta T_y)x \le b_c + \delta, \\ (A_c + \Delta T_y)x \ge b_c - \delta, \\ T_y x \ge 0. \end{cases}$$

Сделав в этой системе замену $T_y x = z$, получаем, что следующая система должна иметь не более одного решения:

$$\begin{cases} (A_c T_y - \Delta)z \le \delta + b_c, \\ -(A_c T_y + \Delta)z \le \delta + b_c, \\ z \ge 0. \end{cases} \qquad (13)$$

Рассмотрим далее два случая: система (13) не имеет решений, либо система (13) имеет единственное решение. По одному из вариантов леммы Фаркаша [7, следствие 7.1f] получаем, что система (13) не имеет решений тогда и только тогда, когда существует решение системы

$$\begin{cases} x_1^T (A_c T_y - \Delta) - x_2^T (A_c T_y + \Delta) \ge 0, \\ x_1^T (\delta + b_c) + x_2^T (\delta - b_c) < 0, \\ x_1 \ge 0,\ x_2 \ge 0, \end{cases}$$

которая, очевидно, эквивалентна системе (11).

Рассмотрим теперь условия, при которых система (13) имеет единственное решение.

Обозначим e_i – i-й орт в R^n, $i = \overline{1,n}$. Тогда очевидно, что система (13) имеет единственное решение, если и только если для любого $i = \overline{1,n}$ все решения системы лежат в гиперплоскости $e_i^T z = \mathrm{const}$.

Используя лемму 1, получаем, что для этого необходимо и достаточно, чтобы при всех $i = \overline{1,n}$ существовало решение системы

$$\begin{cases} u_{1i}^T (A_c T_y - \Delta) - u_{2i}^T (A_c T_y + \Delta) \ge e_i^T, \\ v_{1i}^T (A_c T_y - \Delta) - v_{2i}^T (A_c T_y + \Delta) \ge -e_i^T, \\ (u_{1i}^T + v_{1i}^T)(\delta + b_c) + (u_{2i}^T + v_{2i}^T)(\delta - b_c) = 0, \\ u_{1i} \ge 0,\ u_{2i} \ge 0,\ v_{1i} \ge 0,\ v_{2i} \ge 0, \end{cases}$$

которую после очевидных преобразований можно записать в следующем виде:

$$\begin{cases} (u_{1i}^T + u_{2i}^T)\Delta + e_i^T \le (u_{1i}^T - u_{2i}^T)A_c T_y, \\ (v_{1i}^T + v_{2i}^T)\Delta - e_i^T \le (v_{1i}^T - v_{2i}^T)A_c T_y, \\ (u_{1i}^T + u_{2i}^T + v_{1i}^T + v_{2i}^T)\delta + \\ + (u_{1i}^T + v_{1i}^T - u_{2i}^T - v_{2i}^T)b_c = 0, \\ u_{1i} \ge 0,\ u_{2i} \ge 0,\ v_{1i} \ge 0,\ v_{2i} \ge 0. \end{cases} \qquad (14)$$

Объединяя системы (14) по всем $i = \overline{1,n}$ в одну систему и образуя из векторов-строк u_{1i}^T, u_{2i}^T, v_{1i}^T, v_{2i}^T матрицы $X_{11}, X_{12}, X_{21}, X_{22}$, соответственно, получаем систему (12). Теорема доказана.

Системы (11), (12) можно преобразовать в более компактный вид, если использовать модули векторов и матриц.

Следствие 1. *Для того чтобы множество* $\Sigma(\mathbf{A}, \mathbf{b})$ *было конечным, необходимо и достаточно, чтобы при любом* $y \in Q_n$ *существовало решение одной из следующих систем с модулями:*

$$\begin{cases} |x^T| \Delta \le x^T A_c T_y, \\ |x^T| \delta + x^T b_c < 0, \end{cases} \qquad (15)$$

$$\begin{cases} |X_1| \Delta + E_n \le X_1 A_c T_y, \\ |X_2| \Delta - E_n \le X_2 A_c T_y, \\ (|X_1| + |X_2|)\delta + (X_1 + X_2)b_c = 0, \end{cases} \qquad (16)$$

где $x \in R^n$, $X_1, X_2 \in R^{n\times m}$.

Доказательство. Покажем, что разрешимость систем (11) или (12) эквивалентна разрешимости систем (15) или (16).

Пусть система (11) разрешима и x_1, x_2 – некоторое ее решение. Положим $x = x_1 - x_2$. Тогда очевидно, что $|x| \le x_1 + x_2$, и, учитывая неотрицательность матрицы Δ и вектора δ, получаем

$$|x^T|\Delta \le (x_1^T + x_2^T)\Delta \le (x_1^T - x_2^T)A_cT_y = x^TA_cT_y,$$

$$|x^T|\delta + x^Tb_c \le (x_1^T + x_2^T)\delta + (x_1^T - x_2^T)b_c < 0,$$

т.е. вектор x будет решением системы (15).

Обратно, если x – решение системы (15), то, полагая $x_1 = x^+$, $x_2 = x^-$ (положительная и отрицательная часть вектора x соответственно), получаем, что $x = x_1 - x_2$ и $|x| = x_1 + x_2$. Следовательно, x_1, x_2 будут решением системы (11).

Эквивалентность разрешимости систем (12) и (16) (при условии, что существует решение системы (13)) доказывается аналогично. Следствие доказано.

Как известно [8], для выяснения вопроса о разрешимости системы линейных неравенств (а, следовательно, и для систем (11), (12) при фиксированном $y \in Q_n$) существует полиномиальный алгоритм. Однако, для того чтобы выяснить вопрос о конечности множества $\Sigma(\mathbf{A},\mathbf{b})$, опираясь на теорему 1, необходимо выяснить разрешимость 2^n систем вида (11), (12), т.е. получаем, вообще говоря, экспоненциальный алгоритм. Как видно из следующей теоремы, если $P \ne NP$, то полиномиального алгоритма для выяснения конечности множества $\Sigma(\mathbf{A},\mathbf{b})$ не существует. Для доказательства этого утверждения нам потребуется следующая лемма, которая может быть получена из некоторых результатов работы [9], однако мы приведем совершенно элементарное доказательство.

Лемма 2 [9]. *Для заданного вектора* $d = (d_1,\dots,d_n)^T \in R^n$ *вектор* $x = (x_1,\dots,x_n)^T \in R^n$ *удовлетворяет системе неравенств*

$$\begin{cases} |x_i + d_i(d,x)| \le 1, \quad i = \overline{1,n}; \\ n \le \sum_{j=1}^{n} |x_j| \end{cases} \tag{17}$$

тогда и только тогда, когда $x_i \in \{-1,1\}, i = \overline{1,n}$, *и* $(d,x) = \sum_{i=1}^{n} d_i x_i = 0.$

Доказательство. То, что вектор $x \in R^n$ с координатами из $\{-1,1\}$ и такой, что $(d,x) = 0$, удовлетворяет системе (17), очевидно.

Покажем обратное. Пусть $x \in R^n$ удовлетворяет (17). Расписывая $\| x + (d,x)d \|^2$, получим

$$\| x + (d,x)d \|^2 = \| x \|^2 + 2(x,(d,x)d) + \| (d,x)d \|^2 =$$
$$= \| x \|^2 + 2(d,x)(d,x) + (d,x)^2 \| d \|^2 =$$
$$= \| x \|^2 + 2(d,x)^2\left(1 + \frac{1}{2}\| d \|^2\right).$$

Из этого равенства получаем

$$\| x \|^2 = \| x + (d,x) \|^2 - 2(d,x)^2\left(1 + \frac{1}{2}\| d \|^2\right). \tag{18}$$

Тогда, используя неравенства (17), равенство (18) и хорошо известное неравенство $|a| \le \frac{1}{2}(1 + a^2)$, получаем

$$n \le \sum_{i=1}^{n} |x_i| \le \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2}(1 + x_i^2) =$$
$$= \frac{1}{2}\left(n + \sum_{i=1}^{n} x_i^2\right) = \frac{1}{2}(n + \| x \|^2) =$$
$$= \frac{1}{2}\left(n + \| x + (d,x)d \|^2 - 2(d,x)^2\left(1 + \frac{1}{2}\| d \|^2\right)\right) =$$
$$= \frac{1}{2}\left(n + \sum_{i=1}^{n}(x_i + (d,x)d_i)^2 - \right.$$
$$\left. - 2(d,x)^2\left(1 + \frac{1}{2}\| d \|^2\right)\right) \le$$
$$\le \frac{1}{2}\left(n + n - 2(d,x)^2\left(1 + \frac{1}{2}\| d \|^2\right)\right) =$$
$$= n - (d,x)^2\left(1 + \frac{1}{2}\| d \|^2\right).$$

И, следовательно, $(d,x)^2\left(1 + \frac{1}{2}\| d \|^2\right) \le 0.$ Что возможно только в случае $(d,x) = 0$. Поэтому из первых неравенств (17) получаем $|x_i| \le 1, i = \overline{1,n},$ и, учитывая неравенство $n \le \sum_{i=1}^{n} |x_i|$, получаем $|x_i| = 1$, т.е. $x_i \in \{-1,1\}$, $i = \overline{1,n}$. Лемма доказана.

Теорема 2. *Задача выяснения по заданным матрицам* $\underline{A}, \overline{A} \in Z^{(m+1)\times m}$ *и векторам* $\underline{b}, \overline{b} \in Z^{m+1}$ *таким, что множество* $\Sigma(\mathbf{A},\mathbf{b})$ *непусто и ограничено, будет ли множество* $\Sigma(\mathbf{A},\mathbf{b})$ *конечным, является NP-трудной (более точно, co-NP-*

полной). Если, кроме того, задан вектор $c \in Z^m$, *число* $\alpha \in Z$ *и известно, что* $\Sigma(\mathbf{A},\mathbf{b})$ *не пусто и конечно, то задача выяснения, верно ли, что* $\max\left\{c^T x \,\middle|\, x \in \Sigma(\mathbf{A},\mathbf{b})\right\} \geq \alpha$, *NP-полна.*

Доказательство. То, что первая задача лежит в $co\text{-}NP$, следует непосредственно из теоремы 1. Действительно, отрицание этой задачи, т.е. выяснение того, что множество $\Sigma(\mathbf{A},\mathbf{b})$ бесконечно, будет лежать в NP.

Недетерминированный полиномиальный алгоритм, выясняющий этот вопрос, состоит в следующем. Сначала "угадываем" тот ортант R^n_y, для которого системы (12), (13) будут неразрешимы, и затем с помощью полиномиального алгоритма [8] показываем их неразрешимость.

Покажем теперь, что известная NP-полная задача РАЗБИЕНИЕ [10] полиномиально сводится к задаче выяснения бесконечности множества $\Sigma(\mathbf{A},\mathbf{b})$.

Задача РАЗБИЕНИЕ состоит в следующем.

УСЛОВИЕ. Заданы $n \geq 1$ чисел $d_1,\ldots,d_n \in N_+$.

ВОПРОС. Существует ли набор знаков $x_1,\ldots,x_n \in \{-1,1\}$ такой, что $\sum_{i=1}^{n} x_i d_i = 0$?

Другими словами, если для заданного вектора $d = (d_1,\ldots,d_n)^T \in N_+^n$ обозначим $\Sigma_R(d) = \left\{x \in Q_n \,|\, \sum_{i=1}^{n} x_i d_i = 0\right\}$, то задача РАЗБИЕНИЕ состоит в выяснении непустоты множества $\Sigma_R(d)$.

Итак, пусть задан вектор $d = (d_1,\ldots,d_n)^T \in N_+^n$. Обозначим $\widetilde{d} = (\widetilde{d}_1,\ldots,\widetilde{d}_{n+2})^T$, $\widetilde{d}_i = 2d_i$, $i = \overline{1,n}$, $\widetilde{d}_{n+1} = \sum_{i=1}^{n} d_i$, $\widetilde{d}_{(n+2)} = -\sum_{i=1}^{n} d_i$ и рассмотрим систему из $(n+5)$ уравнений от $(n+4)$ переменных $x_1,\ldots,x_{n+4}$, $\widetilde{x} = (x_1,\ldots,x_{n+4})^T$.

Рассмотрим систему линейных интервальных уравнений

$$\begin{cases} x_i + \widetilde{d}_i(\widetilde{d},\widetilde{x}) = [-1,1],\ i = \overline{1,n+2}, \\ \sum_{j=1}^{n} [-1,1]\, x_j = n+2, \\ x_{n+3} = x_{n+1} + x_{n+2}, \\ x_{n+4} + [-1,1]\, x_{n+3} = 0. \end{cases} \qquad (19)$$

Пусть интервальные матрица $\mathbf{A}$ и вектор $\mathbf{b}$ соответствуют системе (19). Тогда по теореме Оеттли–Прагора и лемме 2 получаем, что система (19) эквивалентна следующей:

$$\begin{cases} x_i \in \{-1,1\},\ i = \overline{1,n+2}, \\ 2\left(\sum_{j=1}^{n} x_j d_j\right) + \left(\sum_{j=1}^{n} d_j\right) x_{n+1} - \left(\sum_{j=1}^{n} d_j\right) x_{n+2} = 0, \\ x_{n+3} = x_{n+1} + x_{n+2}, \\ |\, x_{n+4}\, | \leqslant |\, x_{n+3}\, |. \end{cases} \qquad (20)$$

Покажем, что множество решений задачи РАЗБИЕНИЕ $\Sigma_R(d)$ непусто тогда и только тогда, когда множество решений системы (20) (т.е. $\Sigma(\mathbf{A},\mathbf{b})$) бесконечно.

Пусть $\Sigma_R(d) = \left\{x \in Q_n \,|\, \sum_{i=1}^{n} x_i d_i = 0\right\} \neq \varnothing$ и $x^0 = (x_1^0,\ldots,x_n^0)^T \in \Sigma_R(d)$. Тогда очевидно, что для любого $\alpha \in [-2,2]$ вектор $\widetilde{x}^0 \in R^{n+4}$ вида $\widetilde{x}^0 = (x_1^0,\ldots,x_n^0,1,1,2,\alpha)^T$ удовлетворяет системе (20) и, следовательно, принадлежит $\Sigma(\mathbf{A},\mathbf{b})$. Таким образом, $\Sigma(\mathbf{A},\mathbf{b})$ – бесконечно.

Покажем обратное. Пусть $\Sigma(\mathbf{A},\mathbf{b})$ бесконечно. Посмотрим, за счет какой координаты в множестве векторов $\Sigma(\mathbf{A},\mathbf{b})$ может возникнуть бесконечность? Из системы (20) получаем, что, если $x = (x_1,\ldots,x_{n+4}) \in \Sigma(\mathbf{A},\mathbf{b})$, то $x_i \in \{-1,1\}$, $i = \overline{1,n+2}$, $x_{n+3} \in \{-2,0,2\}$. Так как векторов из R^{n+3}, удовлетворяющих этим условиям, конечное число ($\leq 3 \cdot 2^{n+2}$), то в множестве $\Sigma(\mathbf{A},\mathbf{b})$ найдется вектор $\widetilde{x}^0 = (x_1^0,\ldots,x_{n+4}^0)^T$ такой, что $x_{n+4}^0 \neq 0$. Но тогда $|\, x_{n+3}\, | \geq |\, x_{n+4}\, | > 0$ и, следовательно, $x_{n+3}^0 \in \{-2,2\}$. В силу равенства $x_{n+3}^0 = x_{n+1}^0 + x_{n+2}^0$ и того, что $x_{n+1}^0, x_{n+2}^0 \in \{-1,1\}$, это возможно, только когда либо $x_{n+1}^0 = x_{n+2}^0 = 1$, либо $x_{n+1}^0 = x_{n+2}^0 = -1$. Но тогда в любом случае из второго уравнения системы (20) получаем, что $\sum_{i=1}^{n} x_i^0 d_i = 0$, т.е. $x^0 = (x_1^0,\ldots,x_n^0)^T \in \Sigma_R(d)$. Следовательно, $\Sigma_R(d) \neq \varnothing$.

Таким образом, задача РАЗБИЕНИЕ полиномиально сводится к задаче выяснения бесконечности множества $\Sigma(\mathbf{A},\mathbf{b})$. Кроме того, очевидно, что множество решений системы (20) при любых $d_1,\ldots,d_n \in N_+$ непусто и ограничено. Следовательно, задача выяснения бесконечности множества $\Sigma(\mathbf{A},\mathbf{b})$ будет NP-полной и поэтому задача

выяснения конечности $\Sigma(\mathbf{A},\mathbf{b})$ будет $co\text{-}NP$-полной.

Рассмотрим теперь задачу максимизации. Недетерминированный полиномиальный алгоритм, решающий эту задачу, состоит в следующем. Сначала "угадываем" тот ортант R^n_y, в котором достигается максимум, и затем с помощью полиномиального алгоритма [8] показываем нужное неравенство.

Для доказательства NP-полноты опять используем задачу РАЗБИЕНИЕ. Пусть задан вектор $d \in N^n_+$. Образуем вектор $\widetilde{d}$ так же, как раньше, и рассмотрим систему из $(n+3)$ уравнений от $(n+2)$ переменных, состоящую из первых $(n+3)$-х уравнений системы (19).

Опять по теореме Оеттли–Прагора и лемме 2 получаем, что она эквивалентна первым $(n+3)$-м уравнениям системы (20).

Обозначим через $\mathbf{A}_0$, $\mathbf{b}_0$ интервальные матрицу и вектор, соответствующие этой системе, $c_0 = (0,\ldots,0,1,1)^T \in Z^{n+2}$ и $\alpha = 2$. Множество $\Sigma(\mathbf{A}_0,\mathbf{b}_0)$ непусто, так как $(1,\ldots,1,-1,1)^T \in \Sigma(\mathbf{A}_0,\mathbf{b}_0)$ и, очевидно, конечно. Кроме того, $\max\left\{c_0^T x \,\middle|\, x \in \Sigma(\mathbf{A}_0,\mathbf{b}_0)\right\} \geq 2$ тогда и только тогда, когда в $\Sigma(\mathbf{A}_0,\mathbf{b}_0)$ имеется вектор вида $(x_1,\ldots,x_n,1,1)^T$, что очевидно эквивалентно $\Sigma_R(d) \neq \varnothing$. Таким образом, задача РАЗБИЕНИЕ полиномиально сводится к задаче максимизации и, следовательно, последняя NP-полна. Теорема доказана.

Из этой теоремы, в частности, следует, что если $P \neq NP$, то не существует характеризации систем вида (1), имеющих конечное множество решений существенно лучше (относительно сложности проверки), чем полученная в теореме 1.

На следующий подкласс интервальных систем указал автору С.П. Шарый. В его работе [11] получены некоторые интересные свойства неотрицательных интервальных систем, при этом система вида (1) считается неотрицательной, если $\underline{A} \geq \mathbf{0}_{m\times n}$ (где $\mathbf{0}_{m\times n}$ – нулевая $m\times n$-матрица и "$\geq$" понимается поэлементно).

Рассмотрим еще более узкий класс интервальных систем. Обозначим $e^n = \sum_{i=1}^{n} e_i = (1,\ldots,1)^T \in R^n$ и $E^{m,n} = e^m (e^n)^T$ – $m\times n$-матрицу, у которой все элементы равны единице.

Определение. Будем говорить, что система вида (1) с интервальной $m\times n$-матрицей $\mathbf{A} = [\underline{A}, \overline{A}]$ и интервальным m-вектором $\mathbf{b} = [\underline{b}, \overline{b}]$ строго положительна, если $\underline{A} \geq E^{m,n}$, $\underline{b} \geq e^m$.

Введем следующее преобразование пары $(\mathbf{A},\mathbf{b})$, $\mathbf{A} = [\underline{A}, \overline{A}] \in IR^{m\times n}$, $\mathbf{b} = [\underline{b}, \overline{b}] \in IR^m$, в пару $(\mathbf{A}_p,\mathbf{b}_p)$,

где $\mathbf{A}_p = [\underline{A}_p, \overline{A}_p] \in IR^{(m+1)\times(n+1)}$,

$$\mathbf{b}_p = [\underline{b}_p, \overline{b}_p] \in IR^{m+1},$$

$$\overline{A}_p = \begin{pmatrix} \overline{A} + L & e^m \\ \gamma (e^n)^T & 1 \end{pmatrix}, \quad \underline{A}_p = \begin{pmatrix} \underline{A} + L & e^m \\ \gamma (e^n)^T & 1 \end{pmatrix},$$

$$\overline{b}_p = \begin{pmatrix} \overline{b} + \delta e^m \\ \delta \end{pmatrix}, \quad \underline{b}_p = \begin{pmatrix} \underline{b} + \delta e^m \\ \delta \end{pmatrix},$$

$$L = \gamma e^m (e^n)^T = \gamma E^{m,n}, \quad \gamma = \max\left\{1, 1 - \min_{i,j} \overline{a}_{ij}\right\},$$

$$\delta = \max\left\{1, 1 - \min_{i} \overline{b}_i\right\}.$$

Отметим, что при этом $\Sigma(\mathbf{A}_p,\mathbf{b}_p) \subseteq R^{n+1}$ и будем записывать вектора из R^{n+1} в виде $\begin{pmatrix} x \\ x_{n+1} \end{pmatrix}$, где $x \in R^n$, $x_{n+1} \in R$. Тогда верно следующее утверждение.

Теорема 3. *Для любых* $\mathbf{A} \in IR^{m\times n}$, $\mathbf{b} \in IR^m$ *система* $(\mathbf{A}_p,\mathbf{b}_p)$ *сильно положительна и*

$$\Sigma(\mathbf{A}_p,\mathbf{b}_p) = \left\{ \begin{pmatrix} x \\ \delta - \gamma (e^n)^T x \end{pmatrix} \,\middle|\, x \in \Sigma(\mathbf{A},\mathbf{b}) \right\}. \quad (21)$$

Доказательство. Покажем, что система $(\mathbf{A}_p,\mathbf{b}_p)$ сильно положительна. Очевидно, что выполняются следующие неравенства:

$$\underline{a}_{ij} + \gamma \geq \underline{a}_{ij} + 1 - \min_{k,l} \underline{a}_{kl} \geq 1,$$

$$\underline{b}_i + \gamma \geq \underline{b} + 1 - \min_{k} \underline{b}_k \geq 1,$$

$$\gamma \geq 1 \text{ и } \delta \geq 1.$$

Поэтому $\underline{A}_p \geq E^{m+1,\,n+1}$, $\underline{b}_p \geq e^{m+1}$.

Покажем теперь равенство (21). Заметим, что матрица $A_p \in \mathbf{A}_p$ (вектор $b_p \in \mathbf{b}_p$) тогда и только тогда, когда существует $A \in \mathbf{A}$ ($b \in \mathbf{b}$) такая, что $A_p = \begin{pmatrix} A + L & e^m \\ \gamma (e^n)^T & 1 \end{pmatrix}$ (соответственно,

$b_p = \begin{pmatrix} b + \delta e^m \\ \delta \end{pmatrix}$). Поэтому равенство $A_p \begin{pmatrix} x \\ x_{n+1} \end{pmatrix} = b_p$ эквивалентно системе уравнений

$$\begin{cases} Ax + \gamma e^m (e^n)^T x + x_{n+1} e^m = b + \delta e^m, \\ \gamma (e^n)^T x + x_{n+1} = \delta. \end{cases} \quad (22)$$

Вычитая из первого уравнения системы (22) второе, умноженное на e^m, получим, что эта система эквивалентна следующей:

$$\begin{cases} Ax = b, \\ \gamma (e^n)^T x + x_{n+1} = \delta. \end{cases}$$

Поэтому $\begin{pmatrix} x \\ x_{n+1} \end{pmatrix} \in \Sigma(\mathbf{A}_p, \mathbf{b}_p)$ тогда и только тогда, когда $x \in \Sigma(\mathbf{A}, \mathbf{b})$ и $x_{n+1} = \delta - \gamma (e^n)^T x_0$. Теорема доказана.

Из этой теоремы, в частности, следует, что преобразование сохраняет (причем в обе стороны) такие свойства системы как непустота, ограниченность и конечность объединенного множества решений, а также разность между числом уравнений и переменных. Кроме того, очевидно, что целочисленные системы переходят в целочисленные, а максимизация линейного функционала на $\Sigma(\mathbf{A}, \mathbf{B})$ эквивалентна его максимизации на $\Sigma(\mathbf{A}_p, \mathbf{B}_p)$, и система $(\mathbf{A}_p, \mathbf{B}_p)$ строится по системе $(\mathbf{A}, \mathbf{b})$ полиномиальным алгоритмом. Поэтому различные алгоритмические задачи для интервальных систем полиномиально эквивалентны соответствующей задаче для их подклассов строго положительных систем. В частности, верно

Следствие 2. *Задача выяснения по заданным матрицам* $\underline{A}$, $\overline{A} \in Z^{(m+1)\times m}$ *и векторам* $\underline{b}$, $\overline{b} \in Z^{m+1}$ *таким, что система строго положительна, а множество* $\Sigma(\mathbf{A}, \mathbf{b})$ *непусто и ограничено, будет ли множество* $\Sigma(\mathbf{A}, \mathbf{b})$ *конечным, является co-NP-полной. Задача максимизации линейного функционала на непустых конечных множествах решений строго положительных систем NP-полна.*

Работа частично поддержана грантом Президента РФ НШ-1676.2008.1 и грантом РФФИ № 07-01-00400.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Neumaier, A. Interval Methods for Systems of Equations / A. Neumaier. – Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
2. Lakeyev, A.V. NP-hard classes of linear algebraic systems with uncertainties / A.V. Lakeyev, V. Kreinovich // Reliable Computing. – 1997. – Vol. 3, № 1. – P. 51–81.
3. Kreinovich, V. Computational complexity and feasibility of data processing and interval computational / V. Kreinovich, A.V. Lakeyev, J. Rohn, P. Kahl. – Dordrecht: Kluwer, 1998. – 472 p.
4. Lakeyev, A.V. Computational Complexity of Estimation of Generalized Sets of Solutions for Interval Linear Systems / A.V. Lakeyev // Вычислительные технологии. – 2003. – Т. 8, № 1. – С. 12–23.
5. Rohn, J. Systems of linear interval equations / J. Rohn // Linear Algebra and its Applications. – 1989. – Vol. 126. – P. 39–78.
6. Oettle, W. Compatibility of approximate solution of linear equations with given error bounds for coefficients and right-hand sides / W. Oettle, W. Prager // Num. Math. – 1964. – Vol. 6. – P. 405–409.
7. Схрейвер, А. Теория линейного и целочисленного программирования. Т. 1, 2 / А. Схрейвер. – М.: Мир, 1991.
8. Хачиян, Л.Г. Полиминальный алгоритм в линейном программировании / Л.Г. Хачиян // Докл. АН СССР. – 1979. – Т. 244, № 5. – С. 1093–1096.
9. Nemirovskii, A. Several *NP*-Hard Problems Arising in Robust Stability Analysis / A. Nemirovskii // Mathematics of Control, Signals and Systems. – 1993. – Vol. 6. – P. 99–105.
10. Гэри, М. Вычислительные машины и трудноразрешаемые задачи / М. Гэри, Д. Джонсон. – М.: Мир, 1982.
11. Shary, S.P. Solving interval linear systems with nonnegative matrices / S.P. Shary // Proc. of Conf. "Scientific Computation and Mathematical Modelling" / Ed. by S. Markov. – Sofia: DATECS Publishing, 1993. – P. 179–181.

Маджара Т.И., Горнов А.Ю. УДК 681.3.06, 519.688, 004.891

ТЕСТОВАЯ КОЛЛЕКЦИЯ ЗАДАЧ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ С ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМИ ОСОБЕННОСТЯМИ

Практика численного исследования задач оптимального управления (ЗОУ) с использованием современных программных комплексов [1–4] показывает, что далеко не всегда удается провести решение от начала и до конца без использования специальных подходов [5], подразумевающих многократный запуск комплекса в совокупности с изменением программной постановки задачи. В частности, это связано с возникновением в процессе счета разного рода внештатных ситуаций, следствием которых является аварийное завершение работы программного комплекса. Применение таких специализированных подходов при решении практических задач требует от пользователя углубленных знаний предметной области. С целью повышения уровня отчуждаемости программных комплексов от разработчика созданы конструктивные средства экспертной поддержки пользователя в работе с определенными классами задач. Эффективным методом всесторонней оценки возможностей таких средств, а также выявления недостатков в их реализации является тестирование. К сожалению, общепризнанных и широко известных тестовых коллекций, подобных коллекциям тестов для задач математического программирования [6, 7], для ЗОУ рассматриваемого класса пока не существует. В данной статье авторами представлены принципы создания такой коллекции и ее краткое описание, а также приведены результаты решения некоторых задач коллекции, полученные автоматизированным программным комплексом OPTCON/SMART.

Задача оптимального управления (ЗОУ). Пусть задан отрезок времени $T = [t_0, t_1]$, на котором определены вектор-функции $u(t) \in R^m$, $x(t) \in R^n$, $t \in T$, задающие управление и фазовое состояние некоторого объекта в момент времени t и удовлетворяющие системе дифференциальных уравнений:

$$\dot{x} = f(t, x, u), \quad x(t_0) = x_0. \qquad (1)$$

Наложены ограничения на управление: $u(t) \in U \subset R^m$, $t \in T$.

Вектор-функция $x(t)$ предполагается кусочно-дифференцируемой, а $u(t)$ – кусочно-непрерывной. Множество пар $(x(t), u(t))$, удовлетворяющих перечисленным условиям, называют множеством допустимых и обозначают D. На множестве D задан функционал

$$I = F(x(t_1)) + \int_{t_0}^{t_1} f^0(t, x(t), u(t))dt.$$

Задача состоит в поиске последовательности $\{x_s(t), u_s(t)\} \subset D$, на которой $I(x_s, u_s) \to \inf_{(x,u)\in D} I(x,u)$, $s \to \infty$.

Задача оптимального управления с вычислительными особенностями (ЗОУВО). В данной работе под задачей оптимального управления с вычислительными особенностями будем понимать имеющую решение задачу, у которой в последовательности улучшающих управлений, генерируемых программным комплексом, существует элемент, использование которого в последующих процедурах вычислительного метода приводит к аварийному завершению работы. На всем множестве ЗОУВО выделим класс задач, в которых:

в системе дифференциальных уравнений (1), описывающих исследуемую модель, нарушаются условия роста [8], гарантирующие существование решения на заданном отрезке времени;

генерируемые в процессе работы программного комплекса улучшающие управления и соответствующие им траектории на некоторых участках отрезка времени нарушают области определения элементарных функций, входящих в правую часть системы дифференциальных уравнений;

генерируемые в процессе работы программного комплекса траектории имеют участки со значениями, выходящими за границы возможностей машинного представления чисел с плавающей точкой (появляются уходящие «в бесконечность» траектории, условия роста при этом могут и не нарушаться).

Общим подходом, позволяющим успешно решать задачи оптимального управления с вычислительными особенностями можно назвать метод «продолжения по параметру» [9]. Так, в нашем случае этот метод подразумевает ввод в задачу постановочного параметра p, задающего параметрическое семейство аппроксимирующих вспомогательных ЗОУ следующего вида:

$$\dot{x} = pf(t,x,u),\ x(t_0) = x^0;$$

$$u(t) \in R^m,\ \ x(t) \in R^n,\ \ t \in T = [t_0, t_1];$$

$$u(t) \in U \subset R^m,\ \ t \in T;$$

$$I = F(x(t_1)) + \int_{t_0}^{t_1} f^0(t,x(t),u(t))dt \to \min.$$

Здесь $p \in (0,1]$. Очевидно, что при $p = 1$ задача из параметрического семейства полностью идентична исходной. Поиск решения исходной задачи производится путем построения и решения серии задач из параметрического семейства. При этом решение каждой последующей задачи из этой серии проводится с использованием управления, являющегося оптимальным для предыдущей задачи, в качестве начального.

В программном комплексе OPTCON/SMART формированием аппроксимирующего семейства, а также поиском на нем решения исходной задачи (отысканием конструктивной последовательности значений постановочного параметра) управляет интеллектуальный динамический планировщик (ИДП). ИДП представляет собой реализацию модели действий эксперта на основе формализма правил-продукций, выполненную на языке декларативного программирования CLIPS [10].

Принципы построения коллекции тестовых задач. Основу любой методики тестирования программных комплексов для решения ЗОУ составляют специально собранные коллекции (библиотеки) тестовых задач. Такие задачи, согласно [11], должны:

- быть унифицированными и общепризнанными;
- моделировать сложности целевого класса задач;
- иметь известное или, по крайней мере, эталонное решение;
- быть компактными;
- не давать преимуществ тому или иному методу.

При тестировании разработанного автоматизированного программного комплекса OPTCON/SMART, содержащего помимо традиционных вычислительных процедур интеллектуальные механизмы управления ходом решения, данные принципы в той или иной мере отражаются следующими способами.

Унификация и общепризнанность. Ввиду отсутствия в научной литературе упоминаний о существующих коллекциях задач рассматриваемого класса для тестирования комплекса применялись как собственные оригинальные задачи, составленные авторами, так и общепризнанные задачи.

Моделирование сложности целевого класса задач. Каждая задача тестовой коллекции вызывает аварийную остановку исполнительного модуля при неудачном задании начального управления, например, в виде константы.

Наличие эталонного решения. Функционалы всех задач тестовой коллекции, за исключением задачи о брахистохроне и задачи Годдарда, представляют собой сумму (интеграл) квадратов величин, поэтому, очевидно, наилучшее возможное решение доставляет функционалу нулевое значение. Справедливо отметить, что ввиду отсутствия результатов аналитического исследования мы не можем утверждать принципиальную достижимость такого решения, поэтому на данном этапе правильнее считать его псевдо-решением и использовать лишь для оценки адекватности полученного результата.

Компактность. Большинство задач тестовой коллекции имеют по две фазовых траектории и одному управлению.

Отсутствие преимуществ для того или иного метода оптимизации. Первым шагом любого метода оптимизации является интегрирование динамической системы на заданном начальном управлении для получения соответствующих ему траекторий. Большинство задач тестовой коллекции вызывает исключительные ситуации именно на этом этапе. Кроме того, основным объектом тестирования являлся не столько конкретный метод оптимизации, реализованный в программном комплексе, сколько механизмы экспертной поддержки.

К настоящему моменту коллекция содержит 36 тестовых ЗОУВО. Коллекция также включает в

себя известную задачу о брахистохроне и задачу Годдарда.

Задача о брахистохроне. Эта классическая задача рассматривалась, например, в [12, 13]. Для данной задачи характерным является уход траекторий в «бесконечность» за конечное время

$$\dot{x}_1 = u;$$

$$\dot{x}_2 = \sqrt{\frac{1+u^2}{x_1}};$$

$$x(0) = (3, 0), \quad t \in [0, 2],$$

$$I(x,u) = x_2(2) + 1000.0 * (x_1(2) - 10)^2 \to \min;$$

$$|u| \le 10.$$

Ниже в табл. 1 приводятся результаты решения, полученные с использованием программного комплекса OPTCON/SMART. В представленных расчетных таблицах здесь и далее p – значение постановочного параметра, однозначно определяющее вспомогательную задачу аппроксимирующего параметрического семейства. При $p = 1$ задача полностью совпадает с исходной. Далее, iter – количество итераций, status – результат вычислений (FAIL – аварийное, а OK – штатное завершение работы вычислительной компоненты), func – значение функционала в задаче с соответствующим значением постановочного параметра p.

Таблица 1

Ход решения

p	iter	status	func
1.0e+00	0	FAIL	---
9.0e-01	0	FAIL	---
5.0e-01	0	FAIL	---
2.0e-01	6	OK	9.00001836e+05
4.0e-01	1	FAIL	---
3.0e-01	8	OK	1.00002548e+05
4.0e-01	1	FAIL	---
2.5e-01	8	OK	4.00002203e+05
3.0e-01	7	OK	1.00002548e+05
3.5e-01	6	OK	2.87472014e+00
4.0e-01	1	FAIL	---
2.2e-01	9	OK	6.76001986e+05
2.4e-01	11	OK	4.84002132e+05
2.6e-01	10	OK	3.24002274e+05
2.8e-01	9	OK	1.96002413e+05
3.0e-01	12	OK	1.00002548e+05
3.2e-01	14	OK	3.60026810e+04
3.4e-01	10	OK	4.00281083e+03
3.6e-01	4	OK	2.87554486e+00
3.8e-01	3	OK	2.87726323e+00
4.0e-01	3	OK	2.87907337e+00
6.0e-01	1	FAIL	---
5.0e-01	1	FAIL	---
4.5e-01	3	OK	2.88399908e+00
5.0e-01	3	OK	2.88949434e+00
5.5e-01	3	OK	2.89555592e+00
6.0e-01	7	OK	2.90218027e+00
8.0e-01	1	FAIL	---
7.0e-01	1355	OK	2.91642674e+00
8.0e-01	87	OK	2.93263267e+00
1.0e+00	1	FAIL	---
9.0e-01	303	OK	2.95113557e+00
1.0e+00	6	OK	2.97187886e+00

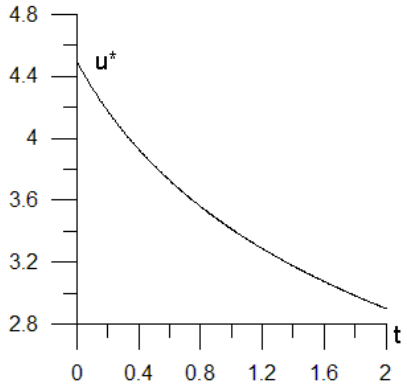


Рис. 1. Оптимальное управление

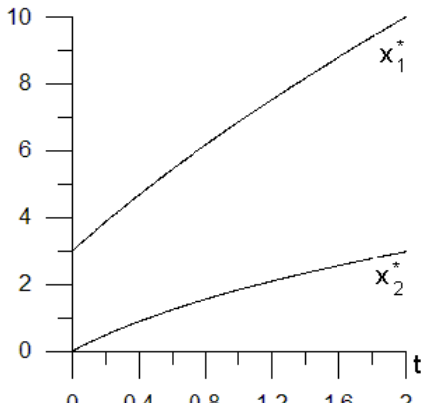


Рис. 2. Оптимальные траектории

Задача Годдарда (классическая задача о вертикальном подъеме ракеты на максимальную высоту) [14]. Движение ракеты в атмосфере описывается следующей динамической системой:

$$\dot{h} = v; \quad \dot{v} = \frac{T - D(h,v)}{m} - g(h); \quad \dot{m} = -\frac{T}{c}.$$

Здесь $h(t)$ – высота полета ракеты относительно центра планеты, $v(t)$ – вертикальная скорость подъема, $T(t)$ – тяга двигателя, $D(h,v)$ – аэродинамическое сопротивление, $m(t)$ – масса ракеты, $g(h(t))$ – сила гравитации, $c = \frac{1}{2}\sqrt{g_0 h(0)}$. Тяга ракеты ограничена соотношениями $0 \le T(t) \le T_{\max}$.

В начале процесса при $t = 0$ ракета находится в состоянии покоя на поверхности планеты:

$$h(0) = 1, \quad v(0) = 0, \quad m(0) = 1.$$

Силы аэродинамического сопротивления и гравитации описаны следующими соотношениями:

$$D(h,v) = D_c v^2 e^{-h_c\left(\frac{h-h(0)}{h(0)}\right)};$$

$$D_c = \frac{1}{2} v_c \frac{m(0)}{g_0};$$

$$g(h) = g_0\left(\frac{h(0)}{h}\right)^2.$$

В рассматриваемом варианте модели $T_{\max} = 3.5$, $g_0 = 1$, $h_c = 500$, $v_c = 620$.

Целью задачи является максимизация высоты полета в конечный момент времени при выполнении терминального ограничения $m(t_f) = 0.6\, m(0)$. Управлением в задаче служит тяга $T(t)$. Наилучшее из известных [15] для данного варианта задачи значение функционала $h(t_f) = 1.01283$ при $t_f = 0.2$. С использованием разработанного программного комплекса было получено значение $h(t_f) = 1.0128385105$ при том же значении t_f. При этом $m(t_f) = 0.59995256$. Ход решения задачи представлен в табл. 2.

Таблица 2

Ход решения

p	iter	status	func
1.0e+00	1	FAIL	---
9.0e-01	1	FAIL	---
5.0e-01	207	OK	1.00877031e+00
6.0e-01	6	FAIL	---
5.5e-01	6	FAIL	---
5.2e-01	385	OK	1.00910663e+00
	... $\Delta p = 0.02$ ...		
6.0e-01	614	OK	1.01029028e+00
8.0e-01	6	FAIL	---
7.0e-01	6	FAIL	---
6.5e-01	1420	OK	1.01090051e+00
7.0e-01	474	OK	1.01142090e+00
7.5e-01	477	OK	1.01185959e+00
8.0e-01	539	OK	1.01221774e+00
1.0e+00	1207	OK	1.01283851e+00

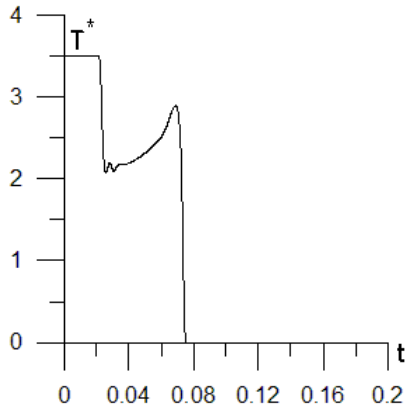


Рис. 3. Оптимальное управление

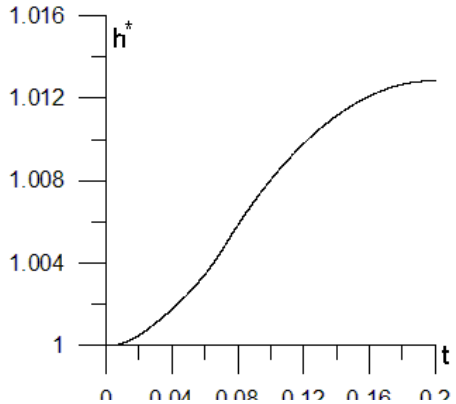


Рис. 4. Высота полета

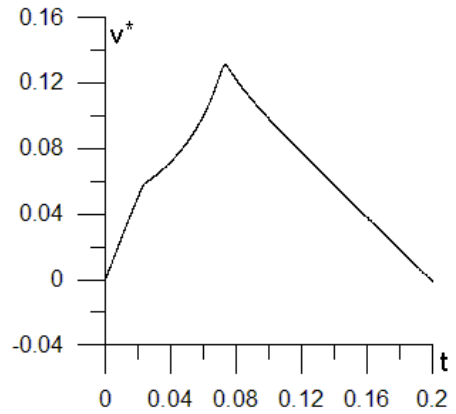


Рис. 5. Вертикальная скорость

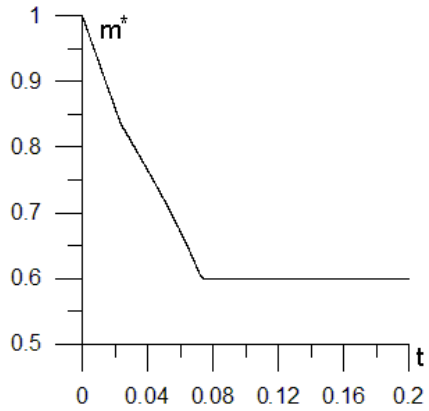


Рис. 6. Масса

Тест 1. Рассматривается следующая задача с вычислительной особенностью:

$$\dot{x}_1 = x_2 + u;$$

$$\dot{x}_2 = x_1 - u - \sqrt{x_1^2 - 0{,}5x_2^2};$$

$$x(0) = (1,1); \quad t \in [0, 4{,}5];$$

$$I(x,u) = x_1^2(4{,}5) + x_2^2(4{,}5) \to \min; \quad |u| \le 1.$$

Таблица 3

Ход решения

p	iter	status	func
1.0e+00	0	FAIL	---
9.0e-01	0	FAIL	---
5.0e-01	0	FAIL	---
2.0e-01	0	FAIL	---
1.0e-01	0	FAIL	---
5.0e-02	288	OK	2.58697778e+00
6.0e-02	190	OK	2.70532293e+00
8.0e-02	170	OK	2.94185493e+00
1.0e-01	56	OK	3.17688528e+00
2.0e-01	99	OK	4.26330488e+00
3.0e-01	25	OK	5.01861017e+00
4.0e-01	24	OK	5.23733782e+00
6.0e-01	25	OK	3.88349133e+00
8.0e-01	20	OK	1.31606934e+00
1.0e+00	0	FAIL	---
9.0e-01	39	OK	3.64299122e-01
1.0e+00	0	FAIL	---
8.5e-01	10	OK	7.78865339e-01
9.0e-01	15	OK	3.64298117e-01
9.5e-01	25	OK	1.00228124e-01
1.0e+00	0	FAIL	---
8.2e-01	57	OK	1.08869365e+00
8.4e-01	22	OK	8.77578446e-01
8.6e-01	0	OK	6.85094160e-01
8.8e-01	3	OK	5.13381862e-01
9.0e-01	11	OK	3.64302075e-01
9.2e-01	7	OK	2.39486692e-01
9.4e-01	26	OK	1.40087835e-01
9.6e-01	8	OK	6.69906622e-02
9.8e-01	20	OK	2.05868433e-02
1.0e+00	36	OK	8.24918442e-04

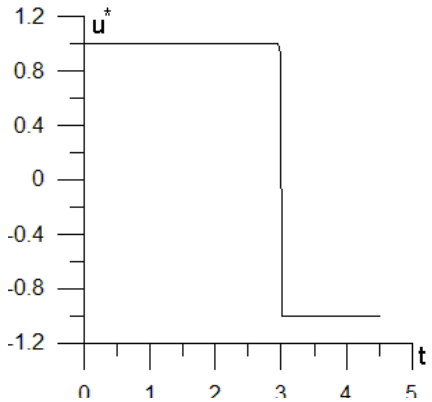


Рис. 7. Оптимальное управление

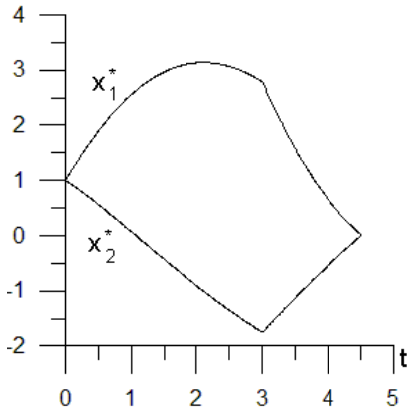


Рис. 8. Оптимальные траектории

Для данной тестовой задачи также удалось численно построить аппроксимацию множества достижимости [16], представленную на рис. 9. Зона, обозначенная на рисунке черным цветом, представляет собой проекцию на множество достижимости конечных значений траекторий, вызвавших аварийное завершение работы вычислительного модуля.

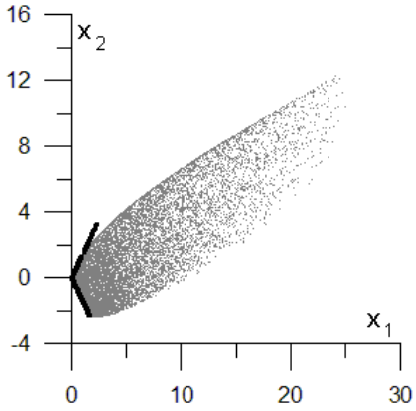


Рис. 9. Аппроксимация множества достижимости

Тест 2. Рассматривается следующая задача с вычислительной особенностью:

$$\dot{x}_1 = u;$$
$$\dot{x}_2 = (x_1 + u)\log_{10} x_1 + 0{,}01\,u^2;$$
$$x(0) = (0{,}5,\ 1);\quad t \in [\,0, 8\,];$$
$$I\,(x,u) = x_1^2(8) + x_2^2(8) \to \min;\ |u| \le 1\,.$$

Таблица 4

Ход решения

p	iter	status	func
1.0e+00	1	FAIL	---
9.0e-01	1	FAIL	---
5.0e-01	1	FAIL	---
2.0e-01	31	OK	7.65203828e-01
4.0e-01	56	OK	4.15927550e-01
6.0e-01	172	OK	1.80271517e-01
8.0e-01	129	OK	4.86802872e-02
1.0e+00	1	FAIL	---
9.0e-01	160	OK	1.67149870e-02
1.0e+00	86	OK	2.49783998e-03

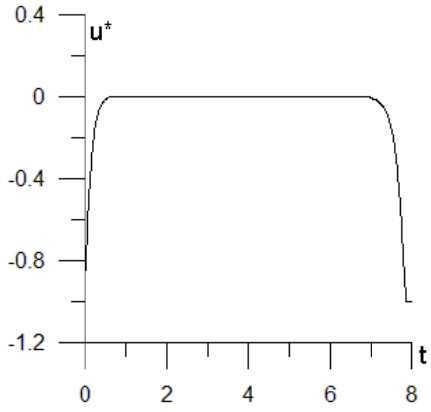


Рис. 10. Оптимальное управление

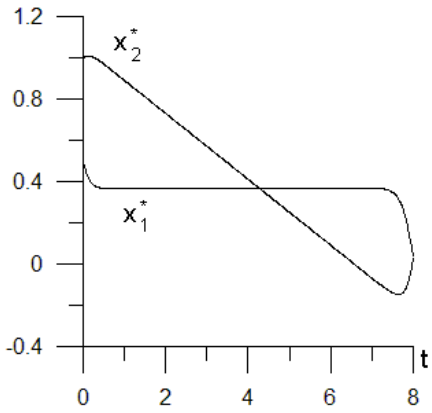


Рис. 11. Оптимальные траектории

Тест 3. Рассматривается следующая задача с вычислительной особенностью:

$$\dot{x}_1 = -1 - \arcsin(x_1 + x_2) + u + 5\sin(x_1 + x_2);$$
$$\dot{x}_2 = 1 + \arcsin(x_1 - x_2) - u + 0{,}2\cos(70x_1);$$
$$x(0) = (0,\ 0);\quad t \in [0,\ 1];$$
$$I(x,u) = \int_0^1 \left(x_1^2 + x_2^2 + u^2\right)dt \to \min;\ |u| \le 1.$$

Таблица 5

Ход решения

p	iter	status	func
1.0e+00	0	FAIL	---
9.0e-01	0	FAIL	---
5.0e-01	0	FAIL	---
2.0e-01	4	OK	6.17643374e-03
4.0e-01	6	OK	4.83438662e-02
6.0e-01	0	FAIL	---
5.0e-01	0	FAIL	---
4.5e-01	6	OK	7.00391487e-02
5.0e-01	9	OK	9.79215520e-02
5.5e-01	0	FAIL	---
4.2e-01	5	OK	5.63212164e-02
	... $\Delta p = 0.02$ ...		
5.2e-01	9	OK	1.10749299e-01
5.4e-01	0	FAIL	---
5.3e-01	9	OK	1.17449608e-01
5.4e-01	9	OK	1.24289867e-01
5.6e-01	0	FAIL	---
5.5e-01	9	OK	1.31217572e-01
5.6e-01	10	OK	1.38169273e-01
5.8e-01	0	FAIL	---
5.7e-01	12	OK	1.45076138e-01
5.8e-01	12	OK	1.51873350e-01
6.0e-01	0	FAIL	---
5.9e-01	13	OK	1.58509312e-01
6.0e-01	14	OK	1.64950292e-01
8.0e-01	0	FAIL	---
7.0e-01	0	FAIL	---
6.5e-01	0	FAIL	---
6.2e-01	25	OK	1.77184281e-01
	... $\Delta p = 0.02$ ...		
8.0e-01	23	OK	2.51808399e-01
1.0e+00	523	OK	3.00185318e-01

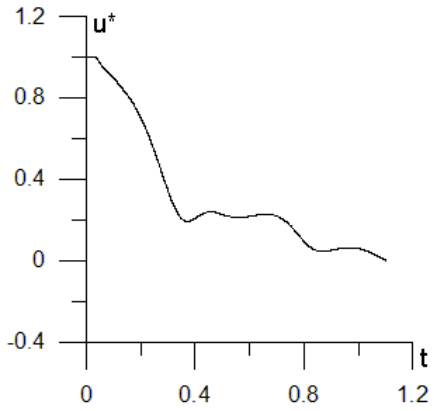


Рис. 12. Оптимальное управление

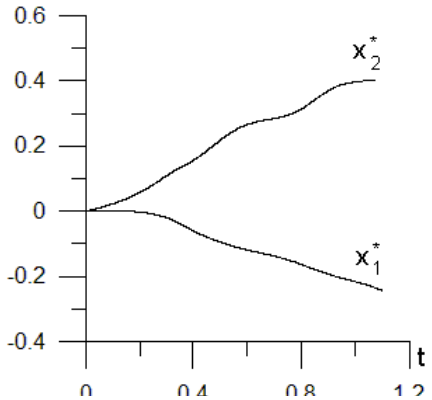


Рис. 13. Оптимальные траектории

Заключение. С помощью разработанной коллекция тестовых ЗОУВО удалось исследовать новый класс задач оптимального управления. Задачи, представленные в коллекции, в дальнейшем могут быть использованы при оценке возможностей различных комплексов программ для численного решения ЗОУ.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, проект № 09-07-00267; РГНФ, проект № 09-02-00650; СО РАН, междисциплинарный интеграционный проект № 4.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Федоренко, Р.П. Приближенное решение задач оптимального управления / Р.П. Федоренко. – М.: Наука, 1978. – 488 с.
2. Евтушенко, Ю.Г. Методы решения экстремальных задач и их применение в системах оптимизации / Ю.Г. Евтушенко. – М.: Наука, 1982. – 432 с.
3. Тятюшкин, А.И. Численные методы и программные средства оптимизации управляемых систем / А.И. Тятюшкин. – Новосибирск: Наука, 1992. – 193 с.
4. Горнов, А.Ю. Программный комплекс OPTCON для решения задач оптимального управления. Руководство пользователя / А.Ю. Горнов, А.О. Диваков. – Иркутск, 1990. – 36 с.
5. Маджара, Т.И. Подход к численному решению задач оптимального управления с вычислительными особенностями / Т.И. Маджара // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – ИрГУПС. – 2008. – № 3 (1). – С. 24–29.
6. Floudas, C.A. A Collection of Test Problems for Constrained Global Optimization Algorithms / C.A. Floudas, P.M. Pardalos. – Berlin: Springer-Verlag, 1990. – 180 p.
7. Schittkowski, K. Nonlinear Programming Codes / K. Schittkowski. – Berlin: Springer-Verlag, 1980. – 242 p.
8. Филиппов, А.Ф. Дифференциальные уравнения с разрывной правой частью / А.Ф. Филиппов. – М.: Наука, 1985.
9. Холодниок, М. Методы анализа нелинейных динамических моделей / М. Холодниок, А. Клич, М. Кубичек, М. Марек. – М.: Мир, 1991. – 368 с.
10. Частиков, А.П. Разработка экспертных систем. Среда CLIPS / А.П. Частиков, Т.А. Гаврилова, Д.Л. Белов. – СПб., 2003. – 608 с.
11. Поляк, Б.Т. Введение в оптимизацию / Б.Т. Поляк. – М.: Наука, 1983. – 382 с.
12. Моисеев, Н.Н. Элементы теории оптимальных систем / Н.Н. Моисеев. – М.: Наука, 1975.
13. Грачев, Н.И. Решение задач оптимального управления в системе ДИСО / Н.И. Грачев, А.Н. Фильков. – М., 1986. – 66 с. – (Препринт / ВЦ АН СССР).
14. Bryson, A.E. Dynamic Optimization / A.E. Bryson. – Addison-Wesley, 1999.
15. Dolan, E.D. Benchmarking Optimization Software with COPS 3.0 / E.D. Dolan, J.J. Moré, T.S. Munson // Technical Report ANL/MCS-TM-273. Argonne National Laboratory, Mathematics and Computer Science Division. – Lamont (USA), 2004.
16. Gornov, A.Yu. On a Class of Algorithms for Constructing Internal Estimates of Reachable Set / A.Yu. Gornov // Proc. of the Intern. Workshop DIC-98., Sept. 7–11, 1998. – Pereslavl-Zalessky, 1998. – P. 10–12.

Малтугуева Г.С., Юрин А.Ю. УДК 004.021

АЛГОРИТМ КОЛЛЕКТИВНОГО ВЫБОРА НА ОСНОВЕ ОБОБЩЕННЫХ РАНЖИРОВОК ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Введение. Многообразие сложных задач, связанных с необходимостью поддержки принятия решений, обуславливает необходимость разработки специализированного методологического и алгоритмического обеспечения, повышающего эффективность данного процесса. Сложность процесса поддержки возрастает, если он связан с коллективным (групповым) выбором.

Существует ряд подходов [1], позволяющих согласовать (обобщить) множество мнений, полученных в ходе коллегиального обсуждения, и выработать некое компромиссное решение, являющееся “групповым” или “коллективным” предпочтением – выражением мнения всех опрошенных (экспертов). Однако большинство данных методов для своего эффективного применения требуют определить наборы критериев оценивания, по которым каждым экспертом в отдельности проводится процедура многокритериального оценивания каждой альтернативы, что не всегда возможно по ряду причин, например, при наличии жестких временных ограничений, субъективизма и “особого” мнения экспертов при оценке альтернатив и выборе критериев оценивания.

В связи с этим большой интерес представляет разработка алгоритмов коллективного выбора (согласования), использующих субъективные предпочтения экспертов, выраженные в виде обобщенных ранжировок. Подобные алгоритмы («правило большинства», принцип Кондорсе, метод Борда) разработаны [2] и обеспечивают получение решений, однако при определенных наборах исходных данных приводят к возникновению парадоксов – ошибочных решений, когда результат согласования индивидуальных предпочтений не отражает мнение всего коллектива или же решение вообще не может быть найдено. В связи с этим является актуальной разработка алгоритмов, обеспечивающих получение корректных решений при коллективном выборе.

Целью данной работы является создание нового метода коллективного выбора, разрешающего большинство парадоксов, возникающих при использовании принципа Кондорсе и метода Борда [1, 2].

Применение данного метода предлагается рассмотреть на примере поддержки принятия решений комиссии по расследованию причин аварий, разработке мероприятий по восстановлению оборудования и исключению подобных аварий и инцидентов (т.е. по обеспечению надежной и безопасной эксплуатации). Деятельность подобных комиссий связана с коллегиальным обсуждением проблемы, выработкой набора решений, согласованием (обобщением) выработанных решений и принятием окончательного решения председателем комиссии.

1. Задача коллективного выбора. Задачу коллективного выбора можно сформулировать следующим образом [2]: пусть задано множество альтернатив $X = \{x_1, x_2, \ldots, x_n\}$, из элементов которого все члены коллектива, принимающего решение, должны составить свои предпочтения (упорядочить альтернативы по убыванию их предпочтительности), из которых формируется m-элементное множество ранжировок $S = \{S^1, S^2, \ldots, S^m\}$. Пусть индивидуальные предпочтения заданы обобщенными ранжировками

$$S^j = x_{i_1} Q_1^j x_{y_2} Q_2^j x_{i_3} Q_3^j \ldots Q_{n-1}^j x_{i_n},$$

где $j = \overline{1,m}$; $\forall \alpha = \overline{1,n-1}$; $Q_\alpha^j \in \{P^j, I^j\}$, P^j – отношение строгого предпочтения, I^j – отношение эквивалентности, таким образом, Q^j принимает значение либо строгого отношения предпочтения, либо эквивалентности. Требуется построить отношение коллективного предпочтения, т.е. отношение должно выражать мнение всего коллектива – быть компромиссным.

2. Алгоритм коллективного выбора на основе обобщенных ранжировок. Предлагается алгоритм коллективного выбора с использованием обобщенных ранжировок, разработанный на основе алгоритма автоматического сужения множества Парето для решения задач многокритериальной оптимизации [3].

Новый алгоритм обеспечивает согласование индивидуальных предпочтений коллектива экспертов. Индивидуальные предпочтения представлены в виде ранжировок альтернатив по степени их важности. При ранжировании эксперты руководствуются только единственным критерием, неявно обобщающим и интегрирующим все множество возможных критериев своим субъективным предпочтением.

При этом процесс согласования предпочтений экспертов можно представить в виде игры, в которой каждая альтернатива приводит сначала наиболее убежденных сторонников, затем менее убежденных и т.д. Альтернатива, постоянно уступающая в таких сравнениях, выбывает из борьбы. Выбытие альтернатив изменяет исходные ранжировки для каждой итерации, в результате чего выбывшие альтернативы либо усиливают позиции победивших, либо ослабляют их.

Входная информация об индивидуальных предпочтениях заносится в матрицу ранжировок S и матрицу эквивалентности D. Ниже приведен алгоритм коллективного выбора при описании индивидуальных предпочтений в виде ранжировок.

1. Заполнение в результате голосования матрицы ранжировок S, где S^j – ранжировка j-го эксперта, матрицы эквивалентности $D = (d_{ij}), i = \overline{1,n}$, $j = \overline{1,k}$, где

$$d_{ij} = \begin{cases} g - \text{номер группы} \\ \quad \text{эквивалентности} \\ \quad \text{для } j\text{-го эксперта,} \\ \quad \text{в которую входит } x_i; \\ 0 - \text{если } x_i \text{ не входит ни в одну группу.} \end{cases}$$

2. $t = 1, S_t = S, D_t = D$. Построим расширенную матрицу $\overline{S}$ следующим образом: к исходной матрице S применим преобразование Ψ, которое заключается в подсчете количества одинаковых ранжировок и записи этого числа в дополнительную $(n+1)$ строку матрицы S. Соответствующим образом изменится и матрица D.

3. Формирование матрицы приведенных номеров $E_t : e_{ij}$ – порядковый номер альтернативы x_i в ранжировке S^j.

4. Формирование матрицы S'_t по матрице E_t: в i-й строке и j-м столбце располагаются числа, соответствующие количеству экспертов, поставивших i-ю альтернативу на j-е место.

5. Если в матрице S'_t все элементы равны, то переход на 1 с рекомендацией изменения множества альтернатив (увеличение, сокращение) или ранжировок.

6. Формирование множества L_t, содержащего доминируемые альтернативы.

7. Если L_t – $(n-1)$-элементное множество, то переход на 12.

8. Если $L_t = L_{t-1}$, то переход на 11.

9. Из матрицы ранжировок S_t удаляются альтернативы, которые входят в L_t. Соответствующим образом преобразуется и матрица эквивалентности D_t.

10. $t = t+1$, переход на 3, предварительно применив к матрице S_t преобразование Ψ.

11. Применяем принцип Кондорсе на множестве оставшихся альтернатив с последующим переходом на 12.

12. Окончание работы.

Данный алгоритм представляет собой комбинацию нового принципа согласования и принципа Кондорсе и не позволяет решить задачи с равным количеством предпочтений, образующих цикл. Следует заметить, что с подобными задачами не справляется ни один из существующих методов. Однако в практических задачах подобное распределение голосов встречается редко. В качестве одного из вариантов разрешения данного парадокса предлагается пересмотреть и расширить множество альтернатив.

При решении задачи выбора из двух альтернатив данный способ согласования эквивалентен правилу большинства, но при выборе из трех и более альтернатив в значительной степени ориентирован на поиск компромисса [4].

Решение, найденное с помощью предлагаемого метода, удовлетворяет аксиомам Эрроу:

- транзитивности;
- единогласия (ненавязанности группового решения) – коллективный выбор в точности повторяет единогласное мнение экспертов;
- полноты – в процедуре сравнения принимают участие все альтернативы;
- парето-оптимальности – ни один из альтернативных вариантов не может быть улучшен без ухудшения других вариантов.

3. Применение нового алгоритма для поддержки принятия решений. Рассмотрим применение предлагаемого алгоритма для поддержки принятия решений при коллективном обсуждении и выборе альтернатив на примере работы комиссии по расследованию причин аварии, разработке мероприятий по восстановлению оборудования и обеспечению надежной и безопасной эксплуатации. Рассматриваемая авария была вызвана коррозионным растрескиванием гнутых труб реактора (калачей) [5]. Одна из задач комиссии состояла в разработке набора мероприятий по исключению или снижению скорости коррозионного растрескивания труб.

Комиссией из 20 человек был выработан набор из 6 ниже приведенных альтернатив (мероприятий), обеспечивающих снижение скорости коррозии при различных затратах.

1. Уменьшить уровень остаточных напряжений в гнутых трубах. Ориентировочная стоимость мероприятия 1 млн. руб. (цены условные). Снижение скорости коррозионного растрескивания, а значит, увеличение ресурса примерно в 8 раз.

2. Повысить качество подготовки теплоносителя (воды) за счет более тонкой химической очистки. Ориентировочная стоимость мероприятия – 400 тыс. руб. Снижение скорости коррозионного растрескивания, а значит, увеличение ресурса примерно в 7 раз.

3. Исключить подпитку теплоносителя оборотной водой. Ориентировочная стоимость мероприятия – 200 тыс. руб. Снижение скорости коррозионного растрескивания, а значит, увеличение ресурса примерно в 5 раз.

4. Пункты 1 и 2. Ориентировочная стоимость мероприятия – 1 млн. 400 тыс. руб. Значительное снижение скорости коррозионного растрескивания, а значит, увеличение ресурса примерно в 9 раз.

5. Пункты 1 и 3. Ориентировочная стоимость мероприятия – 1 млн. 200 тыс. руб. Значительное снижение скорости коррозионного растрескивания, а значит, увеличение ресурса примерно в 8 раз.

6. Пункты 1, 2 и 3, вместе взятые. Ориентировочная стоимость мероприятия 1 млн. 600 тыс. руб. Исключение коррозионного растрескивания. Увеличение срока службы реактора до 40 лет.

Хотя каждая из альтернатив (каждое отдельное мероприятие) характеризуется двумя критериями – стоимостью и увеличением ресурса, однако при выборе наилучшего из них каждый из экспертов руководствуется еще и собственными неявными критериями, которые в ряде случаев он затрудняется сформулировать. Подобные, неявные, критерии составляют часть личного, плохо поддающегося формализации, опыта каждого эксперта в отдельности. Именно поэтому задачу коллективного выбора предлагается решать с использованием нового метода с представлением индивидуальных предпочтений в виде обобщенных ранжировок.

В ходе обсуждения членами комиссии были сформулированы ранжировки альтернатив (табл. 1), символом « $\rightarrow$ » отмечено превосходство одной альтернативы над другой.

Рассмотрим применение принципа Кондорсе, метода Борда и нового метода применительно к данным ранжировкам.

Принцип Кондорсе. Принцип Кондорсе [2] заключается в попарном сравнении всех альтернатив, признается наилучшей альтернатива, которая превосходит все остальные. Поясним процедуру сравнения на следующем примере: сравним аль-

Таблица 1

Ранжировки альтернатив

Предпочтения (ранжировка альтернатив) экспертов	Количество ранжировок (количество экспертов, придерживающихся данного мнения)
R1: 6→5→4→1→2→3	1
R2: 5→4→1→2→3→6	2
R3: 4→1→2→3→5→6	4
R4: 5→1→3→2→4→6	2
R5: 1→2→3→4→5→6	1
R6: 3→2→1→4→5→6	10

тернативы 1 и 2.

Альтернатива 1 предпочтительнее, чем альтернатива 2, для 1+2+4+2+1=10 экспертов (R1, R2, R3, R4, R5).

Альтернатива 2 предпочтительнее, чем альтернатива 1, для 10 экспертов (R6).

Результат: альтернатива 1 эквивалентна альтернативе 2 (1~2).

Подобным образом происходит сравнение всех остальных альтернатив. Объединение всех 16 парных отношений предпочтения, полученных в результате попарного сравнения, приводит к получению нетранзитивного отношения предпочтения (парадокс Кондорсе): первая альтернатива эквивалентна второй и третьей (1~2,3), но это противоречит превосходству третьей альтернативы над второй (3 $\rightarrow$ 2).

Метод Борда. Согласно методу Борда [2] каждой альтернативе присваиваются баллы в зависимости от положения (места) в ранжировке: первая получает максимальное количество (в большинстве случаев оно равно количеству альтернатив), остальные по нисходящей. Далее происходит суммирование баллов каждой альтернативы по ранжировкам. Наилучшей альтернативе соответствует максимальная сумма баллов. Поясним процедуру вычисления суммы балов на примере альтернативы 1.

Итак, альтернативу 1 распределили (отнесли):

- на первое место – 1 эксперт (R5) => 6*1=6 баллов;
- на второе место – (4+2)=6 экспертов (R3, R4) => 5*(4+2)=30 баллов;
- на третье место – (2+10)=12 экспертов (R2, R6) => 4*(2+10)=48 баллов;
- на четвертое – 1 эксперт (R1) => 3*1=3 балла;
- на пятое и шестое место – ни одного эксперта => 2*0+1*0=0 баллов.

Далее просуммируем полученные баллы: 6+30+48+3+0=87.

Подобным образом происходит вычисление баллов всех остальных альтернатив. В результате применения метода получено следующее отношение группового предпочтения: $3 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6$, что неточно отражает мнение экспертов, так как 11 экспертов поместило альтернативу 2 на 2 место в (R5, R6), тогда как только 6 экспертов поместили альтернативу 1 на 2 место (R3, R4) (см. табл. 1). Следовательно, тернатива 2 должна быть предпочтительнее тернативы 1, что не отражено в отношении группового предпочтения, полученного при помощи метода Борда.

Новый метод. Поиск отношения группового предпочтения новым методом осуществляется в 5 итераций (количество итераций = количество альтернатив – 1). Подробно рассмотрим итерации 1 и 5, для итераций 2-4 приведем только результаты.

Итерация 1. На основании исходных ранжировок были сформированы матрицы ранжировок (S) и эквивалентности (D). В ранжировках использовано отношение строгого предпочтения, поэтому матрица эквивалентности является нулевой и в дальнейшем она рассматриваться не будет.

Сформируем матрицу ранжировок S_1, применив к данной матрице преобразование Ψ, получим

$$\overline{S_1} = \begin{pmatrix} 6 & 5 & 4 & 5 & 1 & 3 \\ 5 & 4 & 1 & 1 & 2 & 2 \\ 4 & 1 & 2 & 3 & 3 & 1 \\ 1 & 2 & 3 & 2 & 4 & 4 \\ 2 & 3 & 5 & 4 & 5 & 5 \\ 3 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 \\ 1 & 2 & 4 & 2 & 1 & 10 \end{pmatrix}.$$

По матрице ранжировок S_1 осуществляется построение матрицы приведенных номеров E_1: e_{ij} – порядковый номер альтернативы x_i в ранжировке S^j,

$$E_1 = \begin{pmatrix} 4 & 3 & 2 & 2 & 1 & 3 \\ 5 & 4 & 3 & 4 & 2 & 2 \\ 6 & 5 & 4 & 3 & 3 & 1 \\ 3 & 2 & 1 & 5 & 4 & 4 \\ 2 & 1 & 5 & 1 & 5 & 5 \\ 1 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 \\ 1 & 2 & 4 & 2 & 1 & 10 \end{pmatrix}.$$

Далее осуществляется построение матрицы S_1' по матрице E_1: в i-й строке и j-м столбце располагаются числа, соответствующие количеству экспертов, поставивших i-ю альтернативу на j-е место:

$$S_1' = \begin{pmatrix} 1 & 6 & 12 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 11 & 4 & 4 & 1 & 0 \\ 10 & 0 & 3 & 4 & 2 & 1 \\ 4 & 2 & 1 & 11 & 2 & 0 \\ 4 & 1 & 0 & 0 & 15 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 19 \end{pmatrix}.$$

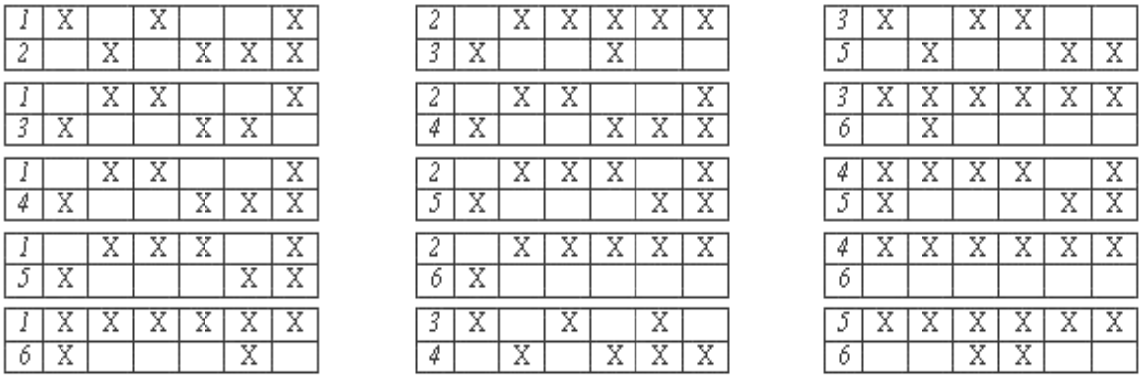


Рис. 1. Попарное сравнение альтернатив, итерация 1

Производится попарное сравнение строк матрицы S_1', соответствующих альтернативам (рис. 1), символом «X» обозначено превосходство одной альтернативы над другой.

По результатам сравнения на первой итерации из дальнейшего рассмотрения выбывает альтернатива 6, так как $1 \to 6$, $3 \to 6$, $5 \to 6$. Выбывшая альтернатива формирует множество доминируемых альтернатив $L_1 = \{6\}$.

Подобным образом осуществляются итерации 2, 3 и 4, результатом которых является расширение множества доминируемых альтернатив: $L_2 = \{5, 6\}$, $L_3 = \{4, 5, 6\}$ и $L_4 = \{1, 4, 5, 6\}$.

Итерация 5:

$$\overline{S}^5 = \begin{pmatrix} 2 & 3 \\ 3 & 2 \\ 8 & 12 \end{pmatrix}, \; E^5 = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 1 \\ 8 & 12 \end{pmatrix}, \; S_5' = \begin{pmatrix} 8 & 12 \\ 12 & 8 \end{pmatrix}.$$

Результат итерации 5: $3 \to 2$, следовательно, $L_5 = \{2, 1, 4, 5, 6\}$.

В результате работы алгоритма получим $3 \to 2 \to 1 \to 4 \to 5 \to 6$. Данное отношение группового предпочтения более точно по сравнению с принципом Кондорсе (который привел к возникновению нетранзитивного отношения предпочтения) и методом Борда ($3 \to 1 \to 2 \to 4 \to 5 \to 6$) отражает мнение всех членов экспертной комиссии и удовлетворяет требованиям полноты и единогласия.

Таким образом, наиболее целесообразным с точки зрения коллективного (группового) предпочтения экспертов комиссии является следующая альтернатива (мероприятие): “Исключить подпитку теплоносителя оборотной водой. Ориентировочная стоимость мероприятия 200 тыс. руб. Снижение скорости коррозионного растрескивания, а значит, увеличение ресурса примерно в 5 раз”.

Заключение. Рассмотрен новый метод коллективного выбора на основе обобщенных ранжировок, разрешающий большинство парадоксов, возникающих при использовании принципа Кондорсе и метода Борда. Приведен пример применения данного метода при поддержке принятия решений комиссии по расследованию причин, ликвидации последствий и предотвращению аварий и инцидентов.

Предлагаемый метод при его реализации в виде программного обеспечения позволит повысить эффективность процедуры коллективного выбора в системах поддержки принятия решений [6], предназначенных для обеспечения надежности и безопасности промышленных объектов, представляющих опасность для обслуживающего персонала и окружающей среды.

Необходимо отметить, что существуют наборы исходных данных (равное количество ранжировок, образующих цикл), при которых данный способ согласования не является решающим. В связи с этим данный метод может использоваться только в качестве средства поддержки принятия решений.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия отечественной науке.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Микони, С.В. Теории и практика рационального выбора / С.В. Микони. – М.: Маршрут, 2004.
2. Ларичев, О.И. Теория и методы принятия решений / О.И. Ларичев. – М.: Логос, 2000.
3. Васильев, С.Н. Методы и алгоритмы многокритериальной оптимизации на основе нестрогих ранжировок альтернатив по частным критериям и опыт компьютерной реализации / С.Н. Васильев, Ю.В. Котлов // Проблемы

управления и информатики. – 2006. – № 1-2. – С. 28-38.
4. Малтугуева, Г.С. Алгоритм группового выбора при описании индивидуальных предпочтений в виде ранжировок / Г.С. Малтугуева, Ю.В. Котлов // Вестник Томского гос. ун-та. – 2004. – № 9 (II). – С. 44-48.
5. Берман, А.Ф. Деградация механических систем / А.Ф. Берман. – Новосибирск: Наука, 1998.
6. Берман, А.Ф. Интеллектуальная система поддержки принятия решений при определении причин отказов и аварий в нефтехимической промышленности / А.Ф. Берман, О.А. Николайчук, А.И. Павлов, А.Ю. Юрин // Автоматизация в промышленности. – 2006. – № 6. – С. 15-17.

Опарин Г.А., Богданова В.Г., Макеева Н.Г. УДК 519.685

ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ СРЕДА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ СИСТЕМ БУЛЕВЫХ УРАВНЕНИЙ*

Введение. В настоящее время проявляется активный интерес к использованию высокопроизводительных кластеров для решения задачи выполнимости булевых ограничений, являющейся фундаментальной проблемой в математической логике и теории вычислений. Многие практические задачи могут быть сформулированы в терминах решения системы булевых уравнений. В последние годы наряду с существованием достаточно большого количества последовательных программ решения задачи булевой выполнимости, обладающей высокой вычислительной сложностью, наблюдается тенденция построения эффективных программ решения этой задачи с применением параллельных технологий, в частности, крупноблочного параллелизма. В качестве входного языка таких программ используется фрагмент международного формата DIMACS [1] представления булевых ограничений в виде конъюнктивной нормальной формы пропозициональной логики. Следует отметить, что средства автоматизации построения булевых моделей по содержательной (ориентированной на конечного пользователя) постановке задачи в этих программах отсутствуют. В большинстве существующих программ-решателей, использующих метод расщепления для крупноблочного распараллеливания булевых моделей, выбор тактики расщепления зависит от задачи и возлагается на пользователя. Таким образом, актуальной является проблема разработки принципиально новой интегрированной инструментальной среды, объединяющей решатели комбинаторных задач большой размерности в единую систему, позволяющую автоматизировать процесс построения булевой модели решаемой дискретной задачи, выбирать из базы знаний (исходя из свойств полученной модели и накопленной статистики решения задач) подходящий алгоритм решения, проводить вычислительный эксперимент как на автономной рабочей станции, так и на высокопроизводительном кластере, сохранять результаты расчетов в пользовательской базе данных, включать в базу знаний инструментальной среды новые модели и алгоритмы.

В статье рассматривается базовая технология моделирования [2] и проведения параллельных вычислений, используемая в инструментальном комплексе (ИК) РЕБУС, ориентированном на применении в фундаментальных и прикладных исследованиях при проведении вычислительных экспериментов в разнообразных предметных областях, где естественным образом возникают дискретные модели в виде систем булевых уравнений.

1. Постановка задачи. **Формально задача решения булевых уравнений формулируется следующим образом: пусть** $X = (x_1,...x_n)$ **– упорядоченное множество булевых переменных (**$x_i \in B_2$ **для всех** $i = \overline{1,n}$**;** $B_2 = \{0,1\}$**). Задано** m **булевых соотношений (система уравнений) вида**

* Работа выполнена при поддержке программы №1 фундаментальных исследований президиума РАН на 2009 год.

$$f_i(x_{i_1},...,x_{i_{k(i)}}) = 0\,, \qquad (1)$$

где f_i $(i = \overline{1,m})$ – произвольные булевы функции своих аргументов. Требуется найти одно, несколько или все решения системы (1) или установить ее несовместность.

Следует заметить, что первая NP-полная задача – задача "выполнимости КНФ" (задача булевой выполнимости или SAT задача) есть по существу задача распознавания совместности систем уравнений [3]

$$x_{i_1}^{\sigma_{i_1}} \vee ... \vee x_{i_{k(i)}}^{\sigma_{i_{k(i)}}} = 1 \ (\ i = 1,...,m\ ), \qquad (2)$$

где переменная

$$x_{i_p}^{\sigma_{i_p}} = \begin{cases} \overline{x_{i_p}} \text{ при } \sigma_{i_p} = 0, \\ x_{i_p} \text{ при } \sigma_{i_p} = 1, \end{cases} \quad p = \overline{1,k(i)}\,.$$

Двойственная к (2) система уравнений вида (1) записывается следующим образом:

$$\overline{x_{i_1}^{\sigma_{i_1}}} \wedge ... \wedge \overline{x_{i_{k(i)}}^{\sigma_{i_{k(i)}}}} = 0 \quad (i = 1,...,m\ ). \qquad (3)$$

Известно, что любая система вида (1) может быть представлена одним эквивалентным уравнением $f(x_1,...,x_n) = \bigcup_{i=1}^{m} f_i\left(x_{i_1},...,x_{i_{k(i)}}\right) = 0$. Поэтому далее будем рассматривать в основном одно стандартное уравнение

$$f(x_1,...,x_n) = 0\,. \qquad (4)$$

В рассматриваемой инструментальной среде алгоритмы решения булева уравнения (4), составляющие ее вычислительное ядро, ориентированы на часто встречающиеся в приложениях так называемые большие разреженные системы булевых уравнений, когда в (1) выполняется условие $m >> n >> k(i)$ (символом "$>>$" обозначено отношение "много больше"). В частности, для многих практических задач $k(i)$ принимает только два фиксированных значения: $k(i) = 2$ и $k(i) = p$ ($p > 2$), причем бинарных ограничений в системе (1) много больше, чем p-арных. Примерами таких систем являются полученные с помощью базовой технологии моделирования ИК РЕБУС булевы модели для решения ряда классических дискретных задач (задача об n-ферзях, раскраска графа, покрытие конечного множества системой его подмножеств, ход шахматного коня, задача о голубях и клетках), а также булевы модели для решения двух практических задач (равномерная загрузка локомотивного депо железной дороги, оперативный план отправления локомотивных бригад) [2, 4]. Алгоритмы решения систем булевых уравнений ИК РЕБУС разработаны на основе дискретного подхода и относятся к классу полных методов поиска с возвратом. Преимуществом первых двух алгоритмов является то, что они предназначены для решения уравнения (4), левая часть которого $f(x_1, x_2,..., x_n)$ представлена булевой формулой общего вида. Третий алгоритм разработан для решения частного случая уравнения (4), когда булева формула представлена в дизъюнктивной нормальной форме (система вида (3)). Алгоритмы используют метод интеллектуального возврата, статические и динамические стратегии для определения локальной несогласованности, схемы обратного просмотра, трехзначную и многозначную логику.

2. Технология автоматизации параллельных вычислений в ИК РЕБУС. **Методологической основой автоматизации проведения вычислительных экспериментов в области параллельного решения дискретных задач является использование подхода, базирующегося на знаниях. В связи с этим вопросы представления, накопления, модификации и использования знаний занимают центральное место в технологии, используемой ИК РЕБУС.**

Постановка задачи в виде системы ограничений привносит свою специфику в аппарат знаний. Эта специфика определяется следующими свойствами:

– расслоение знания, возникающее при формализации сложной предметной области. При параллельном программировании в булевых ограничениях естественным образом выделяется ряд тесно связанных слоев, представляющих: 1) булевы модели дискретных задач; 2) методы решения систем булевых уравнений, алгоритмы, разработанные на основе этих методов и программы, реализующие алгоритмы на одном из языков программирования; 3) спецификации параметров, модулей и операций, использующиеся для планирования вычислительного процесса в процедурной и непроцедурной постановках задач; 4) статистические данные, накапливаемые в результате проведения вычислительных экспериментов, и результаты их обработки;

– присутствие в предметной области как формализованных знаний (имеются ввиду булевы модели, методы и алгоритмы их решения), так и экспертных знаний (речь идет о выборе алгоритма и управляющих параметрах вычислительного эксперимента);

– разнообразие форм описания булевой модели (формулы алгебры логики, DIMACS формат и др.);

– высокая размерность вектора булевых переменных;

– сильная зависимость вычислительного алгоритма от представления булевой модели (структуры данных, которая ее характеризует).

Тесно связаны со спецификой предметной области требования к организации проведения вычислительного эксперимента, главными из которых являются:

– возможность автоматизации построения, редактирования булевой модели и преобразования этой модели из одной формы представления в другую;

– генерация программы-вычислителя булевой функции;

– наличие механизмов специфицирования составляющих программу-решатель модулей;

– наличие гибких управляющих программных структур реконфигурации программ-решателей;

– возможность включения новых алгоритмов, решателей и моделей;

– необходимость проведения быстрых расчетов в диалоговом режиме и ресурсоемких в автономном режиме;

– необходимость проведения многовариантных расчетов и средств их обеспечения (в виде пользовательских баз данных для хранения вариантов булевых моделей и результатов решения);

– наличие средств декомпозиции булевой модели, слияния и визуализации результатов для проведения параллельных вычислений.

Технология параллельных вычислений в ИК РЕБУС включает четыре этапа обработки информации: моделирование, декомпозиция булевой модели, проведение параллельных вычислений и обработку результатов. Первый, второй и четвертый этапы выполняются на рабочей станции, на третьем этапе строится план решения задачи, генерируется задание для проведения параллельных вычислений, которое передается в систему управления заданиями (СУПЗ) на кластер. Вычисления проводятся в узлах кластера, после чего результаты передаются на рабочую станцию.

Конечной целью первого этапа является получение булевой модели, которая может быть представлена как в формате DIMACS, так и на языке содержательных формулировок (ЯСФОР) [2] или в виде подпрограммы вычисления булевой функции. На этом этапе работы поддерживается принцип ориентации на пользователей различной квалификации. Учет квалификации пользователя осуществляется путем реализации различных режимов моделирования и разнообразия форматов представления булевой модели. На втором этапе производятся анализ и декомпозиция булевой модели. На третьем этапе проводится вычислительный эксперимент для выбранной модели с помощью подходящего для этой модели решателя согласно постановке задачи, указанной пользователем. Многообразие решателей с различными вычислительными характеристиками предусмотрено для поддержки принципа полноты функционального наполнения. Формат представления булевой модели является одним из условий выбора решателя. В качестве остальных условий могут быть заданы метод, алгоритм и вид постановки задачи. По этим условиям формируется запрос к базе знаний. Результатом запроса является список подходящих решателей, один из которых выбирается для выполнения. Результаты работы решателя подлежат постпроцессорной обработке на четвертом этапе, предусматривающем их анализ, визуализацию и сохранение в базе данных пользователя. Этот этап работы предназначен также для ввода, редактирования и обработки информации из базы знаний ИК РЕБУС. Возможность введения в базу знаний данных о новых содержательных формулировках, видах ограничений, решателях, вычислителях обеспечивает свойство расширяемости программного комплекса.

Технология построения булевых моделей обеспечивает простоту, ясность и выразительность интерфейса с пользователем и позволяет формализовать постановку задачи на содержательном уровне. Простой лаконичный язык ЯСФОР, предназначенный для декларативного описания булевых уравнений, обеспечивает возможность представления булевой модели в компактном виде наряду с эквивалентным представлением в международном формате DIMACS, принятым в качестве одного из выходных форматов ИК РЕБУС для совместимости с уже существующими программными средствами решения задач удовлетворения булевых ограничений (SAT-решателей). Компактная запись булевой модели повышает эффективность ее переноса на вычислительные узлы.

Для распараллеливания булевой модели наиболее предпочтительным с точки зрения решения уравнения (1) является метод расщепления, позволяющий выполнить декомпозицию уравнения (1) на произвольное число независимых уравнений, объединение решений которых даст решение исходного уравнения. Каждое независимое уравнение может решаться в своем вычислитель-

ном узле. Анализатор булевой модели выбирает тактику расщепления и генерирует схему расщепления, используемую для последующей декомпозиции этой модели.

Для проведения вычислений в узлах кластера используются решатели – вычислительные модули ИК РЕБУС. Три метода решения булевых уравнений, лежащие в основе этих модулей, показали сравнительно высокую эффективность на ряде классических и практических дискретных задач. Специфика этих методов заключается в ориентации на решение больших разреженных систем булевых уравнений, а в качестве преимущества первых двух методов следует отметить возможность представления левой части булева уравнения в общем виде в отличие от существующих SAT-решателей задач удовлетворения булевых ограничений, требующих соответствующего представления в конъюнктивной нормальной форме.

Параллельный исполнитель – подсистема вычислительного эксперимента ИК РЕБУС отвечает за проведение вычислений на кластере. ИК РЕБУС допускает две схемы проведения параллельных вычислений:

– генерация параллельной программы, использующей библиотеку MPI с последующим сохранением, компиляцией и выполнением этой программы на кластере;

– интеграция с ИК DISCOMP [5].

Обе схемы требуют средства интерактивного взаимодействия с кластером. В первом случае это взаимодействие обеспечивает ИК РЕБУС, использующий штатные средства системы управления заданиями кластера и утилиты удаленного доступа.

Во втором случае взаимодействие с кластером осуществляется средствами доступа ИК РЕБУС к программному интерфейсу XML-RPC ИК DISCOMP. В этом случае перед проведением вычислительного эксперимента требуется обеспечить формирование в рабочей области пользователя на кластере области расчетных данных, содержащей спецификации объектов проблемной области (ПО) и входные данные. Затем средствами интерфейса XML-RPC производится запуск вычислительного процесса. Мониторинг выполнения этого процесса, выявление его завершения и считывание результатов вычислений из области расчетных данных кластера в ИК РЕБУС также отслеживаются при помощи средств доступа к XML-RPC сервису. В этом случае на верхнем уровне абстракции вычислительная модель [6] ИК РЕБУС может быть представлена в виде двудольного графа $\langle P, O, E \rangle$, где доля P содержит множество параметров, доля O – множество операций ИК РЕБУС, а множество ребер E содержит направленные связи между параметрами и операциями. Списки параметров, операций и модулей хранятся в базе знаний ИК РЕБУС. В соответствии со спецификой решаемой задачи множество T допустимых типов параметров наряду с традиционными типами языков программирования дополнено специальным типом par – «параллельный список». Интерпретация операции $f : x \to y$, где x, y — параметры типа par, выполняется следующим образом: 1) в базе знаний осуществляется поиск всех вычислительных ресурсов (модуль + узел), реализующих операцию f; 2) организуется параллельное применение i-го параллельного ресурса к i-му элементу списка x; 3) результат применения присваивается i-му элементу списка y.

Интеграция с ИК DISCOMP требует по сравнению с первым случаем предварительных затрат на описание ПО, но зато имеет ряд преимуществ:

– возможность управления процессом вычислений на уровне паспорта задания;

– наличие протокола, упрощающего обеспечение автоматизации удаленного доступа к СУПЗ кластера из ИК РЕБУС;

– возможность использования разнородных дочерних узлов кластера.

Архитектура ИК РЕБУС, рассматриваемая ниже, разрабатывалась с учетом обеспечения возможности интегрированной работы с кластером.

3. Архитектура ИК РЕБУС. **В инструментальной среде ИК РЕБУС (рис. 1) можно выделить три основных компонента: систему моделирования, систему проведения вычислительного эксперимента, систему работы с базой знаний. Система моделирования включает инструментальные средства автоматизации построения булевых ограничений и расщепления булевой модели. Система вычислительного эксперимента содержит инструментарий для построения плана решения задачи, организации процесса решения (последовательного или параллельного проведения вычислений), визуализации результатов. Информация, необходимая для работы этих систем, содержится в базе знаний ИК РЕБУС. Система работы с базой знаний содержит три компонента: справочник (предоставление справочной информации по базе знаний в соответствии с правами пользователя в результате выполнения запроса или**

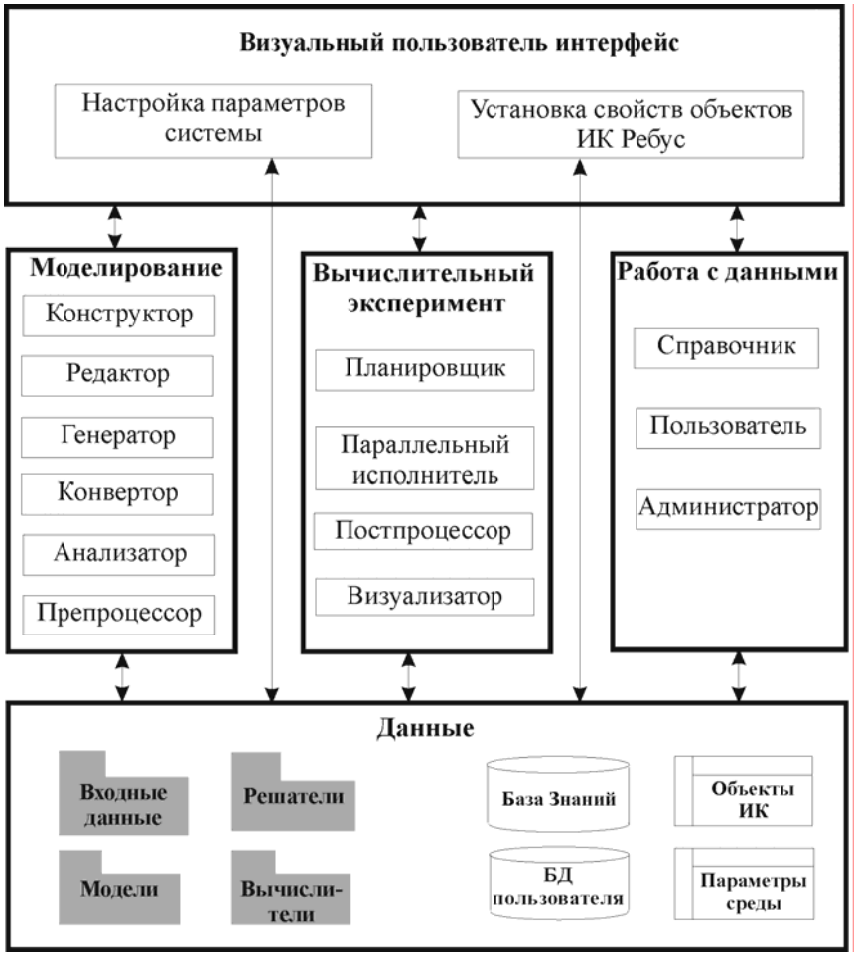


Рис. 1. Архитектура ИК РЕБУС

составления отчета); администратор (администрирование пользователей, работа с нормативно-справочной информацией и мониторинг системы); пользователь (просмотр разрешенных таблиц базы знаний и таблиц собственной базы данных, сохранение результатов).

Рассмотрим функциональные возможности тех компонентов ИК РЕБУС, которые отвечают за организацию параллельных вычислений: подсистемы расщепления модели, содержащей модули конвертирования, анализа и расщепления, подсистемы параллельного исполнителя, отвечающего за организацию интерактивного взаимодействия с кластером и подсистемы обработки результатов решения, содержащей модули постпроцессора, слияния и визуализации результатов работы.

Эти программные средства обеспечивают выполнение следующих функциональных возможностей:

– анализ структуры булевой модели;

– выбор тактики расщепления;

– формирование схемы расщепления;

– генерация паспортов параметров, операций ПО и схем решения задачи ;

– генерация паспорта задания для кластера;

– получение остаточной функции в узле в результате применения схемы расщепления к исходной функции;

– упрощение остаточной функции;

– параллельное решение полученных в результате расщепления подсистем булевых уравнений решателями вычислительного ядра ИК РЕБУС или внешними SAT-решателями, установленными в узлах кластера;

– слияние и визуализацию результатов решения;

– интерактивное взаимодействие с кластером.

Интерактивное взаимодействие ИК РЕБУС с кластером (рис. 2) как в случае генерации параллельной программы, так и в случае использования ИК DISCOMP, требует, во-первых, предварительного сохранения в рабочей области пользователя либо текста параллельной программы, либо спецификаций параметров, операций и схемы реше-

ния задачи в области расчетных данных для первого и второго случаев соответственно; во-вторых, формирования паспорта задания, содержащего перечень исполняемых программ, названия файлов с исходными данными и результатами работы, инструкции по выполнению программ, требования к ресурсам. Средства, поддерживающие эти функциональные требования, реализованы в параллельном исполнителе, являющемся компонентом системы проведения вычислительного эксперимента ИК РЕБУС.

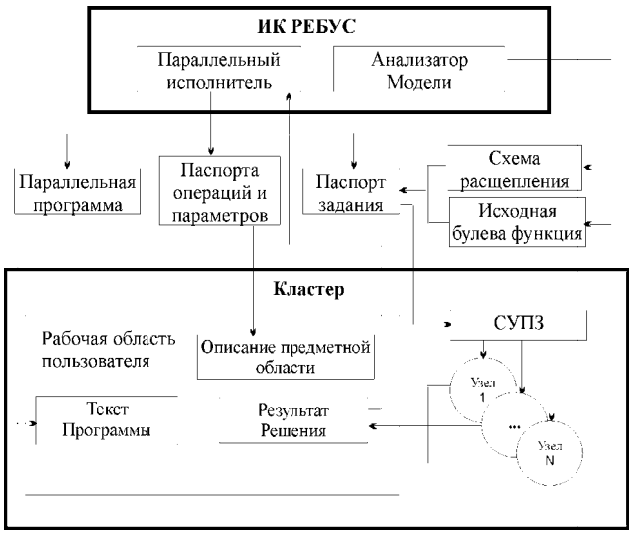


Рис. 2. Схема проведения параллельных вычислений в ИК РЕБУС

4. Пример применения технологии булева моделирования ИК РЕБУС для решения конкретной прикладной задачи. **Последнее десятилетие ознаменовалось широким внедрением вычислительной техники на железнодорожном транспорте и в локомотивном хозяйстве в частности. Наиболее важным для управления инфраструктурой локомотивного хозяйства является локомотивное депо, главной задачей которого является своевременная выдача локомотивов и локомотивных бригад под поезд [7]. От устойчивой работы локомотивного депо в значительной степени зависит устойчивая работа дороги в целом. Оперативное управление в эксплуатационном процессе локомотивного хозяйства на уровне депо начинается с составления графика оборота. Для этого используется информация о готовности моторвагонного подвижного состава, расписания движения поездов и информация об окне в поездном графике.**

Рассмотрим следующую производственную (но несколько упрощенную) постановку задачи планирования профилактического ремонта в железнодорожном депо. В состав железнодорожного узла входят m электричек, каждая укомплектована k вагонами. Общее число n вагонов железнодорожного узла равно $m \times k$. Каждый вагон по истечении определенного времени должен пройти профилактический ремонт в депо. Время отправки в ремонт зададим с помощью матрицы A, каждый элемент которой a_{ij} принимает значение из множества дискретных моментов времени $1,2,...,n$. Это означает, что если j-ый вагон будет включен в состав i-ой электрички и $a_{ij} = q$, то значение q – это время отправки в ремонт j-ого вагона i-ой электрички. Требуется составить план распределения вагонов по электричкам так, чтобы депо было загружено равномерно (т.е. в каждый момент дискретного времени в ремонтное депо поступает ровно один вагон из какой-либо электрички).

Представим план распределения вагонов по электричкам в виде булевой матрицы $X = \|x_{ij}\|$ размерности $m \times n$, где $x_{ij} = 1$, если j-ый вагон входит в i-ую электричку, $x_{ij} = 0$ в противном случае.

Тогда соответствующие постановке задачи булевы ограничения на элементы матрицы X имеют следующий вид:

– в каждой электричке должно быть ровно k вагонов, т.е. в строке матрицы X должно быть ровно k единиц:

$$\bigcup_{I} x_{i_1} \wedge x_{i_2} \wedge ... \wedge x_{i_{k+1}} \vee$$
$$\vee \bigcup_{I_1} \overline{x_{i_1}} \wedge \overline{x_{i_2}} \wedge ... \wedge \overline{x_{i_{n-k+1}}} = 0,$$

где условия формирования кортежей индексов I и $I1$ имеют вид

$$I = 1 \le i_1 < i_2 < ... < i_{k+1} \le n,$$
$$I_1 = 1 \le i_1 < i_2 < ... < i_{n-k+1} \le n;$$

– каждый вагон должен входить в состав только одной электрички, т.е. в каждом столбце матрицы X должна быть одна и только одна единица:

$$\bigcup_{i=1}^{m} \left(\bigcup_{j=1}^{n-1} \bigcup_{t=j+1}^{n} x_{ij} \wedge x_{it} \vee \bigcap_{j=1}^{n} \overline{x_{ij}} \right) = 0;$$

– в план должны быть выбраны вагоны со всеми возможными значениями времени ремонта,

т.е. множество $X_p = \{x_{ij} : a_{ij} = p\}$ содержит одну и только одну единицу. Пусть r_p – количество элементов в множестве X_p и пусть Y_p – это упорядоченное каким-либо образом множество X_p. Тогда соответствующее булево уравнение будет иметь вид

$$\bigcup_{p=1}^{n}\left[\bigcup_{i=1}^{r_p-1}\bigcup_{j=i+1}^{r_p} y_{pi} \wedge y_{pj} \vee \bigcap_{i=1}^{r_p}\overline{y_{pi}}\right] = 0.$$

Очевидно, что приведенные формулы позволяют получить булеву модель задачи в виде ДНФ или в двойственной ей КНФ, что позволяет применить для решения этой задачи не только решатели РЕБУС, но и любые известные SAT-решатели, ориентированные на формат DIMACS.

Заключение. **В целом применение указанных подходов к решению поставленной задачи обеспечивает создание программного комплекса со следующими функциональными возможностями: построение булевой модели (переход от вербального описания задачи к формальному в виде булева уравнения), распараллеливание булевой модели с использованием метода расщепления, обеспечение интерактивного взаимодействия с кластером, параллельное решение полученных в результате расщепления остаточных булевых уравнений, слияние и визуализация результатов решения. Представленная в данной статье инструментальная среда разработана на основе принципов создания многоплатформенных приложений, обеспечивающих переносимость на уровне исходного кода и использование приложений, разработанных для операционных систем Windows, Unix-подобных, MAC OS X, в качестве модулей. Вычислительные эксперименты проводились на "горизонтальном" и "вертикальном" кластерах ИДСТУ СО РАН под управлением соответственно ОС Windows и Linux и показали эффективность рассматриваемого подхода. Дальнейшее направление исследований связано с анализом накопленных статистических данных с целью определения оптимального числа узлов кластера и наиболее приемлемой тактики расщепления для конкретных практических дискретных задач [8].**

БИБЛИОГРАФИЯ

1. http://www.intellektik.informatik.tu-darmstadt.de/SATLIB/benchm.html.
2. Опарин, Г.А. Ребус – интеллектуальный решатель задач в булевых ограничениях / Г.А. Опарин, В.Г. Богданова // Вестник ТГУ. Приложение. – 2006. – №18. – С. 243-247.
3. Горшков, С.П. Применение теории NP-полных задач для оценки сложности решения систем булевых уравнений / С.П. Горшков // Обозрение прикладной и промышленной математики, серия дискретной математики. – 1995. – Т. 2, вып.3. – С. 325-398.
4. Опарин, Г.А. РЕБУС – интеллектуальный решатель комбинаторных задач в булевых ограничениях / Г.А. Опарин, В.Г. Богданова // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. – 2008. – Т. 6, вып. 1. – С. 60-68.
5. Васильев, С.Н. Интеллектуальные технологии и инструментальные средства создания вычислительной инфраструктуры в сети Интернет / С.Н. Васильев, Г.А. Опарин, А.Г. Феоктистов, И.А. Сидоров // Вычислительные технологии. Специальный выпуск. – 2006. – Т. 11. – С. 34-44.
6. Опарин, Г.А. Решение булевых уравнений большой размерности в распределенной вычислительной среде / Г.А. Опарин, А.Г. Феоктистов, В.Г. Богданова, А.П. Новопашин // Распределенные вычисления и Грид-технологии в науке и образовании (Дубна, 29 июня-2 июля 2004 г.). Труды Междунар. конф. – Дубна: ОИЯИ, 2004. – С. 164-169.
7. Автоматизированная система управления локомотивным хозяйством АСУТ / Под ред. д.т.н., профессора И.К. Лакина. – М.: ОЦВ, 2002. – 516 с.
8. Данцин, Е.Я. Алгоритмика задачи выполнимости / Е.Я. Данцин // Вопросы кибернетики. Проблемы сокращения перебора. – М.: АН СССР, 1987. – С. 7-29.

Сидоров И.А., Опарин Г.А., Феоктистов А.Г. УДК 519.68+004.272

ТЕХНОЛОГИЯ ОРГАНИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ИНСТРУМЕНТАЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ DISCOMP

Введение. Развитие технологий параллельного программирования привело к существенным изменениям архитектуры пакетов прикладных программ и, как следствие, к появлению новых требований к средствам описания и обработки схем решения задач со стороны конечных пользователей этих пакетов. Современные пакеты прикладных программ зачастую разрабатываются для работы в распределенной вычислительной среде (РВС). Такая среда состоит из вычислительных узлов, объединенных коммуникационной сетью. Вычислительный узел представляет собой программно-аппаратный ресурс, включающий модуль оперативной памяти, один или несколько процессоров, жесткий диск и системное программное обеспечение (комплекс программных средств, поддерживающих функционирование узла в РВС). Один из вычислительных узлов назначается главным узлом и наделяется функциями управления заданиями пользователей и ресурсами РВС.

В последнее время для решения ресурсоемких задач создаются различные распределенные и параллельные вычислительные среды (см., например, работы В.В. Абасова, В.С. Бурцева, В.А. Васенина, В.В. Воеводина, А.Б. Жижченко, В.Н. Коваленко, В.В. Корнеева, Д.А. Корягина, А.О. Лациса, А.П. Новопашина, В.В. Топоркова и др.). Однако массовое использование таких сред сдерживается рядом нерешенных до конца проблем взаимодействия конечного пользователя (специалиста-предметника) с высокопроизводительными вычислительными установками. В их числе сложность задания параллелизма алгоритма решаемой задачи, анализа результатов счета, управления распределенным процессом решения задачи и др.

Можно выделить два основных подхода к организации функционального наполнения пакета и решению прикладных задач в РВС.

1) Все вычислительные модули (прикладные программы пакета) находятся в одном узле РВС. По схеме решения задачи производится синтез целевой параллельной программы с последующей ее компиляцией и запуском на распределенной вычислительной установке.

2) Вычислительные модули размещаются в разных узлах РВС. Исполнение схемы решения задачи выполняется в режиме интерпретации.

В данной работе рассматриваются средства инструментального комплекса DISCOMP (DIStributed COmputing system of Modular Programming) для описания предметной области пакета прикладных программ и постановок исследовательских задач, а также способ выполнения схем решения задач в режиме интерпретации. Основные методологические принципы описания предметной области для распределенного пакета прикладных программ приведены в работе [1].

Инструментальный комплекс DISCOMP. Данный программный комплекс предназначен для инструментальной поддержки основных этапов разработки и применения пакетов прикладных программ, ориентированных на работу в гетерогенной (многоплатформенной) РВС, которая может включать вычислительные кластеры различных видов. РВС характеризуется следующими особенностями: в одном узле РВС может быть установлено несколько вычислительных модулей; допустимо включение в состав функционального наполнения пакета нетиражируемых вычислительных модулей, жестко привязанных к узлам РВС; построение схемы решения задачи осуществляется по процедурной постановке задачи [2]; в качестве входного языка для описания модели предметной области пакета и формирования постановок исследовательских задач используется метаязык XML; процессы решения задач в пакетах прикладных программ требуют проведения мно-

говариантных параллельных расчетов; повышение степени отказоустойчивости пакета при выполнении схемы решения задачи может быть достигнуто путем введения вычислительной избыточности (установкой всех вычислительных модулей в каждом узле РВС).

Перечисленные выше характеристики РВС требуют включения в инструментальный комплекс гибких средств управления вычислительными процессами и формирования набора ограничений для управляющих конструкций схемы решения задачи.

Способы формирования схемы решения задачи. В рамках нашего подхода функциональное наполнение пакета состоит из множества вычислительных модулей, размещенных в узлах РВС. Модуль реализуется в виде программы, исполняемой в пакетном режиме и снабженной спецификацией по ее назначению, применению, времени выполнения, формату входных и выходных данных (параметров). Спецификации модулей определяют зависимости по входным и выходным параметрам (формируют описание исследуемой предметной области).

Задание пользователя пакету представляется в виде схемы решения задачи, определяющей множества входных и выходных параметров задачи и порядок применения модулей, требуемых для нахождения искомых значений параметров по исходным данным. Вычислительный процесс (процесс интерпретации схемы решения задачи) предполагает выполнение ряда зависимых между собой подзадач (модулей). В этом случае сложность управления таким процессом в РВС значительно возрастает [3].

В пакетах, как правило, реализуются два основных вида постановки задачи: процедурная и непроцедурная. Планирование по непроцедурной постановке задачи вида «по заданным значениям параметров $x_1, x_2, \ldots, x_k$ вычислить значения параметров $y_1, y_2, \ldots, y_r$» позволяет автоматически получать схему решения задачи, не вдаваясь в понимание зависимостей между входящими в нее модулями. Такой способ построения схемы решения задачи подходит для пакетов с большим количеством параметров и модулей. Зачастую пакеты включают незначительное число модулей и предполагают строгую последовательность их выполнения. В этом случае постановка задачи в процедурном виде является более предпочтительной и обеспечивает пользователю возможность самостоятельно определять порядок вычислений в процессе решения задачи и использовать дополнительные конструкции языка управления заданием, которые сложно применять при планировании вычислений по непроцедурной постановке задачи.

Входной язык. В качестве входного языка для описания предметной области пакета используется метаязык XML [4], обеспечивающий представление структурированных данных в виде записей, списков и деревьев. Важной чертой XML является его расширяемость, позволяющая совершенствовать и дополнять входной язык новыми средствами и возможностями без потери совместимости с предыдущими версиями этого языка. Входной язык, разработанный на основе XML, позволяет различным распределенным системам обмениваться данными посредством общих структур и спецификаций. В силу ограниченности объема работы полное формальное описание входного языка не приводится, а его основные особенности иллюстрируются примерами спецификаций различных объектов предметной области.

Описание предметной области включает следующие основные секции: спецификации параметров, модулей и постановок задач. На рис. 1 приведен фрагмент описания предметной области, включающий спецификации трех параметров, двух модулей и одной постановки задачи.

В первой секции описываются все параметры, которые могут быть задействованы в процессе решения задачи. Каждый параметр снабжен набором атрибутов: уникальным идентификатором, концептуальным именем, типом и соответствующими типу атрибутами. К допустимым типам параметров относятся *файл* и *список файлов*. Дополнительным атрибутом параметра типа *файл* является имя файла на диске для этого параметра. Дополнительными атрибутами параметра типа *список файлов* являются число элементов списка и шаблон имен файлов на диске для этих элементов.

Секция <modules> содержит спецификации, определяющие назначение модуля, атрибуты (идентификатор, имя модуля), команды запуска, а также множество входных и выходных параметров.

В секции <processes> описываются различные схемы решения задач для заданной предметной области. Каждая схема задается в ярусной форме, определяющей последовательность выполнения модулей для вычисления требуемых параметров.

```
<!-- секция спецификаций параметров -->
<parameters>
        <param id='1' name='model' type='file'
        filename='model.txt'>
        <param id='2' name='model_list' type='filelist'
        pattern='model_element_%1.txt' size=’10’/>
        <param id='3' name='result_list' type='filelist'
        pattern='result_element_%1.txt' size=’10’/>
</parameters>
<!-- секция спецификаций модулей -->
<modules>
        <module id='1' name='decompose'>
            <commands os='Windows'>
                <start>decompose.exe</start>
            </commands>
            <parameters>
                <input><param id='1'/></input>
                <output><param id='2'/></output>
            </parameters>
        </module>
        <module id='2' name='solve'>
           <commands os='Linux'>
                <start>./solver (param_id:2)</start>
           </commands>
           <parameters>
                <input><param id='2'/></input>
                <output><param id='3'/></output>
            </parameters>
        </module>
</modules>
<!-- секция спецификаций постановок задач -->
<processes>
        <process>
            <stage>
                <module id='1'/>
            </stage>
            <stage>
                <module id='2' listParameterId='2'/>
            </stage>
        </process>
</processes>
```

Рис. 1. Фрагмент описания предметной области на языке XML

Управление вычислительным процессом. Подход к управлению вычислительным процессом в инструментальном комплексе DISCOMP базируется на механизмах обработки событий, возникающих при выполнении схемы решения задачи. Он включает две фазы: 1) применение операций, созданных пользователем пакета и предназначенных для обработки события и выбора нужного управления; 2) проверку корректности выбранного управления (контроль выполнения системы ограничений для интерпретатора схемы решения задачи в РВС) системными функциями пакета. Вызовы пользовательских операций реализуются в виде функций на языке JacaScript [5] и включаются в процедурную постановку задачи.

Спецификация каждого из ограничений интерпретатора схемы решения задачи включает: вид ограничения; способ его задания; уровни модели РВС, на которых осуществляется задание и контроль ограничения; наименование компонента РВС, контролирующего выполнение ограничения; формализованное представление ограничения; результат нарушения ограничения. Эти ограничения могут быть явными и неявными. Явные ограничения специфицируются пользователем при формировании постановки задачи или реализуются в рамках пользовательских операций. Неявные ограничения задаются при описании предметной области пакета или определяются программно-аппаратной средой, в которой функционирует пакет.

Множество неявных ограничений интерпретатора схемы решения задачи включает:

- ограничения на диапазоны значений параметров предметной области, определяемые типами этих параметров;
- условия допустимости выполнения схемы решения задачи;
- ограничения, определяемые системными характеристиками РВС: параметрами файловой системы, производительностью коммуникационной среды, количеством узлов и процессоров, тактовой частотой процессоров, объемами оперативной памяти и винчестеров и др.

Множество явных ограничений интерпретатора схемы решения задачи включает:

- размерность счетчиков циклических конструкций схемы решения задачи, время выполнения вычислительных модулей, время общего решения задачи;
- условия удовлетворения вычисляемых значений параметров качественным требованиям алгоритма решения задачи.

Спецификация схемы решения задачи включает управляющие конструкции для анализа текущего состояния и принятия решений о дальнейшем ходе вычислений. Применение таких конструкций основывается на системе событий, происходящих при обработке схемы решения задачи. К ним относятся:

beforeStart – готовность модуля к запуску;

onFinish – завершение работы модуля;

onFail – некорректное завершение работы модуля;

onStop – вынужденная остановка модуля;

onTimer – мониторинг результатов вычислений, выполняемый с определенным интервалом времени.

Разработчик пакета может самостоятельно определять функциональное наполнение для обработки происходящих в процессе вычислений событий. Такой обработчик реализуется в виде набора операторов на языке JavaScript. Язык JavaScript расширен программным интерфейсом DiscompAPI, позволяющий пользователю взаимодействовать с исполнительной подсистемой инструментального комплекса. Интерфейс DiscompAPI предоставляет следующие функциональные возможности: получение/изменение значений параметров, остановку/запуск процесса выполнения модуля (всех модулей на ярусе), передачу управления на нужный ярус. Корректность обработки событий средствами DiscompAPI обеспечивается ограничениями целостности, накладываемыми в процессе вычислений на отношения между объектами предметной области (параметрами, модулями, значениями параметров и др.).

На рис. 2 приведен пример описания условия остановки вычислений при обработке параметра типа список файлов.

После завершения каждого экземпляра модуля *module 2* запускается обработчик *checkListResult()*, который анализирует выходной элемент списка *param 3*. Если значение выходного элемента отлично от нуля, то производится остановка всех модулей на текущем ярусе, и вычислительный процесс завершается. Применение данной конструкции позволяет избегать избыточных вычислений при решении комбинаторных задач большой размерности, основным назначением которых является поиск результата, удовлетворяющего определенным условиям.

Следующий пример (рис. 3) иллюстрирует задание способа обработки события *onFinish* при параллельном запуске модулей, реализующих различные алгоритмы решения одной и той же задачи и идентичных по формату входных и выходных параметров. Применение подобной конструкции целесообразно в случае, если заведомо неизвестно, какой из алгоритмов будет наиболее эффективным для вычисления значений выходных параметров.

После завершения выполнения одного из модулей происходит событие *onFinish*, обработчик которого производит остановку остальных модулей. При таком подходе выполнение избыточных вычислений, во-первых, обеспечивает решение задачи за минимальное время, во-вторых, увеличивает степень отказоустойчивости вычислительного процесса. Данная постановка задачи эффективна только в том случае, если число доступных вычислительных узлов больше или равно количеству модулей.

```
<process>
    <stage>
        <module id='1'/>
    </stage>
    <stage>
        <module id='2' listParameter='2'
                    onFinish='checkListResult()'/>
    </stage>
</process>
<actions>
  function checkListResult()
  {
    var res = DiscompAPI.getModuleOuputParam();
    if ( res != 0 ) {
       DiscompAPI.stopCurrentStageModules();
    };
  };
</actions>
```

Рис. 2. Включение управляющих конструкций в схему решения задачи

```
<stage>
    <module id='1'
          onFinish='DiscompAPI.stopModules([2,3]);'>
    <module id='2'
          onFinish='DiscompAPI.stopModules([1,3]);'>
    <module id='3'
          onFinish='DiscompAPI.stopModules([1,2]);'>
</stage>
```

Рис. 3. Пример задания способа обработки события *onFinish*

Внутреннее представление описания предметной области. Транслятор инструментального комплекса DISCOMP переводит описание предметной области пакета во внутреннюю объектно-ориентированную структуру (рис. 4) и осуществляет проверку целостности модели данной предметной области.

Процесс трансляции во внутреннюю структуру включает в себя следующие этапы. Описание предметной области передается в качестве параметра методу *Init* объекта *Process*, который выполняет анализ всех структур, входящих в это описание, и производит разбор схемы решения задачи.

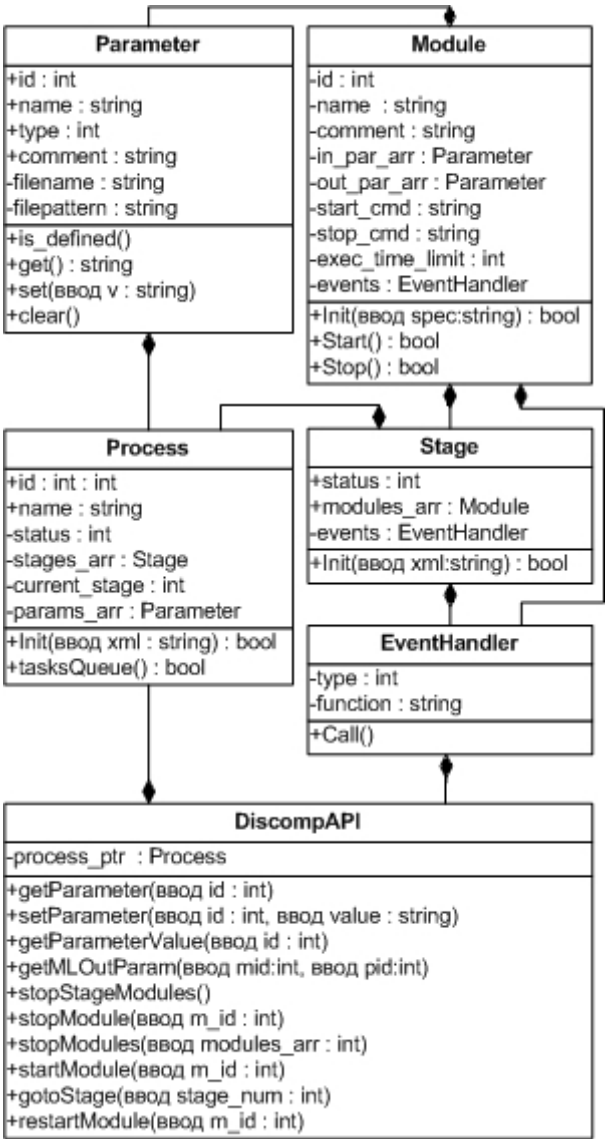


Рис. 4. UML-диаграмма классов объектов для внутреннего представления описания предметной области

Для каждого яруса схемы создается новый объект *Stage*, инициализируемый фрагментом спецификации. После инициализации каждый объект *Stage* добавляется в массив *stages_arr* объекта *Process*. Модули, которые должны быть выполнены на каждом ярусе, инициализируются по спецификациям, входящим в предметную область, и добавляются в массив *modules_arr* объекта *Stage*. Подобным образом инициализируются параметры для каждого из модулей.

Вычислительный процесс предполагает обработку всех ярусов (элементов массива *stages_arr* объекта *Process*) для данной схемы решения задачи. При обработке каждого яруса производится инициализация и запуск модулей на доступных узлах распределенной среды. После завершения выполнения всех модулей яруса (элементов массива *modules_arr* объекта *Stages*) производится переход к следующему ярусу и обработка схемы решения задачи продолжается.

Заключение. Характерными особенностями подхода к разработке пакетов прикладных программ, представленного в данной работе, являются: представление пакетных знаний на метаязыке XML; построение схемы решения задачи на основе процедурной постановки задачи; выполнение вычислительного процесса в режиме интерпретации; предоставление конечному пользователю программных средств управления процессом вычислений.

Инструментальный комплекс DISCOMP использован для создания ряда пакетов прикладных программ в гетерогенной многоплатформенной РВС [6–8]. Схемы решения задач в этих пакетах формируются с использованием описанных в статье языковых средств с применением различных конструкций управления вычислительным процессом.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 08-07-00163) и при частичной поддержке гранта Президента РФ НШ 1676.2008.1.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Опарин, Г.А. Инструментальная распределенная вычислительная САТУРН-среда / Г.А. Опарин, А.Г. Феоктистов // Программные продукты и системы. – 2002. – № 2. – С. 27–30.
2. Опарин, Г.А. САТУРН – метасистема для автоматизации конструирования и поддержки функционирования пакетов прикладных программ с автоматическим планированием вычислительного процесса / Г.А. Опарин, Д.Г. Феоктистов // Пакеты прикладных программ. Итоги и применения. – Новосибирск: Наука, 1986. – С. 12–21.
3. Гершуни, Д.С. Планирование вычислений в системах жесткого реального времени (обзор и перспективы) / Д.С. Гершуни // Вычислительная техника. Системы управления. – 1991. – Вып. 6. – С. 4–51.
4. Спенеср, П. XML проектирование и реализация / П. Спенеср. – Изд-во «Лори», 2001. – 510 с.
5. Пауэлл, Т. Полный справочник по JavaScript / Т. Пауэлл, Ф. Шнайдер. – М.: Вильямс, 2007. – 960 с.
6. Сидоров, И.А. Распределенная информационно-вычислительная среда модульного программирования / И.А. Сидоров, А.Г. Феоктистов, А.И. Тятюшкин // Параллельные вычисления и

задачи управления: Тр. III Междунар. конф. РАСО'2006. – М.: ИПУ РАН, 2006. – С. 505–521.
7. Заикин, О.С. Параллельная технология решения SAT-задач с применением пакета прикладных программ D-SAT / О.С. Заикин, А.А. Семенов, А.Г. Феоктистов, И.А. Сидоров // Вестник ТГУ. Приложение. – 2007. – № 23. – С. 83–95.
8. Опарин, Г.А. Интеллектуальный решатель задач в булевых ограничениях в распределенной вычислительной среде / Г.А. Опарин, В.Г. Богданова, И.А. Сидоров // Информационные и математические технологии в науке и управлении: Тр. XII Байкальской Всерос. конф. Ч. II. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2007. – С. 12–19.

Сурков А.В. УДК 517.929.4

ОПТИМАЛЬНОЕ ДЕМПФИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ СТАБИЛИЗАЦИИ И БЫСТРОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ*

1. Введение и постановка задачи. Пусть R^n – n-мерное векторное пространство с евклидовой нормой $\|\cdot\|$, C_τ – пространство всех непрерывных функций $\psi(\cdot)$, определенных на отрезке $[-\tau,0]$, со значениями в R^n с обычной sup-нормой $\|\cdot\|_C = \sup_{-\tau\le\theta\le 0}\|\psi(\theta)\|$.

Рассматривается управляемая система функционально-дифференциальных уравнений в векторной форме

$$\dot{x} = f(t, x_t, u), \qquad (1)$$

где $x_t(\cdot)\in C_\tau$ – непрерывная функция для каждого t, определяемая равенством $x_t(\theta) = x(t+\theta)$, $-\tau\le\theta\le 0$, $u = (u_1,\ldots,u_m)$ – вектор управления с ограничением $u\in U$ и $U\subset R^m$ – компактное множество, $f: R\times C_\tau\times U\to R^n$ – непрерывная функция.

Под решением $x(t)$ системы (1), соответствующим некоторому управлению $u(t,x_t)$ и удовлетворяющим начальному условию $x_{t_0} = \phi_0(\cdot)$, понимается решение в смысле Филиппова (см. [1]) или в смысле Айзермана–Пятницкого (см. [2]) системы, замкнутой относительно этого управления.

В данной работе исследуются задачи стабилизации и быстродействия применительно к системе (1). Исследование этих задач основывается на понятии управления оптимального по отношению к демпфированию некоторого функционала $V: R\times R^n\times C_\tau\to R$, который определяет в каком-то смысле расстояние от начального до желаемого состояния. Под оптимальным управлением относительно демпфирования функционала $V(t,\psi(0),\psi(\cdot))$ понимается такое управление, что этот функционал убывает наибольшим образом вдоль траектории, соответствующей этому управлению. Особенностью рассматриваемых функционалов является условие инвариантной дифференцируемости. Предположение об инвариантной дифференцируемости используется в определении оптимального управления относительно демпфирования функционала, что позволяет свести задачу стабилизации системы к рассмотрению вопросов устойчивости тривиального решения производного функционально-дифференциального включения и использовать существующие результаты для инвариантно-дифференцируемых функционалов Ляпунова. Здесь мы опираемся на теоремы [3, 4], где найдены условия асимптотической устойчивости тривиального решения функционально-дифференцильного включения. Также следует отметить, что результаты о стабилизации являются обобщением результатов,

* Работа выполнена при финансовой поддержке СО РАН (интеграционный проект № 85 и междисциплинарный интеграционный проект № 107).

полученных в [3, 4], где задача стабилизации была рассмотрена для автономных систем. Применительно к задаче быстродействия найдены условия на функционал $V(t,\psi(0),\psi(\cdot))$ такой, что управление, оптимальное по отношению к демпфированию, является оптимальным по быстродействию. Здесь мы следуем [5], где рассматривается задача быстродействия для дифференциальных уравнений без запаздывания.

2. Вспомогательные определения и утверждения. Для произвольной функции $\psi(\cdot)\in C_\tau$ и числа $\Delta>0$ через $E_\Delta(\psi(\cdot))$ обозначим множество всех непрерывных продолжений функции $\psi(\cdot)$ на отрезок $[-\tau,\Delta]$, т.е. множество функций $\Psi(s):[-\tau,\Delta]\to R^n$ таких, что $\Psi(s)=\psi(s)$ при $-\tau\le s\le 0$, $\Psi(s)$ непрерывна на $[0,\Delta]$.

Для функции $\Psi(\cdot)\in E_\Delta(\psi(\cdot))$ и числа $\xi\in[0,\Delta)$ через $\Psi_\xi(\theta)$ обозначим "сдвиг" функции $\Psi(\cdot)$ следующего вида:

$$\Psi_\xi(\theta)=\Psi(\xi+\theta),\ \text{где}\ -\tau\le\theta\le 0.$$

Следуя [6], введем следующие определения.

Определение 1. Функционал $W:C_\tau\to R^1$ имеет инвариантную производную $\partial_\psi W$ в точке $\psi(\cdot)\in C_\tau$, если для любой $\Psi(\cdot)\in E_\Delta(\psi(\cdot))$ функция $Y_\Psi(\xi)=W(\Psi_\xi(\cdot))$ имеет в нуле конечную правую производную $\partial Y_\Psi/\partial\xi|_{\xi=+0}$, инвариантную относительно функций $\Psi(\cdot)$, т.е. значение правой производной в нуле одно для всех $\Psi(\cdot)\in E_\Delta(\psi(\cdot))$.

Определение 2. Функционал $V:R^1\times R^n\times C_\tau\to R$ инвариантно непрерывен в точке $(t,x,\psi(\cdot))\in R^1\times R^n\times C_\tau$, если для каждой $\Psi(\cdot)\in E_\Delta(\psi(\cdot))$ функция $Y_\Psi(\zeta,z,\xi)=V(t+\zeta,x+z,\Psi_\xi(\cdot))$ непрерывна в нуле (непрерывность по ζ и ξ справа) и предельное значение $Y_\Psi(0,0,0)$ инвариантно относительно $\Psi(\cdot)$.

Определение 3. Функционал $V:R^1\times R^n\times C_\tau\to R$ инвариантно дифференцируем в точке $p=(t,x,\psi(\cdot))\in R^1\times R^n\times C_\tau$, если в этой точке существуют конечные $\partial V/\partial t,\nabla_x V,\partial_\psi V$ и для любой $\Psi(\cdot)\in E_\Delta(\psi(\cdot))$ выполняется равенство

$$V(t+\zeta,x+z,\Psi_\xi(\cdot))-V(t,x,\psi(\cdot))=$$
$$=\frac{\partial V[p]}{\partial t}\cdot\zeta+\langle\nabla_x V[p],z\rangle+\partial_\psi V[p]\cdot\xi+$$
$$+o\left(\sqrt{\|z\|^2+\zeta^2+\xi^2}\right)$$

при $z\in R^n$, $\xi\in[0,\Delta]$, $\zeta\ge 0$, причем $o(\cdot)$ зависит от выбора $\Psi(\cdot)\in E_\Delta(\psi(\cdot))$. Здесь $\nabla_x V$ – градиент функционала V по переменной x, $\langle\cdot,\cdot\rangle$ – знак скалярного произведения.

Замечание 1. Для того чтобы функцио-нал V был инвариантно дифференцируем в точке $p=(t,x,\psi(\cdot))$, необходимо, чтобы он имел в этой точке частные производные $\partial V/\partial t$, $\nabla_x V$, $\partial_\psi V$, и достаточно, чтобы они были инвариантно непрерывны в точке p (см. [6, с. 44]).

Определение 4. Верхняя $\dot V^*$ производная функционала $V(t,\psi(0),\psi(\cdot))$ в силу включения

$$\dot x\in F(t,x_t(\cdot))$$

определяется следующим равенством:

$$\dot V^*=\sup_{y\in F(t,\psi(\cdot))}\left(\frac{\partial V}{\partial t}+\langle\nabla_x V,y\rangle+\partial_\psi V\right)\Bigg|_{x=\psi(0)}.$$

3. Стабилизация.

Определение 5. Пусть $0\in U$ и $f(t,0,0)=0$ для всех t. Управление $u(t,\psi(\cdot))$ стабилизирует систему (1), если при подстановке в нее $u=u(t,\psi(\cdot))$ тривиальное решение (в смысле Филиппова или в смысле Айзермана–Пятницкого) этой системы асимптотически устойчиво.

Определение 6. Управление $u(t,\psi(\cdot))=(u_1,\dots,u_m)$ называется оптимальным по отношению к демпфированию функционала $V(t,\psi(0),\psi(\cdot))$, если этот функционал убывает вдоль решения $x=x(t,u)$, соответствующего этому управлению, наибольшим образом, т.е. полная производная функционала $V(t,\psi(0),\psi(\cdot))$ в силу системы (1), определяемая равенством

$$\frac{dV}{dt}=\frac{\partial V}{\partial t}+\langle\nabla_x V,f(t,\psi(\cdot),u)\rangle+\partial_\psi V(t,\psi(0),\psi(\cdot)),$$

при каждых фиксированных $(t,\psi(\cdot))$ достигает своего минимума на множестве U.

Теорема 1. *Пусть $f(t,0,0)=0$, $0\in U$ и существует положительно определенный, имеющий бесконечно малый высший предел и инвариантно дифференцируемый функционал $V(t,\psi(0),\psi(\cdot))$ такой, что частные производные $\partial V/\partial t$, $\nabla_x V$, $\partial_\psi V$ непрерывны. Предположим, что для всех t выполняется неравенство*

$\partial V/\partial t + \partial_\psi V(t,0,0) \le 0$ *и для любых* $(t,\psi(\cdot))$, $\left(\|\psi(\cdot)\|_C < \delta\right)$ *существует* $u \in U$ *такое, что*

$$\frac{dV}{dt}(t,\psi(0),\psi(\cdot),u) \le -\omega\left(\|\psi(\cdot)\|_C\right). \qquad (2)$$

Тогда любое управление $u(t,\psi(\cdot))$ со свойством $u(t,0)=0$, оптимальное по отношению к демпфированию функционала $V(t,\psi(0),\psi(\cdot))$, стабилизирует систему (1).

Доказательство. Пусть $U(t,\psi(\cdot))$ – множество всех $u \in U$, для которых выполняется неравенство (2). Очевидно, что $U(t,\psi(\cdot))$ содержит все управления $u(t,\psi(\cdot))$, оптимальные по отношению к демпфированию функционала $V(t,\psi(0),\psi(\cdot))$.

Многозначное отображение $(t,\psi(\cdot)) \to U(t,\psi(\cdot))$ имеет замкнутый график. В самом деле, это должно означать, что из условий $(t_n,\psi_n(\cdot)) \to (t,\psi(\cdot))$, $u_n \to u$, $u_n \in U(t_n,\psi_n(\cdot))$ следует, что $u \in U(t,\psi(\cdot))$, т.е. для $(t,\psi(\cdot))$ и u должно выполняться неравенство (2). Функция dV/dt непрерывна, так как $f(t,\psi(\cdot),u)$ и частные производные $\partial V/\partial t$, $\nabla_x V$, $\partial_\psi V$ непрерывны. Это, в свою очередь, означает, что неравенство (2) сохраняется при предельном переходе и, значит, отображение $(t,\psi(\cdot)) \to U(t,\psi(\cdot))$ имеет замкнутый график. Следовательно, оно полунепрерывно сверху как замкнутое многозначное отображение в компактное множество (см. [7, с. 117]).

В соответствии с [8, с. 47] многозначное отображение $(t,\psi(\cdot)) \to f(t,\psi(\cdot),U(t,\psi(\cdot)))$ полунепрерывно сверху как суперпозиция непрерывной и полунепрерывной сверху функций. Тогда многозначное отображение $F_1(t,\psi(\cdot)) = \mathrm{cof}(t,\psi(\cdot),U(t,\psi(\cdot)))$ также полунепрерывно сверху.

Рассмотрим функционально-дифференциальное включение

$$\dot{x} \in F_1(t,x_t(\cdot)). \qquad (3)$$

Так как по условию теоремы $\partial V/\partial t + \partial_\psi V(t,0,0) \le 0$, то $0 \in U(t,0)$ и, очевидно, $0 \in F_1(t,0)$. В силу неравенства (2) для включения (3) выполняется условие $\dot{V}^* \le -\omega\left(\|\psi(\cdot)\|_C\right)$ и в соответствии с теоремой 3 из [4] решение $x(t) \equiv 0$ включения (3) асимптотически устойчиво.

Возьмем произвольное управление $u(t,\psi(\cdot)) \in U(t,\psi(\cdot))$, оптимальное по отношению к демпфированию функционала $V(t,\psi(0),\psi(\cdot))$, такое, что $u(t,0)=0$. Утверждение теоремы будет верным, если решение задачи

$$\dot{x} = f(t,x_t(\cdot),u(t,x_t(\cdot))) \qquad (4)$$

понимать как в смысле Филиппова, так и в смысле Айзермана–Пятницкого, а именно:

1. Пусть многозначное отображение $F_2(t,\psi(\cdot))$ является результатом замыкания графика отображения $f(t,\psi(\cdot),u(t,\psi(\cdot)))$ и овыпукливания значений полученного при этом многозначного отображения (доопределение в смысле Филиппова). Под решением (4) понимаем решение функционально-дифференциального включения

$$\dot{x} \in F_2(t,x_t(\cdot)). \qquad (5)$$

2. Пусть многозначное отображение $F_3(t,\psi(\cdot))$ получено овыпукливанием значений многозначного отображения $f(t,\psi(\cdot),\widetilde{U}_1(t,\psi(\cdot)),\ldots,\widetilde{U}_m(t,\psi(\cdot)))$, где $\widetilde{U}_i(t,\psi(\cdot))$ для каждого $i=1,\ldots,m$ – отрезок числовой прямой, содержащий все предельные значения функции $u_i(t',\psi'(\cdot))$ в точке $(t,\psi(\cdot))$, включая и ее значение в этой точке (доопределение в смысле Айзермана–Пятницкого). Под решением задачи (4) понимаем решение функционально-дифференциального включения

$$\dot{x} \in F_3(t,x_t(\cdot)). \qquad (6)$$

Отметим, что решения включений (5) и (6) существуют и являются одновременно решениями включения (3) и поэтому любое управление $u(t,x_t(\cdot)) \in U(t,x_t(\cdot))$ со свойством $u(t,0)=0$, оптимальное по отношению к демпфированию функционала $V(t,\psi(0),\psi(\cdot))$, стабилизирует систему (4).

4. Быстродействие.

Определение 7. Управление $u=(u_1,\ldots,u_m)$ называется оптимальным по быстродействию, если среди всех управлений, переводящих систему (1) из начального состояния (t_0,x_{t_0}) на множество $D^0 = R^1 \times D$ ($D \subset C_\tau$ – компактное множество), оно доставляет времени перехода $T = t_1 - t_0$ наименьшее возможное значение.

Теорема 2. *Пусть управление* $u(t,\psi(\cdot))$ *является оптимальным по отношению к демпфированию функционала* $V(t,\psi(0),\psi(\cdot)) \ge 0$ *такого, что* $V(t,\psi(0),\psi(\cdot)) = 0 \Leftrightarrow (t,\psi(\cdot)) \in D^0$, *и при этом управлении* $dV/dt = -1$. *Тогда управление* $u(t,\psi(\cdot))$ *оптимально по быстродействию.*

Доказательство. Покажем, что управление $u(t,x_t)$ переводит систему из состояния (t_0,x_{t_0}) на множество D^0 за некоторое время t_1. По условию теоремы вдоль траектории $x(t)$, соответствующей управлению u, имеет место равенство $dV/dt=-1$. Интегрируя его по t, получаем $V(t,x,x_t(\cdot))=V(t_0,x_{t_0}(0),x_{t_0})+t_0-t$. Так как функционал $V(t,\psi(0),\psi(\cdot))$ не принимает отрицательных значений и только на множестве D^0 обращается в нуль, то существует такой момент времени $t_1=t_0+V(t_0,x_{t_0}(0),x_{t_0})$, что $x(t_1)\in D^0$.

Пусть время $T=t_1-t_0=V(t_0,x_{t_0}(0),x_{t_0})$ не оптимально по быстродействию. Тогда существует управление $\widetilde{u}\in U$, переводящее точку (t,x_{t_0}) на множество D^0 за время $T^*=t_1^*-t_0$, причем $T^*<T$. Так как управление $u(t,x_t)$ оптимально по отношению к демпфированию функционала $V(t,x,x_t(\cdot))$, то для любого другого управления $\widetilde{u}$ и соответствующего ему движения $\widetilde{x}(t)$ имеет место $dV/dt=-1+\alpha(t)$, где $\alpha(t)\ge 0$ – функция, заданная при $t\in[t_0,t_1^*]$. Интегрируя последнее неравенство, получаем

$$-V(t_0,x_{t_0}(0),x_{t_0})=-(t_1^*-t_0)+\int_{t_0}^{t_1^*}\alpha(\tau)d\tau.$$

Откуда

$$T^*-T=\int_{t_0}^{t_1^*}\alpha(\tau)d\tau\ge 0.$$

Это противоречит предположению $T^*<T$, и значит, управление $u(t,x_t)$ оптимально по быстродействию.

5. Пример управляемой системы. Рассмотрим управляемую систему ($n=1$)

$$\dot{x}=-Hu,$$

где $H>0$, u – управление с ограничением $|u|\le 1$. Пусть $W:R^1\times C_\tau\to R$ – инвариантно-дифференцируемый функционал и

$$V=\frac{1}{2}W^2.$$

Производная функционала V вдоль решений определяется равенством

$$\dot{V}=V_x'(-Hu)+\partial_\psi V=W_x'W(-Hu)+\partial_\psi W\cdot W=(-W_x'Hu+\partial_\psi W)W.$$

Найдем управление u, оптимальное по отношению к демпфированию функционала V. Если $W>0$, тогда $\min\limits_u\dot{V}=\min\limits_u(-W_x'Hu+\partial_\psi W)$ и, очевидно, минимум достигается при $u=\operatorname{sgn}W_x'$. Если $W<0$, тогда $\min\limits_u\dot{V}=\max\limits_u(-W_x'Hu+\partial_\psi W)$ и, очевидно, минимум достигается при $u=-\operatorname{sgn}W_x'$. Тогда управление $u=\operatorname{sgn}W_x'W$ является оптимальным по отношению к демпфированию функционала V.

Если $W=\psi(0)+W_1(\psi(\cdot))$, где $W_1:C_\tau\to R$ – функционал, имеющий инвариантную производную, то $W_x'=1$ и $u=\operatorname{sgn}W$. Таким образом, управление имеет множество точек разрыва

$$D=\{(t,\psi(\cdot)):W(\psi(0),\psi(\cdot))=0\}.$$

Пусть функционал W_1 определяется равенством

$$W_1=-b\int_{-\tau}^{0}\psi(s)ds,$$

где $b>0$. Будем рассматривать функционал W на множестве функций, ограниченных константой $M>0$.

Покажем, что существует скалярная неубывающая непрерывная функция $\omega(z)\ge 0$ при $z\ge 0$ такая, что $\omega(z)=0$ тогда и только тогда, когда $z=0$, и такая, что $\dot{V}\le-\omega\left(\|\psi(\cdot)\|_C\right)$:

$$\dot{V}=(-H\cdot\operatorname{sgn}W-b(\psi(0)-\psi(-\tau))\cdot W=$$
$$=|W|(-H-b(\psi(0)-\psi(-\tau))\operatorname{sgn}W)\le$$
$$\le|W|\left(-H+2b\|\psi(\cdot)\|_C\right)\le$$
$$\le(1+b\tau)\|\psi(\cdot)\|_C\left(-H+2b\|\psi(\cdot)\|_C\right)=$$
$$=-\omega\left(\|\psi(\cdot)\|_C\right).$$

Если $b<H/2M$, то $\omega\left(\|\psi(\cdot)\|_C\right)\ge 0$ и $\omega\left(\|\psi(\cdot)\|_C\right)=0\Leftrightarrow\|\psi(\cdot)\|_C=0$. Функция $\omega\left(\|\psi(\cdot)\|_C\right)$ – неубывающая, если

$$\omega'\left(\|\psi(\cdot)\|_C\right)=-4b(1+b\tau)\|\psi(\cdot)\|_C+H(1+b\tau)>0.$$

Это неравенство выполнено при $b<H/4M$. Таким образом, при $b<H/4M$ управление $u=\operatorname{sgn}W$, оптимальное по отношению к демпфированию функционала V, стабилизирует управляемую систему на множестве D.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Филиппов, А.Ф. Дифференциальные уравнения с разрывной правой частью / А.Ф. Филиппов. – М.: Наука, 1985. – 223 с.
2. Айзерман, М.А. Основы теории разрывных систем. I, II / М.А. Айзерман, Е.С. Пятницкий // Автоматика и телемеханика. – 1974. – № 7. – С. 33–47; № 8. – С. 39–61.
3. Сурков, А.В. О стабилизации управляемых систем с запаздыванием с использованием инвариантно дифференцируемых функционалов Ляпунова / А.В. Сурков, И.А. Финогенко // Методы оптимизации и их приложения: Тр. XII Байкальской междунар. школы-семинара. – 2005. – С. 195–200.
4. Сурков, А.В. Об устойчивости функционально-дифференциальных включений с использованием инвариантно дифференцируемых функционалов Ляпунова / А.В. Сурков // Дифференциальные уравнения. – 2007. – Т. 43, № 8. – С. 1055–1063.
5. Зубов, В.И. Теория уравнения управляемого движения / В.И. Зубов. – Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1980. – 287 с.
6. Ким, А.В. i-Гладкий анализ и функционально дифференциальные уравнения / А.В. Ким. – Екатеринбург: УрО РАН, 1996. – 234 с.
7. Обен, Ж.-П. Прикладной нелинейный анализ / Ж.-П. Обен, И. Экланд. – М.: Мир, 1988. – 512 с.
8. Борисович, Ю.Г. Введение в теорию многозначных отображений и дифференциальных включений / Ю.Г. Борисович, Б.Д. Гельман, А.Д. Мышкис, В.В. Обуховский. – М.: КомКнига, 2005. – 216 с.

Тятюшкин А.И., Моржин О.В.

УДК 517.977

МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ И ПРОГРАММНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Введение. Методы поиска оптимального управления обычно строятся таким образом, чтобы прямые ограничения на управление выполнялись на всех итерациях метода, а выполнение заданных ограничений на траекторию достигается с некоторой точностью в ходе итерационного процесса решения задачи. Поэтому на первых итерациях численного метода обычно ищется допустимое относительно ограничений, заданных на траекторию системы, решение, после чего осуществляется переход к минимизации целевого функционала. Наиболее простой способ поиска допустимого в указанном смысле управления состоит в формировании штрафного функционала, составленного из нарушенных условий, и в его минимизации вместо исходного функционала на первом этапе работы метода. Этот способ можно применять и в качестве проверочного, но чаще всего он применяется для поиска начального приближения, с которого затем стартуют более точные методы решения краевой задачи. Заметим, что эта идеология применяется при численном решении и других классов задач оптимизации, например, в методах линейного программирования.

Следующий практический прием вхождения в «эффективное поле» итерационного метода заключается в следующем. При создании нового файла данных для другой задачи можно использовать один из старых файлов, заменив в нем только изменившиеся данные, соответствующие новой задаче. При этом многие из ранее подобранных параметров алгоритмов оптимизации сохранят свои значения, и только часть настроечных параметров потребует изменения своих значений. Для этого лучше взять набор параметров с данными задачи, «родственной» к решаемой, решение которой получено достаточно успешно. Это существенно облегчит проблему подбора настроечных параметров, которые применяются в процессе решения задачи, и, следовательно, в какой-то мере определит успех в нахождении более точного численного решения. При этом следует обратить внимание на отличительные особенности новой задачи и учесть их при задании новых параметров. Ко-

нечно, задать параметры, совершенно адекватные новой задаче, сразу вряд ли удастся, но в качестве первого приближения они могут оказаться вполне подходящими. Заметим, что на практике способ, связанный с частичным изменением файла данных, успешно применяется при решении серии однотипных задач и является вполне естественным при проведении многовариантных расчетов, когда модель задачи остается неизменной, а изменяются только отдельные входные данные задачи.

1. Постановка задачи. Рассмотрим задачу оптимального управления с подвижными левым и правым концом и с фазовыми ограничениями, а также с параметрами в начальных условиях и в правых частях управляемой системы:

$$\dot{x} = f(x,u,w,t),\ x(t_0) = \Theta(v), \qquad (1)$$

$$x(t) \in E^n,\ u(t) \in E^r,\ t \in T = [t_0, t_1],$$

$$w \in R^v,\ v \in R^n.$$

На правом конце траектории и в процессе движения по ней зададим ограничения типа равенств

$$I_i(u) = h_i(x(t_1)) = 0,\ i = \overline{1,m}, \qquad (2)$$

$$J_i(u,v) = g_i(x(t),t) = 0,\ t \in T,\ i = \overline{1,s}. \qquad (3)$$

Управление и параметры подчиним двухсторонним ограничениям:

$$u^H(t) \le u(t) \le u^B(t),\quad t \in T, \qquad (4)$$

$$v^H \le v \le v^B,\quad w^H \le w \le w^B, \qquad (5)$$

где $\Theta(v)$ – непрерывно дифференцируемая вектор-функция, определяющая зависимость начальных условий от параметров, а относительно функций, задающих условия (1)-(3), справедливы стандартные предположения о их гладкости, к которым добавляется также их непрерывная дифференцируемость по параметрам.

Требуется среди управлений и параметров, удовлетворяющих ограничениям (4)-(5), найти такие, которые обеспечивают выполнение условий (3) для управляемого процесса (1) и приводят его в точку фазового пространства, где с заданной точностью будут выполнены условия (2) и функционал

$$I_0(u) = \varphi(x(t_1))$$

достигнет наименьшего значения.

2. Структура программной системы. Сложная программная система, в частности, пакет для решения задач оптимального управления, имеет свое поле эффективной работы, которое, как правило, характеризуется классом решаемых системой задач и арсеналом применяемых ею методов. Однако структурные особенности программной системы, взаимосвязь и соответствие приближенных методов, применяемых на разных этапах поиска численного решения, а также способность системы самостоятельно конструировать путь поиска решения в зависимости от выявленных особенностей решаемой задачи выгодно отличают программную систему от теоретически описанного класса задач и набора методов для поиска их решения. Иерархическая структура вычислительной схемы и соответствующая композиция методов, применяемых на всех уровнях поиска численного решения, являются основными характеристиками эффективной программной системы.

Программная система с хорошим уровнем интеллекта кроме широкого спектра методов, как правило, содержит много различных эвристик и логических алгоритмов для анализа сложившихся ситуаций, которые позволяют продолжить поиск оптимального управления и даже при прекращении сходимости какого-то метода. В этом случае может произойти переход либо к другому методу, либо – к подпрограмме, которая с помощью двойственного метода вычислит оптимальную оценку невязки выполнения условий оптимальности. Для дальнейшей оптимизации программа может выбрать более подходящий алгоритм или, как, например, в задачах линейного программирования, перейти к обновлению базиса, чтобы избавиться от ошибок округления, накопившихся в ходе выполнения большого количества итераций.

Отличительной особенностью развитой программной системы является также ее иерархическая структура. Например, структура алгоритмического наполнения пакета КОНУС [1] представляется в виде трехуровневой системы. Первый уровень составляют методы линейного программирования и метод приведенного градиента, ориентированные на решение задач большой размерности с блочной структурой матрицы линейных ограничений. Здесь реализованы эффективные алгоритмы построения начального приближения, алгоритмы факторизации обратной матрицы и различные способы компактного хранения информации. Эти алгоритмы учитывают особенности матрицы ограничений задачи при выполнении всех операций, чтобы обеспечить устойчивую работу метода оптимизации для получения оптимального решения за конечное число итераций. Алгоритмическое и программное обеспечение первого уровня является фундаментом для построения эффективных вычислительных схем и успешной работы методов нелинейной оптимизации на втором уровне системы.

Второй уровень содержит численные методы оптимизации для решения нелинейных задач. Основными методами здесь являются метод линеаризации и метод спроектированного лагранжиана. В отличие от классического метода линеаризации метод спроектированного лагранжиана лучше учитывает ограничения и, следовательно, имеет более широкую область сходимости. На каждой итерации этого метода строится линейная система ограничений с матрицей коэффициентов, являющейся якобианом исходной нелинейной системы, вычисленной на управлении и траектории предыдущей итерации метода. На втором уровне системы в итерационном процессе оптимизации управления методами первого порядка последовательно вычисляются градиенты целевого функционала, которые используются для построения направления спуска к минимуму. После выполнения достаточного количества итераций накапливается информация для приближенного вычисления матрицы вторых производных – гессиана целевой функции. Наличие аппроксимации гессиана открывает возможность для конструирования алгоритма второго порядка – квазиньютоновского метода, привлекательным свойством которого является квадратичная скорость сходимости. Максимальный порядок матрицы Гессе определяет объем памяти, выделяемой для хранения приближенной матрицы вторых производных, которая используется квазиньютоновским методом. Когда в процессе решения задачи текущий размер пространства оптимизации будет меньше указанного значения, будет работать квазиньютоновский метод. Преимуществом этого метода является не только квадратичная скорость его сходимости, но и способность вычисления решения с высокой точностью.

На третьем уровне программной системы производится вычисление производных правых частей управляемой системы (якобиана) и формирование задачи минимизации нелинейного функционала с линейной системой ограничений. Здесь используется информация о производных правых частей системы и функций, задающих терминальные условия и фазовые ограничения.

3. Построение аппроксимирующей задачи. **Для построения аппроксимирующей задачи на заданном интервале T вводится сетка дискретизации с узлами $t_0, t^1, ..., t^N$ (она может быть и неравномерной) такими, что**

$$t_0 = t^0 < t^1 < ... < t^N = t_1. \qquad (6)$$

Управляющие функции $u^i(t)$, $i = \overline{1,r}$, ищутся пакетом только в узлах (6), а для получения промежуточных значений $u^i(t)$, $i = \overline{1,r}$, используется либо кусочно-постоянная $u^i(t) = u^i(t^j) = u^i_j$, $t \in [t^j, t^{j+1}]$, либо кусочно-линейная аппроксимация

$$u^i(t) = \frac{(t^{j+1} - t)u_j + (t - t^j)u_{j+1}}{t^{j+1} - t^j}, \qquad (7)$$
$$t \in [t^j, t^{j+1}].$$

Тогда конечномерная задача, аппроксимирующая непрерывную задачу, будет иметь следующий вид:

$$\dot{x} = f(x,u,w,t),\ x(t_0) = \Theta(v),\ t \in T,$$
$$h_i(x(t^N)) = 0,\ i = \overline{1,m},$$
$$g_i(x(t^j), t^j) = 0,\ i = \overline{1,s},\ j = \overline{0,N},$$
$$v^H \le v \le v^B,\ w^H \le w \le w^B,$$
$$\varphi(x(t^N)) \to \min,\ u^H_j \le u_j \le u^B_j,\ j = \overline{0,N}. \qquad (8)$$

Заметим, что в аппроксимирующей задаче (8) управляемый процесс (1) остается непрерывным, а в процессе счета он с требуемой точностью (достаточно высокой) моделируется численным методом интегрирования.

4. Метод приведенного градиента. *Линеаризация ограничений. Расчет якобиана.* Линеаризуем ограничения (8) в аппроксимирующей задаче. Матрицу-якобиан линеаризованных ограничений составим из градиентов ∇I_i, $i = \overline{1,m}$, и $\nabla J_j(t)$, $j = \overline{1,s}$, $t \in T$, вычисленных по традиционной схеме [2] через решения сопряженных систем. Так как правые части и начальные условия системы (1) зависят еще и от параметров, то необходимо иметь также градиенты функционалов I_i, $i = \overline{1,m}$, и $J_j(t)$, $j = \overline{1,s}$, $t \in T$, по этим параметрам:

$$\nabla_v I_i(u^k, w^k, v^k) = -\psi_i'(t_0)\Theta_v(v^k),$$
$$\nabla_w I_i(u^k, w^k, v^k) = \qquad (9)$$
$$= -\int_{t_0}^{t_1} \psi_i'(t) f_w(x^k, u^k, w^k, t)dt,\ i = \overline{1,m},$$

$$\nabla_w J_i(u^k, w^k, v^k, t^j) = \qquad (10)$$
$$= -\int_{t_0}^{t_1} \Phi_i'(t) f_w(x^k, u^k, w^k, t)dt,$$

$$\nabla_v J_i(u^k, w^k, v^k, t^j) = -\Phi_i'(t_0)\Theta(v^k), \qquad (11)$$

$$i=\overline{1,s},\ j=\overline{1,N},$$

где $\psi_i(t)$ и $\Phi_i(t)$ – соответствующие решения сопряженных систем.

Пусть теперь на *k*-й итерации внешнего метода спроектированного лагранжиана найдено $u^k(t^j)$ и ему соответствующая траектория $x^k(t^j)$, $j=\overline{1,N}$. Для расчета градиентов по управлению $\nabla_u I_i$, $i=\overline{1,m}$, сопряженная система *m* раз интегрируется от t_1 до t_0 с разными начальными условиями. Попутно вычисляются градиенты (9) с использованием квадратурных формул для расчета интегралов.

Далее ищутся градиенты функционалов $J_i(t^j)$, $j=\overline{1,N}$, $i=\overline{1,s}$. При этом *s* раз решается задача Коши для каждого узла сетки (6) (всего *sN* раз). Из полученных значений градиентов по управлению и вычисленных по формулам (9)-(11) градиентов по параметрам составляется матрица коэффициентов линеаризованных ограничений специальной блочной структуры.

Теперь с помощью вычисленных градиентов линеаризуем ограничения (2)-(3) на *k*-м приближении:

$$I^k+\sum_{j=0}^{N}\nabla_u I^k(t^j)'(u_j-u_j^k)+ +\nabla_w I^k(t^j)'(w-w^k)+ +\nabla_v I^k(t^j)'(v-v^k)=0, \tag{12}$$

$$J_j^k+\sum_{i=0}^{j}\left[\nabla_u J^k(t^i)'(u_i-u_i^k)+ +\nabla_w J^k(t^j)'(w-w^k)+ +\nabla_v I^k(t^j)'(v-v^k)\right]=0,\quad j=\overline{0,N}. \tag{13}$$

Следовательно, имеем *m* ограничений (12) и $(N+1)s$ ограничений (13), которые представляют собой явную форму (через u,w,v) линеаризованных (h^L,g_j^L) ограничений (2)-(3), причем вместо равенств (3), заданных для каждого момента $t\in T$, имеем N равенств, определенных в узлах сетки (6). Прямые ограничения на управление и параметры оставим без изменений.

Далее для конечномерной задачи (8) сконструируем модифицированную функцию Лагранжа следующего вида:

$$L=\varphi(x^N)-\lambda^{k\prime}\left[h(x(t^N))-\bar{h}^L\right]+ +\frac{\rho}{2}\left[h(x(t^N))-\bar{h}^L\right]'\left[h(x(t^N))-\bar{h}^L\right]- -\sum_{j=0}^{N}\mu_j^{k\prime}\left[g(x(t^j),t^j)-\bar{g}^L\right]+ +\frac{\rho}{2}\sum_{j=0}^{N}\left[g(x(t^j),t^j)-\bar{g}^L\right]'\times \times\left[g(x(t^j),t^j)-\bar{g}^L\right], \tag{14}$$

где

$$\bar{h}^L=h(x^k(t^N))+ +h_x(x^k(t^N))(x(t^N)-x^k(t^N)),$$

$$\bar{g}^L=g(x^k(t^j),t^j)+ +g_x(x^k(t^j),t^j)(x(t^j)-x^k(t^j)),\quad j=\overline{0,N}.$$

Минимизация функции (14) при линейных ограничениях (12)-(13) является вспомогательной задачей, которая решается на каждом шаге метода спроектированного лагранжиана. Для решения вспомогательной задачи применяется метод приведенного градиента [3], который является обобщением симплекс-метода на случай нелинейной целевой функции.

5. Метод спроектированного лагранжиана. Этот метод применяется для итерационного поиска решения исходной задачи оптимального управления (1)-(5) с нелинейными ограничениями. Основные операции метода состоят в следующем.

1. С заданным управлением u_j^k, $j=\overline{0,N}$, интегрируется система (1) и в узлах сетки (6) запоминаются точки фазовой траектории x_j^k, $j=\overline{0,N}$. Здесь k – номер итерации (первый раз $k=0$). На полученном решении рассчитаем линеаризованные ограничения вида (12)-(13) и затем сконструируем вспомогательную задачу (12)-(14).

2. Методом приведенного градиента решается вспомогательная задача минимизации модифицированной функции Лагранжа (14) при линейных ограничениях (12)-(13). В результате будут найдены новые приближения: для управления u_j^{k+1}, $j=\overline{0,N}$, параметров w^{k+1} и v^{k+1}, а также для двойственных переменных и λ^{k+1} и μ_j^{k+1}, $j=\overline{0,N}$.

3. Проверяется критерий окончания итерационного процесса, как по прямым, так и по двойственным переменным. При нарушении хотя бы

одного из критериев выполняется новая $(k+1)$-я итерация с п. 1. Если для заданного $\varepsilon > 0$ критерий окончания итерационного процесса выполнен, то найденные при этом u_j^{k+1}, $j = \overline{0, N}$, w^{k+1} и v^{k+1} выдаются в качестве приближенного решения задачи оптимального управления.

Заключение. **Рассматриваемая в данной статье вычислительная технология применялась при решении ряда прикладных задач оптимального управления:**

– в расчетах предельных режимов работы систем электроэнергетики,

– в расчетах управлений (на математических моделях) для ориентации и стабилизации движения космических аппаратов [3],

– для различных целей управления ракетами класса «воздух-воздух» [4].

В практических задачах оптимального управления причиной прекращения сходимости часто является особенность вычислительной схемы метода, в соответствии с которой последовательные приближения конструируются из управлений, принимающих только граничные значения. К таким методам можно отнести популярные алгоритмы, основанные на принципе максимума, или, например, метод проекции градиента. Одним из способов восстановления сходимости является переход к другому алгоритму, в котором последовательные приближения могут принимать внутренние относительно заданных ограничений значения. Другой способ восстановления сходимости состоит в том, что к имеющимся ограничениям на модуль управления добавляется ограничение на скорость изменения управления, что, конечно, сужает класс допустимых управлений, но нередко избавляет от проявления ложного численного эффекта. При умеренных ограничениях на скорость изменения управления часто удается обеспечить более устойчивую сходимость к оптимальному решению. Практика показывает, что несмотря на существенное различие в графиках управлений, найденных без ограничения на скорость, и управлений, вычисленных при наличии ограничений, соответствующие им оптимальные значения функционала почти совпадают. Однако сходимость к оптимальному решению во втором случае более устойчива, поэтому для практики можно рекомендовать применение ограничений на скорость изменения управления (аналог регуляризации), а для установления их величины можно провести дополнительные расчеты.

В заключение отметим, что описанная программная система послужила основой для построения множеств достижимости и трубок разрешимости для трехмерных моделей управления движением [5]. Она является также главной вычислительной процедурой в алгоритме расчета управления с обратной связью, основанном на методе динамического программирования [6].

Работа первого автора выполнена при финансовой поддержке программы Президента РФ «Государственная поддержка ведущих научных школ» (проект НШ-1676.2008.1), второго – РФФИ (проекты 08-01-00945-а, 09-01-90203-Монг-а), РГНФ (проект 09-02-00493-а) и Бурятского госуниверситета (грант молодым ученым, 2008 – 2009).

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Тятюшкин, А.И. ППП КОНУС для оптимизации непрерывных управляемых систем / А.И. Тятюшкин // Пакеты прикладных программ: Опыт использования. – М.: Наука, 1989. – С. 63–83.
2. Тятюшкин, А.И. Численные методы решения задач оптимального управления с ограничениями на фазовые координаты / А.И. Тятюшкин // Известия РАН. Теория и системы управления. – 1998. – № 2. – С. 127–133.
3. Тятюшкин, А.И. Численные методы и программные средства оптимизации управляемых систем / А.И. Тятюшкин. – Новосибирск: Наука, 1992. – 193 с.
4. Тятюшкин, А.И. Многометодная технология оптимизации управляемых систем / А.И. Тятюшкин. – Новосибирск: Наука, 2006. – 343 с.
5. Моржин, О.В. Алгоритмы метода сечений и программные средства для построения множеств достижимости нелинейных управляемых систем / О.В. Моржин, А.И. Тятюшкин // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2008. – № 1. – С. 5–11.
6. Тятюшкин, А.И. Алгоритм численного синтеза оптимального управления / А.И. Тятюшкин, О.В. Моржин // Автоматика и телемеханика. – 2008. – Т. 59, № 4. – С. 109–118.

Федоров Р.К., Хмельнов А.Е., Новицкий Ю.А., Ружников Г.М. УДК 681.142.2

ТЕХНОЛОГИЯ АКТУАЛИЗАЦИИ ВЕКТОРНОЙ КАРТЫ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ГОРОДА

Геоинформационные системы (ГИС) активно используются для решения задач управления развитием территорий: градостроительной деятельности и архитектуры, диспетчеризации транспорта, ведения имущественного кадастра, исчисления земельного налога и арендной платы в зависимости от кадастровой стоимости и т.д. [1]. Особенностью таких задач является пространственный характер тематических данных, что обосновывает активное использование современных геоинформационных технологий, а также высокие требования к используемой цифровой топографической основе (ЦТО), которая является базовым источником сведений о территории города. От точности, полноты и корректности информации ЦТО зависит результат работы ГИС, поэтому актуальна проблема получения и ведения цифровой топоосновы, содержащей метрическую и семантическую информацию об объектах территории города.

В связи с изменением состава объектов (строительство новых, снос существующих, пожары, строительство пристроек и т.д.) и нетривиальностью обнаружения этих изменений и их внесения на ЦТО необходим технологический процесс поддержания топоосновы в актуальном состоянии.

Одним из подходов к решению этой задачи является сравнение космоснимков с векторной картой ЦТО и выявление изменений (зданий и сооружений), что позволяет сузить область поиска изменений городской территории, а также подготовить данные и фрагменты ЦТО для точечного обхода и уточнения представителями МУП БТИ. Для работы использовался космоснимок г. Иркутска в градациях серого, разрешения 0.7 метра на пиксель.

Существует большое количество методов распознавания зданий на космоснимках [2–5]. Например, методы, основанные на цепочках (Snake), нейронные методы, методы с использованием Марковских полей, методы, использующие тени зданий и т.д. Однако качество космоснимка (см. рис. 1) не позволяет полностью выполнить его автоматическое сравнение с векторной картой. Известные методы распознавания картографических объектов даже на более качественных изображениях дают определенный процент ошибок, который гораздо выше, чем способен сделать человек. Это обусловлено тем, что при распознавании зданий человеком кроме самого изображения используются дополнительные знания [6], например, ориентация домов, нахождение на одной улице, наличие теней, наличие коньков (резких переходов цветов, вызванных изменением освещения) и т.д. Поэтому для решения задач актуализации ЦТО наиболее перспективен подход комплексного использования методов распознавания с уточняющей обработкой изображений оператором.

Рис. 1. Фрагмент космоснимка

Разработаная в ИДСТУ СО РАН технология сравнения ЦТО с космоснимком использует на входе цифровую топооснову в формате ГИС Панорама и растровый космоснимок. В результате, после комплексного использования методов распознавания с уточняющей обработкой изображений оператором, на выходе формируется векторная карта в формате Панорама возможных изменений состава ЦТО, содержащая информацию об удаленных, перестроенных и новых объектах, а также классифицированный перечень объектов.

Новые объекты моделируются прямоугольниками, так как для представителей МУП БТИ для

обхода достаточно иметь информацию о положении объекта и его ориентации.

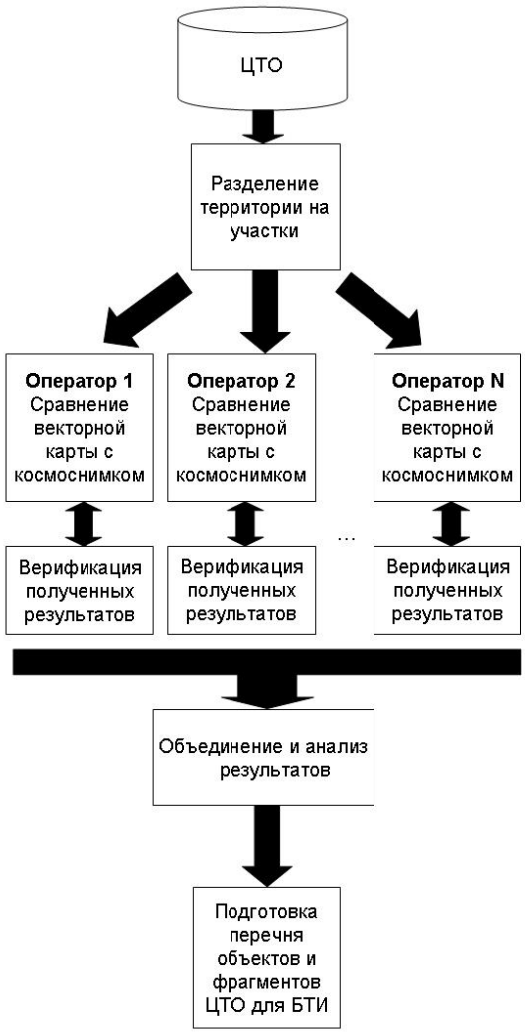


Рис. 2. Этапы разработанной технологии

Структурно технология состоит из следующих этапов (см. рис. 2):

Разделение площади территории на участки с распределением между операторами.

Сравнение операторами векторной карты ЦТО с космоснимком.

Верификация полученных результатов.

Объединение и анализ результатов работы для Администрации города.

Подготовка перечня объектов и фрагментов ЦТО для БТИ.

Создание слоя для разделения площади территории на участки. Операторам требуется просмотреть и обработать все объекты растрового изображения (космоснимка) в границах городской черты. Достаточно большая площадь города и высокая плотность ее застройки затрудняют процесс обработки, очень вероятны пропуски участков изображения, ошибки.

Перед проведением обработки технологией предусмотрено разбиение изображения территории города на ряд мелких участков, подобранных таким образом, чтобы оператор видел на экране монитора весь участок в соответствующем масштабе и избегал возможных пропусков фрагментов участков с одной стороны, а с другой стороны необходимо, чтобы количество участков было не слишком большим. Производится нумерация участков. В рамках технологии создается отдельный слой полигональных объектов либо линейных замкнутых объектов, полностью покрывающих всю территорию города. Для этого используется ГИС Панорама или один из инструментов разработанной программной системы. Описание этой системы идет ниже.

Каждому оператору выдается перечень пронумерованных участков с копиями их ЦТО и растрового изображения (космоснимка).

Сравнение векторной карты ЦТО с космоснимком. Разработана программная система для сравнения векторной карты с космоснимком. Данное сравнение можно проводить, используя стандартные функции ГИС, но из-за большого количества объектов процесс сравнения будет слишком длительным.

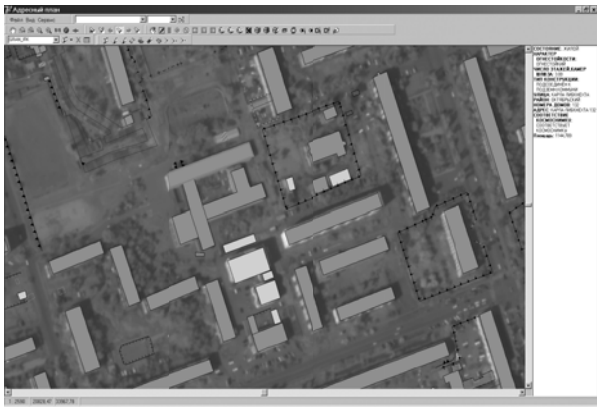


Рис. 3. Программа сравнения векторной карты и космоснимка

Оператор устанавливает каждому объекту (зданию, сооружению) на растровом изображении (космоснимке) соответствие на векторной ЦТО и отмечает, если этого соответствия нет. Вводится для каждого объекта семантика, в которой указывается результат сравнения.

Определены следующие состояния объектов:

- “не обработан”, это состояние первоначально устанавливается всем объектам;

- “соответствует растру”, это состояние устанавливается оператором, если объект имеется на векторной карте (ЦТО) и растровом изображении;

- “имеет другую форму или положение”, если объект имеется на векторной карте, но на растровом изображении изменена форма объекта, например, в результате пристройки;

- “отсутствует на растре”, если объект имеется на векторной карте, но на растровом изображении отсутствует;

- “отсутствует на векторной карте”, если объект имеется на растровом изображении, но на векторной карте отсутствует;

- “неизвестно”, это состояние определяется, если на участке растровой карты трудно определить наличие или отсутствие строения вследствие размытости изображения, облачности, растительности и т.д.

Общая схема процесса обработки выглядит следующим образом:

Выделяется необработанный участок, который переводится в состояние “в процессе обработки”.

Программная система создает список необработанных объектов, находящихся в пределах выделенного участка.

Далее пошагово оператор рассматривает объекты из этого списка. При этом система автоматически выделяет текущий объект, переносит его в центр окна программы и отображает имеющуюся семантику объекта.

Устанавливает одно из перечисленных выше состояний объекта.

Указывает положение объектов, отсутствующих на ЦТО, но присутствующих на растровом изображении.

После окончания работы с выделенным участком оператор переводит его в состояние “обработан”.

В программной системе реализован ряд вспомогательных инструментов, ускоряющих часто используемые действия. Далее рассмотрим их.

Создан специальный инструмент для оперативного изменения положения растра. На растре имеются искажения, т.е. существуют несоответствия привязанного растра векторной карте. Например, одной из причин появления искажений являются изменения высоты рельефа. На космоснимке территории города Иркутска довольно много таких искажений. Это требует регулярного изменения положения растра относительно векторной карты.

Второй инструмент предназначен для оперативного изменения последовательности отображения растровых изображений. Для получения более достоверных результатов в процессе сравнения предусмотрено использование растра, полученного из Google Earth. Данный растр имеет лучшее качество (в частности, он цветной), но он как минимум трехлетней давности. Его можно использовать для уточнения изображений на основном космоснимке. Например, на этом растре можно определить текстуру крыши здания, и если она совпадает с текстурой основного космоснимка, то вынести решение о наличии здания.

Третий инструмент предназначен для оперативного изменения состава отображения слоев векторной карты. Для работы оператору требуется три основных состава отображения карты:

1) отображаются только обрабатываемые объекты, это наиболее используемый состав карты;

2) отображаются все слои и объекты топоосновы, полный состав карты иногда необходим для анализа растра;

3) не отображается ни один объект, векторные объекты иногда мешают рассматривать растровое изображение.

Реализован режим быстрого переключения между перечисленным составом карт.

Четвертый инструмент предназначен для моделирования новых объектов – построения аппроксимирующих прямоугольников. Этот инструмент имеет два режима работы. Первый режим полностью ручной. Оператор создает объект с помощью указания трех точек прямоугольника мышью. Второй режим полуавтоматический – пользователь указывает с помощью мыши точку, принадлежащую зданию, сооружению. Включается разработанный для зашумленных изображений алгоритм, который автоматически находит аппроксимирующий здание прямоугольник на основе максимума функции оценки

$$f(r) \to \max_{r}, \qquad (1)$$

где r определяет размеры и положение прямоугольника.

Схема алгоритма построения аппроксимирующего прямоугольника:

Задание начального положения прямоугольника r^0.

Оценка значений целевой функции во всех возможных изменениях прямоугольника (поворот вокруг центральной точки, уменьшение или увеличение длин сторон) и выбор наибольшего $r^{[j+1]}$ (рис. 4).

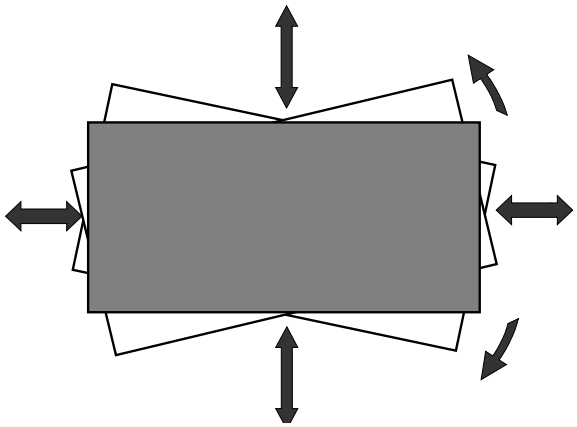


Рис. 4. Изменение положения прямоугольника

Проверка условия останова: если $f(r^{[j+1]}) > f(r^{[j]})$, то переход к шагу 2, иначе останов.

В качестве функции оценки прямоугольника можно выбрать линейную свертку количества объектных и фоновых точек, находящихся в рамках прямоугольника:

$$f(r) = k_o C_o + k_b C_b, \qquad (2)$$

где

C_o – количество объектных точек в прямоугольнике,

C_b – количество фоновых или шумовых точек в прямоугольнике,

k_o – коэффициент влияния объектных точек,

k_b – коэффициент влияния фоновых (шумовых) точек.

В технологии используется несколько различных функций для черно-белого, в тонах серого и для цветного изображения.

Достоинством данного алгоритма является то, что он при поиске прямоугольника учитывает не только некоторую локальную окрестность пикселя, а некоторую область изображения. Поэтому алгоритм позволяет эффективно находить границы объектов на зашумленных растровых изображениях. Более подробно с работой алгоритма можно ознакомится в [7]. Однако необходимо заметить, что некоторые объекты на полученном космоснимке сливаются с окружающим фоном и не выделяются предложенным алгоритмом.

Верификация работы операторов. Для достижения желаемого качества необходимо производить верификацию работ операторов. Верификация осуществляется вручную.

Объединение результатов работы. Для решения этой задачи разработана программная система PanCMP (см. рис. 5). После выполнения сравнения необходимо объединить результаты работы операторов. При использовании стандартных средств ГИС Панорама происходит изменение идентификаторов объектов, что является нежелательным для последующих действий. Данная система переносит измененную семантику и метрику объектов из одной карты в другую, оставляя идентификаторы теми же.

Рис. 5. Программная система PanCMP

Данная технология апробировалась в администрации г. Иркутска. В табл. 1 представлены результаты ее применения.

Таблица 1

Результаты сравнения ЦТО и космоснимка

Объекты, отсутствующие на космоснимке	Модифицированные объекты	Нераспознанные объекты	Объекты, соответствующие космоснимку	Объекты, отсутствующие на ЦТО
5,27%	5,83%	5,04%	68,35%	15,52%

Применение полученной технологии показало ее практическую значимость.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 08-07-00163-а) и президентской программы “Ведущие научные школы РФ” (грант № НШ-1676.2008.1).

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Томилин, В.В. Использование геоинформационных технологий в органах местного самоуправления: муниципальное хозяйство / В.В. Томилин, Г.М. Нориевская // Практика

муниципального управления. – 2007. – № 7. – С. 64–68.
2. Baxes, G.A. Digital image processing: principles and applications / G.A. Baxes. – N.Y. (USA): John Wiley & Sons, Inc., 1994.
3. Lin, C. Building detection and description from a single intensity image / C. Lin, R. Nevatia // Computer Vision and Image Understanding: CVIU. – 1998. – Vol. 72 (2). – P. 101–121.
4. Meyer-Brötz, G. Methoden der automatischen Zeichenerkennung / G. Meyer-Brötz, J. Schurmann. – München: R. Oldenbourg, 1970. – 154 p.
5. Sohn, G. Extraction of Buildings from High Resolution Satellite Data / G. Sohn, I.J. Dowman // Proc. of the Third Intern. Workshop on Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images. June 10–15, 2001, Centro Stefano Franscini, Monte Vertia, Ascona (Switzerland). – http://homepages.ge.ucl.ac.uk/~gsohn/Gunho_ASCONA.pdf.
6. Бычков, И.В. Об одном подходе к анализу топологии пространственно-распределенных данных с использованием логического вывода / И.В. Бычков, А.Е. Хмельнов, Р.К. Федоров // Вычислительные технологии. – 2005. – Т. 10, № 1. – С. 116–129.
7. Fedorov, R. The approach of extracting boundaries on image containing noise using rectangles / R. Fedorov // Proc. of 9-th Intern. Conf. on Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies (PRIA-9-2008). – Nizhni Novgorod, 2008. – Vol. 1. – P. 128–131.

Новицкий В.И., Финогенко И.А. УДК 517.9

СКОЛЬЗЯЩИЕ РЕЖИМЫ УПРАВЛЯЕМЫХ СИСТЕМ С МНОГОЗНАЧНЫМИ ВОЗМУЩЕНИЯМИ

1. Введение. В данной работе рассматривается управляемая система, движение которой описывается дифференциальным включением

$$\dot{x} \in F(t,x) + B(t,x)u(t,x), \qquad (1)$$

где $x = (x_1,\ldots,x_n) \in R^n$, $B(t,x)$ – матрица размерности $n \times m$, векторная функция $u(t,x) = (u_1(t,x),\ldots,\ u_m(t,x))$, разрывная на некоторых гиперповерхностях, имеет смысл управления по принципу обратной связи, $F(t,x)$ – многозначная функция с выпуклыми компактными значениями, т.е. для каждых фиксированных значений (t,x) множество $F(t,x) \subset R^n$ является выпуклым и компактным. Эта функция предполагается полунепрерывной сверху и может возникать в задаче (1) различными путями. Например, если система находится под действием возмущений $f(t,x)$, точное значение которых не известно, но известно ограничение в виде $f(t,x) \in F(t,x)$. Или же, если функция $f(t,x)$ является разрывной по совокупности аргументов (t,x) и в точках разрыва доопределяется в смысле А.Ф. Филиппова [1]. В этом случае имеем дифференциальное уравнение с разрывной правой частью

$$\dot{x} = f(t,x) + B(t,x)u(t,x). \qquad (2)$$

Отличительной особенностью задач (1), (2) является то, что в исследуемую систему одновременно входят разрывные позиционные управления $u_i(t,x)$ и многозначные или разрывные функции, которые описывают какие-либо неуправляемые характеристики. Например, возмущения или, для механических систем, силы сухого трения. В последнем случае уравнение (2) можно рассматривать как формализацию уравнений управляемой механической системы с сухим кулоновским трением в форме Лагранжа

$$A(t,q)\ddot{q} = g(t,q) + Q^A(t,q,\dot{q}) + Q^{fr}(t,q,\dot{q}) + u(t,q,\dot{q}), \qquad (3)$$

где $Q^{fr}(t,q,\dot{q})$ – разрывная функция, описывающая обобщенные силы трения скольжения.

В менее общих постановках задачи (1)–(3) изучались многими авторами. Так, задача (2) при условии, что $F(t,x)$ – однозначное непрерывное отображение, относится к хорошо развитой в работах М.А. Айзермана, Е.С. Пятницкого [2] и В.И. Уткина [3] теории разрывных систем управления. Исследование задачи синтеза управления на принципе декомпозиции для механических систем (3) при отсутствии в них сил трения проведено в работе [4]. В статье [5] силы трения учитывались, но

в менее общей постановке задачи.

В данной работе исследуется задача о существовании решения для включения (1) в общепринятом в теории управления смысле, а именно: под решением понимается пара функций $(x(t),u(t))$, где $x(t)$ – абсолютно непрерывная, $u(t)$ – измеримая функции, для которых почти всюду на соответствующем промежутке $[t_0,t_1)$ выполняется включение

$$\dot{x}(t) \in F(t,x(t)) + B(t,x(t))u(t), \qquad (4)$$

и $u(t) \in U(t,x(t))$, где множество $U(t,x)$ в каждой точке (t,x) представляет собой выпуклую замкнутую оболочку всех предельных значений функции $u(t,x)$. Далее для включения (1) описывается метод эквивалентного управления (см. [3]) и приводится выражение для многозначного поля скоростей движения системы по пересечению поверхностей разрывов функции $u(t,x)$. Для уравнения (2) представляют интерес также условия возникновения скользящих режимов одновременно на пересечении поверхностей разрывов функции $f(t,x)$ и управлений $u_i(t,x)$ и их взаимное влияние на динамику системы в целом. Возникающие здесь особенности иллюстрируются на примере.

2. Существование решений. Пусть Z,Y – метрические пространства, $H: Z \to Y$ – многозначное отображение. Для полноты и точности изложения приведем ряд определений и фактов из теории многозначных отображений, которые будут использоваться в дальнейшем без оговорок (см., например, [6]). Мы рассматриваем многозначные отображения с компактными значениями.

Многозначное отображение H называется полунепрерывным сверху, если для каждой точки $z \in Z$ и для любого открытого множества $V \subset Y$ такого, что $H(z) \subset V$, существует окрестность $W(z)$ точки z такая, что $H(W(x)) \subset V$.

Многозначное отображение H называется замкнутым, если замкнутым является множество $\Gamma_H = \{(z,y) \in Z \times Y \mid y \in H(z)\}$ – график многозначного отображения H.

Между замкнутостью и полунепрерывностью сверху многозначных отображений существует тесная связь: эти два понятия эквивалентны, если пространство Y компактно.

В определении измеримости многозначных отображений, определенных на числовой прямой, мы следуем [6].

Отметим, что если $P(t)$ и $G(t)$ – измеримые многозначные отображения, то отображения $H(t)+G(t)$ и $H(t) \cap G(t)$ (при условии, что $H(t) \cap G(t) \neq \varnothing$ для всех t) – также измеримые отображения. Любое измеримое многозначное отображение $H(t)$ имеет измеримый селектор. Последнее означает, что существует измеримая однозначная функция, удовлетворяющая включению $f(t) \in H(t)$ для всех t. Отметим также, что полунепрерывное сверху многозначное отображение $H(t)$ является измеримым.

Доказательству существования решения включения (1) предпошлем следующую лемму.

Лемма 1. *Если $H(t)$ и $G(t)$ – измеримые многозначные отображения с компактными значениями, $v(t) \in H(t)+G(t)$ – измеримая функция, то существуют измеримые селекторы $h(t) \in H(t)$ и $g(t) \in G(t)$ такие, что $v(t) = h(t) + g(t)$.*

Доказательство. Пусть $v(t) \in H(t)+G(t)$ – измеримая функция. Тогда для каждого t существуют точки $z_1 \in H(t)$ и $z_2 \in G(t)$ такие, что $v(t) = z_1(t) + z_2(t)$. Следовательно, $v(t) - z_1(t) = z_2(t) \in G(t)$. Отсюда вытекает, что $(v(t) - H(t)) \cap G(t) \neq \varnothing$. Тогда существует измеримый селектор $g(t) \in (v(t) - H(t)) \cap G(t)$. При этом $g(t) \in G(t)$ и $g(t) \in v(t) - H(t)$. Следовательно, $v(t) - g(t) = h(t) \in H(t)$ и $h(t)$ – измеримая функция. Окончательно получаем $v(t) = h(t) + g(t)$, где $h(t) \in H(t)$, $g(t) \in G(t)$ – измеримые селекторы. Лемма доказана.

Теорема 1. *Пусть $F(t,x)$ – полунепрерывное сверху многозначное отображение с выпуклыми компактными значениями, $u(t,x) = (u_1(t,x),\ldots,u_m(t,x))$ – ограниченная функция, $B(t,x) = [b_{ij}(t,x)]$ – $n \times m$-матрица, составленная из непрерывных функций. Тогда для любых начальных данных (t_0,x_0) существует пара функций $(x(t),u(t))$, где $x(t)$ – абсолютно непрерывная, $u(t)$ – измеримая функции такие, что $x(t_0) = x_0$, почти всюду на некотором отрезке $[t_0,t_1]$ выполняется включение (4) и $u(t) \in U(t,x(t))$, где $U(t,x) = \mathrm{co}U_1(t,x)$, символ "co" означает переход к выпуклой оболочке множества $U_1(t,x)$, которое для любых фиксированных (t,x) представляет собой множество всех предельных значений функции $u(t',x')$ при $(t',x') \to (t,x)$, дополненное значением $u(t,x)$.*

Доказательство. Рассмотрим многозначное

отображение $F_1(t,x) = F(t,x) + B(t,x)U(t,x)$. Для каждых фиксированных (t,x) образ выпуклого компактного множества $U(t,x)$ при линейном отображении $B(t,x)$ является выпуклым компактным множеством. График многозначного отображения $U_1(t,x)$ замкнут, следовательно, оно полунепрерывно сверху. Этим же свойством обладает многозначное отображение $U(t,x)$. Тогда из [6] вытекает, что $B(t,x)U(t,x)$ – полунепрерывное сверху многозначное отображение с выпуклыми компактными значениями. Этим же свойством обладает и многозначное отображение $F_1(t,x)$. Из [1] вытекает, что существует решение дифференциального включения $\dot{x} \in F_1(t,x(t))$, $x(t_0) = x_0$, определенное на некотором промежутке $[t_0,t_1]$. Согласно лемме 1 для функции $v(t) = \dot{x}(t)$ существуют измеримые функции $f(t) \in F(t,x(t))$ и $g(t) \in G(t,x(t)) = B(t,x(t))U(t,x(t))$ такие, что $\dot{x}(t) = f(t) + g(t)$, где $g(t) \in B(t,x(t))U(t,x(t))$. Из леммы Филиппова о неявной функции [6] следует, что существует измеримая функция $u(t) \in U(t,x(t))$ такая, что $g(t) = B(t,x(t))u(t)$. Следовательно, $\dot{x}(t) \in F(t,x(t)) + B(t,x(t))u(t)$. Теорема доказана.

3. Скользящие режимы и эквивалентные управления. Пусть функции $u_i(t,x)$ разрывны только на гладких поверхностях $S_i = \{(t,x) : \varphi_i(t,x) = 0\}$, $i = 1,\ldots,m$ (каждая функция на своей поверхности S_i) и ограниченная часть каждой поверхности S_i имеет нулевую меру Лебега. Для каждой точки $(t,x) \in S_i$ через $u_i^+(t,x)$ и $u_i^-(t,x)$ обозначаются предельные значения функции $u_i(t,x)$ с обеих сторон поверхности S_i. Предполагается, что такие предельные значения существуют и однозначно определены, а значения $u_i(t,x)$ расположены произвольно на отрезке с концами $u_i^+(t,x)$ и $u_i^-(t,x)$.

Пусть $U(t,x) = (U_1(t,x),\ldots,U_m(t,x))$, где

$$U_i(t,x) = \begin{cases} [u_i^-, u_i^+], (t,x) \in S_i, u_i^- \le u_i^+, \\ [u_i^+, u_i^-], (t,x) \in S_i, u_i^- \ge u_i^+, \\ u_i(t,x), (t,x) \notin S_i. \end{cases}$$

Рассмотрим матрицу

$$J(t,x) = \frac{D\varphi}{Dx} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_n} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\partial \varphi_m}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial \varphi_m}{\partial x_n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \nabla \varphi_1 \\ \cdots \\ \nabla \varphi_m \end{pmatrix},$$

где через $\nabla \varphi_i$ обозначены градиенты функций φ_i.

Скользящим режимом системы (2) называется такое решение включения (1), что $\varphi_i(t,x(t)) = 0$ для всех $t \in [t_0,t_1]$ и всех $i = 1,\ldots,m$. Для существования скользящего режима необходимо, чтобы для всех $t \in [t_0,t_1]$ выполнялось условие $\partial_t \varphi_i(t,x(t)) + \langle \nabla \varphi_i(t,x(t)), \dot{x}(t) \rangle = 0$, $i = 1,\ldots,m$.

Для каждой точки $(t,x) \in S = \bigcap_{i=1}^{n} S_i$ через $U^{eq}(t,x)$ обозначим множество всех $u^{eq} = u^{eq}(t,x)$, которые удовлетворяют включению

$$0 \in \partial_t \varphi(t,x) + J(t,x)F(t,x) + J(t,x)B(t,x)u^{eq},$$

где $\partial_t \varphi(t,x)$ – вектор частных производных $\partial_t \varphi_i(t,x)$, $i = 1,\ldots,m$, и (при фиксированных (t,x)) множество $J(t,x)F(t,x)$ представляет собой образ множества $F(t,x)$ при линейном отображении $J(t,x)$. Функции $u^{eq}(t,x)$ называются эквивалентными управлениями. Теория эквивалентных управлений для уравнений вида $\dot{x} = f(t,x,u)$ и, в частных случаях, для уравнений вида $\dot{x} = f_0(t,x) + B(t,x)u(t,x)$ изложена в [3]. Если $\det J(t,x)B(t,x) \neq 0$, то получаем $u^{eq}(t,x) \in U^{eq}(t,x) = -(JB)^{-1}(t,x)(\partial_t \varphi(t,x) + J(t,x)F(t,x))$. Легко видеть, что многозначное отображение $U^{eq}(t,x)$ полунепрерывно сверху и имеет выпуклые компактные значения. Тогда, если для любых $(t,x) \in S$ выполняется условие

$$U^{*eq} = U^{eq}(t,x) \cap U(t,x) \neq \varnothing, \qquad (5)$$

то многозначное отображение $U^{*eq}(t,x)$ полунепрерывно сверху и имеет выпуклые компактные значения. Многозначное поле скоростей движения системы (1) по пересечению поверхностей S_i определяется из включения

$$\dot{x} \in F(t,x) + B(t,x)U^{*eq}(t,x). \qquad (6)$$

Таким образом, (6) представляет собой дифференциальное включение скользящих режимов для системы (1) в том смысле, что они могут быть реализованы только как решения включения (6).

Множество $U^{eq}(t,x)$ является наибольшим по включению для определения значений эквивалентных управлений $u^{eq}(t,x)$. Если условие (5) не выполняется, то движений по множеству $S=\bigcap_{i=1}^{n} S_i$ не существует.

Замечание. Если при выполнении условия (5) скользящий режим в любой момент времени может сойти с пересечения поверхностей разрыва или остаться на нем, то он является неустойчивым и не осуществляется в реальных системах. Устойчивость скользящих режимов определяется свойствами поля скоростей системы в окрестности поверхностей разрыва управлений. Иначе говоря, управление $u(t,x)$ должно быть стабилизирующим. Как правило, условия устойчивости системы на поверхностях разрыва являются (вместе с условием (5)) достаточными и для существования скользящих режимов одновременно.

Отметим, что для уравнения (2) с разрывной функцией $f(t,x)$ могут еще существовать скользящие режимы по поверхностям разрыва функции $f(t,x)$. В частности, это могут быть множества неизолированных положений равновесия, что характерно для механических систем с сухим трением.

4. Пример. Тело, рассматриваемое как материальная точка массы m, движется по горизонтальной прямой Ox под действием пружины с коэффициентом упругости k, силы тяжести $P=mg$, силы сухого трения $F=-fP\,\mathrm{sign}\,\dot{x}$ (f – постоянный коэффициент трения) и управляющей силы $u=-H\,\mathrm{sign}\,(\dot{x}+ax)$, $a>0$. Уравнение движения системы запишем в виде

$$m\ddot{x}=-kx+F+u\,. \qquad (7)$$

Сила трения F при условии $\dot{x}=0$ может принимать любое значение из отрезка $[-fP,fP]$. Система (7) без управляющего воздействия обладает «зоной застоя» вида $Z=\{(x,0):|x|\le fP/k\}$. Это отрезок на оси Ox, содержащий начало координат фазовой плоскости системы и состоящий из множества неизолированных положений равновесия.

Эквивалентное управление находится из условий $\dot{x}+ax=0$, $\ddot{x}+a\dot{x}=0$ и при $\dot{x}\neq 0$ определяется однозначно:

$$u^{eq}=(k+a^2m)x-fP\,\mathrm{sign}x=$$
$$=(-k/a+am)\dot{x}+fP\,\mathrm{sign}\dot{x}\,. \qquad (8)$$

При условии $\dot{x}=0$ получаем $x=0$ и значение u^{eq} может быть любым из отрезка $[-d,d]$, где $d=\min(H,fP)$.

1. Пусть выполняется неравенство $H\ge fP$. Тогда условие (5) имеет вид неравенства $|u^{eq}|\le H$ и из (8) получаем $(k+a^2m)|x|\le H+fP$ или, равноценно, $(am+k/a)|\dot{x}|\le H+fP$. На плоскости $(\dot{x},x)$ эти неравенства образуют прямоугольник, в пределах которого на прямой $\dot{x}+ax$ возникает асимптотически устойчивый скользящий режим для уравнения (7). На рис. 1 представлена верхняя полуплоскость фазовой плоскости. Траектории представляют собой дуги четырех эллипсов, соответствующих четырем областям фазовой плоскости, на которые ее разбивают ось Ox и прямая $\dot{x}+ax=0$. Они симметричны относительно начала координат. Центр эллипса для области $\dot{x}>0$, $\dot{x}+ax<0$ расположен на оси Ox справа от начала координат (точка $x=-\frac{fP}{k}+\frac{H}{k}$). Это приводит к тому, что отрезок застоя не возникает, положение равновесия единственно – начало координат. Все траектории, попадающие на прямую $\dot{x}+ax=0$ в пределах прямоугольника, двигаются по этой прямой в начало координат. Точки $A=-a\frac{H+fP}{k+a^2}$, $B=\frac{H+fP}{k+a^2}$ определяют границу прямоугольника.

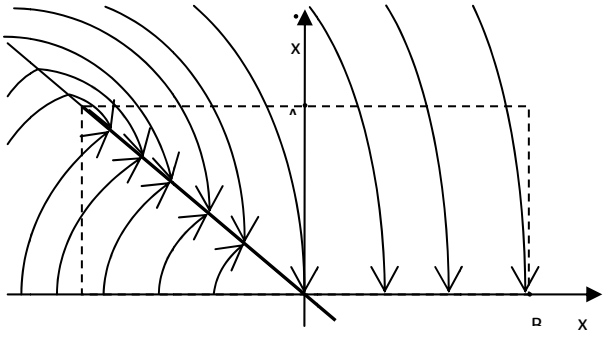


Рис. 1. Верхняя фазовая полуплоскость при выполнении условия $H\ge fP$

2. Пусть выполняется неравенство $H<fP$. Система имеет «зону застоя» – отрезок $[-L,L]$.

Отметим, что в начале координат условие (5) выполняется всегда, а в оставшихся точках прямой $\dot{x}+ax=0$ оно, как и в первом случае, имеет вид неравенства $|u^{eq}|\le H$. Простой анализ этого неравенства с учетом (8) показывает, что оно порождает на фазовой плоскости два вложенных прямоугольника (рис. 2). В пределах маленького прямо-

угольника неравенство $|u^{eq}| \le H$ нарушается, и скользящий режим по прямой $\dot{x} + ax = 0$ не существует. Центр эллипса для области $\dot{x} > 0$, $\dot{x} + ax < 0$ расположен слева от начала координат (точка $L = \frac{fP}{k} - \frac{H}{k}$). Это приводит к тому, что некоторые траектории из указанной области могут приходить на отрезок застоя $[-L, L]$. Скользящий режим реализуется только на отрезках прямой линии $\dot{x} + ax = 0$, расположенных внутри большого и вне маленького прямоугольника, и прекращается в вершине маленького прямоугольника.

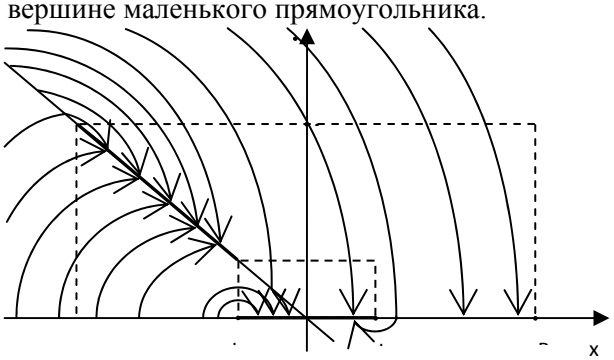


Рис. 2. Верхняя фазовая полуплоскость при выполнении условия $H < fP$

Работа выполнена при финансовой поддержке СО РАН (интеграционный проект № 85).

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Филиппов, А.Ф. Дифференциальные уравнения с разрывной правой частью / А.Ф. Филиппов. – М.: Наука, 1985.
2. Айзерман, М.А. Основы теории разрывных систем. I, II / М.А. Айзерман, Е.С. Пятницкий // АиТ. – 1974. – № 7. – С. 33-47; № 8. – С. 39-61.
3. Уткин, В.И. Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления / В.И. Уткин. – М.: Наука, 1981.
4. Пятницкий, Е.С. Синтез иерархических систем управления механическими и электромеханическими объектами на принципе декомпозиции. I, II / Е.С. Пятницкий // АиТ. – 1989. – № 1. – С. 87-98; № 2. – С. 57-71.
5. Финогенко, И.А. О принципе декомпозиции для механических систем с сухим трением / И.А. Финогенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2008. – № 3(19). – С. 66-70.
6. Обуховский, В.В. Введение в теорию многозначных отображений и дифференциальных включений / В.В. Обуховский, Ю.Г. Борисович, Б.Д. Гельман, А.Д. Мышкис. – М.: КомКнига, 2005.

Черкашин Е.А., Ипатов С.А.

УДК 004.4'242

ЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОБРАБОТКЕ UML-МОДЕЛЕЙ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Введение. В настоящее время при разработке сложных информационных систем популярно визуальное проектирование с использованием языка UML (Unified Modeling Language). Одним из обменных форматов представления UML-моделей является базирующийся на стандарте XML (Extensible Markup Language) [1] формат XMI (XML Metadata Interchange) [2]. Стандарт XML является одной из популярных технологий, используемых для представления информации, в частности, для хранения документов и обмена информацией между приложениями, а также для передачи информации, например, XML-RPC (XML Remote Procedure Call) **[3]**. Основными причинами высокой популярности XML послужили его открытость, масштабируемость, независимость от конкретной программно–аппаратной платформы, иерархическая структура документа, позволяющая представлять данные достаточно широкого класса, а также технологическая поддержка обработки XML–файлов существующими стандартами.

Существует ряд подходов к решению задачи трансляции и обработки XML-документов. Для императивных языков программирования консорциумом W3C разработаны стандартизованные технологии SAX (Simple API for XML) и DOM (Document Object Model). Технология SAX представляет разработчику (программисту) событий-

ный механизм конструирования/обработки XML-документа, основанный на функциях обратного вызова (callback functions). Эта технология позволяет программисту самостоятельно создавать структуры данных, в которые преобразуется исходный XML-документ. Кроме того, если предположить, что XML используется как обменный формат или формат для хранения данных, то разработчику необходимо реализовать преобразования структур данных в памяти ЭВМ в XML-формат самостоятельно. Технология DOM наоборот предлагает программисту использовать стандартную древовидную структуру исходного XML-документа (DOM-дерево) в качестве той структуры данных, которая непосредственно обрабатывается программой. Обработка этой древовидной структуры осуществляется при помощи API-функций, результат сериализуется (serialization) в новый XML-документ. Модель DOM практична, если объем изменений, вносимых в DOM-дерево, значительно меньше объема самого DOM-дерева. Примером такой обработки является технология AJAX (Asynchronous Javascript and XML), обеспечивающая повышение интерактивности статических HTML-документов в браузерах.

Другим набирающим популярность подходом выступает технология XSLT (Extensible

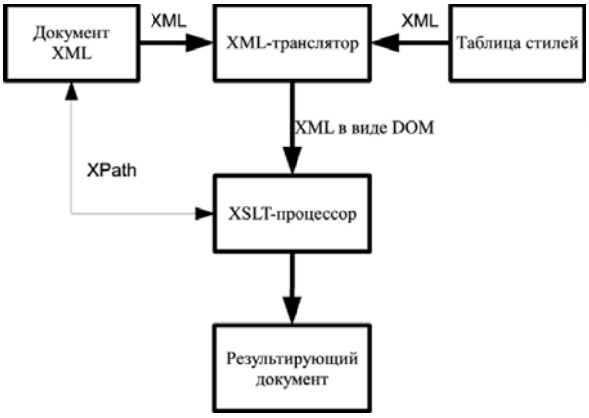


Рис. 1. Схема трансформации XML-документа с использованием процессора XSLT

Stylesheet Language Transformations) [4] (рис. 1). XSLT — это специализированный декларативный язык программирования, разработанный консорциумом W3C и основанный на стандарте XML. Подход позволяет для своего класса задач осуществлять преобразование одного XML-документа в другой XML-документ или текст только по XLST-описанию без дополнительной реализации каких-либо программ трансляции. Процедуры XSLT-трансформации представляются в виде отдельных утилит, например, `xsltproc` в библиотеке `libxml2` [5], либо компонентов систем, например, в web-браузере Mozilla реализована компонента `nsIXSLTProcessor`, доступная в скриптах JavaScript и при отрисовке (rendering) загружаемых из Интернет XML-документов. Ключевым понятием XSLT является таблица стилей трансформации, состоящая из набора шаблонов. Шаблоны представляют собой правила, описывающие процесс трансформации узлов исходного дерева. Процесс трансформации рассматривается как процедура сравнения с некоторым шаблоном и генерирования по этому шаблону части дерева — результата трансформации.

В процессе трансформации доступ к произвольному узлу исходного дерева XML осуществляется при помощи специализированного языка XPath 1.0 [6]. Кроме собственно адресации узлов дерева XPath обладает также функциями преобразования строк, чисел и булевых значений, что позволяет вычислять значения на основании содержания XML-документа.

Повышение уровня сложности обработки XML-документа, например, с преобладанием обработки семантической информации над структурной, представленной в XML-документе, требует создания специализированных средств. В данной работе предложен подход к разработке таких средств, основанный на использовании логического языка программирования Prolog.

Рис. 2. Схема трансформации XMI-документа

1. **Общая схема процедуры трансформации (рис. 2). Преобразование XML-документа осуществляется поэтапно:**

1) трансляция исходного текста в DOM-дерево;
2) преобразование DOM-дерева в набор фактов языка Prolog. Каждому узлу дерева в зависимости от типа сопоставляется некоторый набор фактов Prolog. В одном из вариантов это преобразование осуществляется формально, т.е. преобразуется древовидное DOM-представление документа в набор фактов, строго соответствующий этому дереву. С дру-

гой стороны, из исходного DOM-дерева выделяется только необходимая информация;

3) запуск сценария основной обработки, представляющего собой логический вывод заданного набора целей программы Prolog;
4) генерирование выходной структуры данных, в том числе при помощи набора текстовых шаблонов.

Рассмотрим использование предлагаемого подхода на примере решения задачи генерирования каркаса исходного кода программной системы по ее формальному описанию в рамках технологии MDA.

MDA (Model Driven Architecture) — подход к проектированию программных систем (ПС), предложенный в 2001 году консорциумом OMG (Object Management Group) и являющийся дальнейшим развитием идеи визуального проектирования. Как и множество других технологий, MDA преследует три основные цели — это повышение качества программного обеспечения за счет высокой переносимости между программно–аппаратной платформы (ПАП), открытость к взаимодействию с другими системами и повторное использование формализованных знаний разработчиков, в частности, представленных в виде исходного кода компонент программных систем. Формально MDA преследует цель отделить спецификацию функций ПС от способа реализации этих функций на различных ПАП. MDA обеспечивает реализацию следующих идей:

- ПС моделируется в виде, не зависящем от ПАП, на которой она будет функционировать;
- ПАП представляется в виде *формальной модели*, которая обычно представляет собой программную систему трансформации (преобразования) моделей ПС;
- исходная спецификация ПС автоматически *трансформируется* (преобразуется) в конкретную ПС, каркас ПС или программную библиотеку, реализованные на конкретной ПАП.

Из одной исходной модели синтезируются различные подсистемы, например, структура базы данных, объекты системы, шаблоны пользовательского интерфейса, шаблоны обменных форматов данных, метаданные и др. Замена модели ПАП в процедуре трансформации позволяет получить новую реализацию ПС или ее подсистем на новой ПАП.

Модель ПС, не зависящая от ПАП, в MDA называется *моделью, не зависящей от платформы* (Platform Independent Model, далее PIM). Модель ПС, учитывающая особенности ПАП в реализации ПС, называется *моделью, зависящей от платформы* (Platform Specific Model, далее PSM). Преобразование PIM в PSM осуществляется при помощи формального представления свойств ПАП, *модели платформы* (Platform Model, далее PM). Как правило, PSM представляет ПС на уровне более абстрактном, чем непосредственно программный код, но позволяющем алгоритмам трансформации генерировать исходный код компонент по текстовым шаблонам. Общая схема трансформации, предложенная в [7] и [8], изображена на рис. 2.

Для трансляции исходной модели, представленной в формате XMI, реализована библиотека YAP, представляющая API библиотеки `libxml2` [5] в виде набора соответствующих предикатов. Через этот API Prolog-программа транслирует исходный XMI-файл в структуру, подобную DOM-дереву. Далее эта структура переводится в дерево термов вида `xml_node(<имя тега>, <тип>, xml_ns (<псевдоним>, <URL>), <список атрибутов>, <список дочерних тегов>)`, где каждый терм представляет один тэг (tag) или текст исходной структуры. Из полученного дерева термов выделяются (распознаются) только необходимые структуры, которые и представляются в виде фактов.

Рассмотрим пример распознавания элемента “класс” диаграммы классов в XMI-документе.

```
% XMI 2.1 Class
xmi_parse_node(Node):-
% Фаза распознавания структуры поддерева.

%   Выделение класса в Диаграмме классов UML.
    Node=xml_node('packagedElement',

        _, _, Attributes, Children),
    xml_attribute_value(Attributes,

        'type', xml_ns('xmi', _),

        'uml:Class'),
    xml_attribute_value(Attributes, 'name',

        ClassName),
    (xml_attribute_value(Attributes,

        'visibility', Visibility);
                Visibility='public'   ),
    (xml_attribute_value(Attributes,

        'isAbstract', Abstract);
        Abstract='false'),
    xmi_id_from_attributes(Attributes, ID),

% Конец фазы распознавания.
    get_context(OwnerRef),
    store_object('xmi_classes',

        xmi_class(ClassName, ID,

        Visibility, Abstract,
        OwnerRef), ClassRef),
    push_context('class', ClassRef),
    xmi_parse_children_list(Children),
    pop_context('class', ClassRef).
    xmi_parse_children_list([]).
```

Необходимо дать некоторые пояснения. `Attributes` — список атрибутов тега `packagedElement`; атрибут `type` должен быть равен "`Class`"; если атрибуты `visibility` и `isAbstract` не включаются в XMI-файл, то заменяются значениями по умолчанию. Все элементы в UML-диаграмме помечены индивидуальными идентификаторами при помощи атрибута `id`, правило `xmi_id_from_attributes (Attributes, ID)` получает этот идентификатор для распознаваемого класса. Правило `get_context(OwnerRef)` получает идентификатор структуры, в которую входит распознаваемый класс; такой структурой для класса выступают "модель", "диаграмма" и "пакет" (package). Предикат `push_context/2` создает новый контекст, контекст данного класса, в котором будут порождаться факты об атрибутах и методах класса из списка дочерних элементов `Children`. Предикат `store_object ('xmi_ lasses', xmi_class(ClassName, ID, Visibility, Abstract, OwnerRef), ClassRef)` создает в рабочей памяти факт о существовании данного класса, характеризуемого набором атрибутов. Предикат `store_ bject/3` в третьем аргументе возвращает ссылку на созданный факт, через эту ссылку в YAP-программе осуществляется прямой доступ к факту без обычного перебора фактов классического Prolog.

К моменту начала трансформации в Prolog-программе существуют множество фактов, описывающих структуру UML-диаграммы. Далее пусть, например, необходимо сгенерировать базу данных SQL в виде SQL-скрипта создания базы данных. Пусть также следующий набор фактов содержит список атрибутов и методов одного класса, обозначенного идентификатором `'OrganizationUnit'`:

```
xmi_attribute('Name').
xmi_attribute('Address',
    'OrganizationUnit').
xmi_attribute('Phone', 'OrganizationUnit').
xmi_attribute('Fax', 'OrganizationUnit').
```

Правила трансформации представляют собой программу на языке YAP–Prolog (Yet Another Prolog), состоящую из двух частей:

1) правила, описывающие трансформацию исходных фактов в элементы скрипта SQL;

2) высказывания, выполняющие вспомогательную функцию, например, набор предикатов, выполняющих задачу подбора комбинации фактов по некоторому шаблону.

Примером вспомогательного высказывания является предикат `fields_list/2`:

```
fields_list(Class, Fields):-
    findall(Name, attribute(Name,
        Class), Fields).
```

В результате выполнения `fields_list/2` имена всех полей, для которых существует отношение `attribute(Name, Class)`, помещаются в список `Fields`, используемый при создании окончательной SQL-команды.

Следующее правило `create_table/3` отвечает за порождение SQL-команды создания таблицы в базе данных:

```
create_table(Table, Fields, Result):-
    nonvar(Table),
    nonvar(Fields),
    var(Result),
        . . .
    format('CREATE TABLE `~a` (~a)
        ~a;', [Table,Fields],
        Result),!.
```

В результате выполнения этого предиката переменная `Result` будет содержать SQL-команду, создающую одну таблицу базы данных:

```
transform(Model):-
    nonvar(Model),
    . . .
    create_tables(Model, SQLScript),
    % сгенерировать SQL-скрипт
    . . .
    output(SQLScript).
    % сохранить полученный скрипт
```

Сценарий трансформации представляется набором подцелей основной цели `transform/1`. Правило `transform/1` содержит ряд подцелей, одна из них – `create_tables/2`, которая для каждой таблицы, обнаруженной в виде фактов рабочей памяти, вызывает описанную выше подцель `create_table/3` и объединяет полученные команды в SQL-скрипт. Следующая подцель `output/1` сохраняет полученный из `transform/1` скрипт в файл.

2. **Использование семантической информации.** Помимо метаданных, описывающих структуру XML-документа, в нем обычно содержатся метаданные, в той или иной форме определяющие семантику (смысловое содержание) составляющих элементов. В рассматриваемой задаче семантическая информация, хранимая в исходном файле и модели ПАП, оказывает значительное влияние на

характер процесса трансформации. Обработка под управлением семантики проявляется, когда необходимо дифференцировать трансформацию различных элементов диаграммы по какому-либо критерию или специальному признаку. В языке UML существуют механизмы задания семантики элементам — это стереотипы (stereotype), позволяющие создавать новые элементы языка UML, теговые значения (tagged value), которые позволяют создавать новые свойства элементов, и ограничения (constraint), позволяющие формально определять условия или ограничения, которым должен удовлетворять элемент UML-модели.

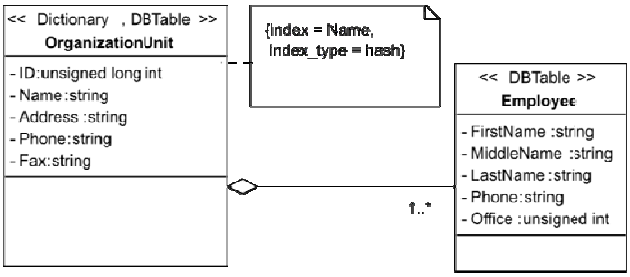


Рис. 3. Пример PIM

В качестве конкретного примера (рис. 3) можно рассмотреть класс, к которому применен стереотип <<dictionary>>, показывающий, что данный класс является “словарем”, т.е. данный класс состоит в отношении один–ко–многим с другими классами, хранящими внешнюю ссылку (…FOREIGN KEY REFERENCES…) на ключевое поле этого словаря. При трансформации PIM в PSM этот стереотип оказывает влияние на структуру конечной PSM, поскольку потребует добавления новых элементов в модель. На рис. 3 изображен процесс трансформации класса PIM в соответствующий класс PSM. А именно, в класс Articles PSM добавлен атрибут id, по которому осуществляется выборка записи в словаре (таблицы), класс помечен стереотипом <<DBTable>>, который означает, что на этапе генерирования исходного кода этот объект трансформируется в таблицу базы данных. Все атрибуты этого класса преобразуются в поля таблицы, для каждого атрибута осуществляется выбор типа данных в языке SQL.

При генерировании таблицы базы данных из класса UML-диаграммы, помеченного стереотипом <<DBTable>>, теговые значения используются для уточнения ограничений на значения атрибута и его специфических свойств: допустимо ли пустое (NULL) значение, допустимы ли повторения, является ли поле синтетическим ключом (т.е. для него применима общая процедура генерации уникального значения, не зависящая от семантики атрибута), требуется ли обеспечить производительный поиск по значению этого поля. Последнее свойство реализуется при помощи тегового значения index: если требуется указать, какой метод построения индекса (например, b–tree или hash) следует реализовать, то атрибут помечается тегом index_type. Процедуры трансформации игнорируют семантические данные (теговые значения) об атрибутах, не используемые целевыми ПАП.

```
generate_sql_tables_params
    (Class, TableParams):-
    % свойств таблицы, например,
    % наличие индекса, при помощи
    % тегового значения index_type,
    % связанного с классом Class
    assigned_tagged_value(Class,
        'index_type', IndexType),
    set_params('index_type',
        IndexType, TableParams).

generate_sql_index_list
    (Class, IndexList):-
    findall(index_elem(index_field
        (Name,Type), Tag),
        (xmi_attribute(Name,Type,_),
        assigned_tagged_value(Name,
        Tag)),IndexList).

generate_sql_fields_list
    (Class, FieldList, FieldParams):-
    findall(Field(Name, Type),
        class_attribute(Class, Name,
        Type), FieldsList),
    findall(Param(Name, Param),
        class_attribute_Param(Class,
        Name, Type),
    FieldParams).
    ....
generate_sql_table(Class, SQCLode):-
    % получение конструктивных
```

```
    % элементов таблицы
    generate_sql_fields_list(Class,
        FieldList, FieldsParams),
    generate_sql_tables_params(Class,
        TableParams),
    generate_sql_index_list(Class,
        IndexList),
    % создание SQL-запросов
    format_sql_code('CREATE TABLE ~a
        (~a) ~a;', [Class,
        TableParams, FieldList,
        FieldsParams], SQLTableCode),
    format_sql_code('CREATE INDEX ~a
        USING ~a ON ~a (~a);',[Class,
        IndexList, FieldList,
        FieldsParams], SQLIndexCode),
    join_sql_code([SQLTableCode,
        SQLIndexCode], SQCLode).


generate_class_code(Class, Code):-
    Class=xmi_class(Name, ID, _,
         _, _),
    % Стереотип DBTable показывает,
    % что класс должен быть
    % сгенерирован в виде таблицы БД.
    xmi_assigned_stereotype(ID,
        'DBTable'),
  generate_sql_table(Class, Code).
```

Порожденный SQL-скрипт будет иметь вид

```
CREATE TABLE OranizationUnit(
    ID INT,
    Name VARCHAR(128),
    Address VARCHAR(128),
    Phone VARCHAR(128),
    Fax VARCHAR(128),
    PRIMARY KEY(ID)) ENGINE = InnoDB;

CREATE TABLE Employee (
    FirstName VARCHAR(128),
    MiddleName VARCHAR(128),
    LastName VARCHAR(128),
    Office INT(12),
    Phone VARCHAR(64),
    OrganizationUnit_ID INT(12),
    INDEX organizationunit_ind
        (OrganizationUnit_ID)
    FOREIGN KEY (OrganizationUnit_ID)
        REFERENCES OranizationUnit(ID)
)ENGINE = InnoDB;
```

Заключение. В работе рассмотрена задача трансформации UML-моделей, управляемая семантикой, хранимой в исходном описании модели и алгоритмах трансформации, с использованием логики первого порядка. Язык логического программирования Prolog использован для декларативного представления процедур распознавания элементов структуры модели и синтеза новых структур данных. Предложенный подход демонстрирует средство трансформации UML-моделей, представленных в виде XML-документов, а также демонстрирующее декларативный подход к управлению процессом обработки информации XML-документа. Приведен пример трансформации платформо-независимой UML-модели в элементы SQL-скрипта базы данных информационной системы. Формальное описание модели поэтапно обрабатывается модулями трансформации, в результате чего порождается последовательность SQL-команд. Использование логического подхода позволило достаточно лаконично определить процесс трансформации модели программной системы в исходный код ее компонент. Разрабатываемые инструментальные средства синтеза компонент каркаса применяются в цикле разработки информационной системы “Популяционный раковый регистр“ Иркутского онкологического диспансера [8].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, гранты №№ 08-07-00163-а, 07-05-01061-а, 08-07-00163-а, 08-07-98005-р_сибирь_а, 09-07-12017-офи_м и президентской программы «Ведущие научные школы РФ», грант № НШ-1676.2008.1.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. W3C Extensible Markup Language [Электронный ресурс] / Консорциум W3C – Режим доступа: http://www.w3.org/XML/, свободный. – Загл. с экрана.
2. OMG XMI Specification [Электронный ресурс] / Консорциум OMG – Режим доступа: http://www.omg.org/technology/documents/formal/xmi.htm, свободный. – Загл. с экрана.
3. XML-RPC Home Page [Электронный ресурс] / Scripting News, Inc. – Режим доступа: свободный: http://www.xmlrpc.com – Загл. с экрана.
4. XSLT 1.0 W3C Recommendation [Электронный ресурс] / Консорциум W3C – Режим доступа:

http://www.w3.org/TR/xslt, свободный. – Загл. с экрана.
5. The XML C parser and toolkit of Gnome [Электронный ресурс] / The GNOME project – Режим доступа: http://xmlsoft.org/, свободный. – Загл. с экрана.
6. XPath Version 1.0. / Консорциум W3C – Режим доступа: http://www.w3.org/TR/xpath, свободный. – Загл. с экрана.
7. Черкашин, Е.А. Автоматизация синтеза ядра информационной системы с использованием UML-описания / Е.А. Черкашин, Р.К. Федоров, И.В. Бычков, В.В. Парамонов // Вычислительные технологии. – 2005. – Т. 10. – С. 114-121.
8. Парамонов, В.В. Реализация и апробирование интеллектного варианта MDA-подхода автоматизации конструирования информационной системы / В.В. Парамонов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Специальный выпуск. – 2008. – С. 69-75.
9. Братко, И. Алгоритмы искусственного интеллекта на языке PROLOG. 3-е изд. / И. Братко. – М: Изд-во ВИЛЬЯМС – 2004. – 420 с.

Шигаров А.О. УДК 004.932.2

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ТАБЛИЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ ИЗ ЭЛЕКТРОННЫХ ДОКУМЕНТОВ РАЗНЫХ ФОРМАТОВ

Введение. Для решения многих научных и практических задач требуется извлекать информацию из таблиц, содержащихся в различных документах (например, для поиска информации или анализа данных). Подробно такие задачи рассматриваются в обзоре [1]. Если при этом имеется большое количество таблиц и документов, то ручное извлечение табличной информации (когда оператору приходится визуально обнаруживать каждое табличное значение в документе, а затем вручную вводить его в некоторую форму) может оказаться достаточно трудоемким процессом, связанным с большим количеством возможных ошибок оператора. В данной работе предлагается технология извлечения табличной информации из электронных документов, которая позволяет автоматизировать этот процесс.

В данной технологии решаются следующие задачи извлечения табличной информации: 1) обнаружение таблиц в документах; 2) функциональный анализ таблицы – определение того, какую функцию выполняют отдельные ячейки таблицы (являются ли эти ячейки данными или заголовками); 3) сегментация таблицы на отдельные ячейки; 4) структурный анализ таблицы – определение связей между ячейками таблицы. Предлагаемая технология включает в себя эвристические методы решения этих задач, а также основанную на этих методах программную систему, которая позволяет решать эти задачи автоматически и полуавтоматически. Результатами извлечения табличной информации являются семантические описания таблиц, которые могут интерпретироваться с целью преобразования их к требуемому виду, например, к виду отношений в терминах реляционных баз данных.

1. Сравнение с существующими методами и системами извлечения табличной информации. Существующие методы и системы решают, как правило, только отдельные задачи извлечения табличной информации, например, только обнаружение таблиц или только сегментацию таблиц. В обзоре [2] из 28 рассматриваемых методов и систем извлечения табличной информации указано всего две системы: авторов Douglas и др. [3] и Hu и др. [4, 5], которые, как и предлагаемая технология, выполняют комплексно все перечисленные задачи. Следует отметить, что система авторов Douglas и др. ориентирована на особенности таблиц, содержащихся в документации строительной промышленности, представленной в виде ASCII-текста. В работах авторов Hu и др. предлагаются методы, ориентированные на ASCII-текст и

растровые изображения в качестве форматов входных данных. При этом в методах [4, 5] предполагается, что текст внутри документа имеет достаточно простое форматирование, ограниченное возможностями ASCII-текста. Другие недостатки методов и систем [3-5] обсуждаются в работах [6-8].

В большинстве существующих методов и систем извлечения табличной информации в качестве входных данных используются растровые изображения или ASCII текст (подробное сопоставление существующих систем и используемых ими форматов входных данных приводится в обзоре [2]). В то же время авторами Ramel и др. [9], а также Hassan и др. [10] предлагается использовать в этом качестве форматы печати документов (языки описания страниц) PostScript [11] и PDF [12]. По сравнению с растровыми изображениями и ASCII-текстом эти форматы содержат больше полезной информации (например, шрифтовые метрики, порядок вывода текста на печать), которую можно использовать для более эффективного (точного и полного) извлечения табличной информации из электронных документов. Кроме того, по сравнению с растровыми изображениями при использовании этих форматов не требуется OCR (Optical Character Recognition) обработка, которая может привести к искажению обрабатываемой информации.

В предлагаемой технологии в качестве формата входных данных используется один из таких форматов печати документов — EMF (Enhanced Metafile) [13]. Это позволяет применять данную технологию для извлечения табличной информации из электронных документов таких широко используемых форматов, как, например, DOC (Microsoft Word), XLS (Microsoft Excel), PDF, HTML, ASCII-текст. Документы всех этих форматов можно напечатать в метафайлы с помощью любого виртуального EMF-принтера. При этом предполагается, что текст таблиц в печатаемых документах является машиночитаемым (именно такое представление текста является наиболее используемым в документах указанных форматов). В отличие от файлов других распространенных форматов печати документов: PostScript, PDF, PCL [14] и др. метафайлы интерпретируются с помощью функций GDI (Graphics Device Interface, часть Windows API) [13], что обеспечивает достаточно простой и полный доступ к информации, представленной в печатаемых документах. Следует отметить, что в обзорах по данной тематике [1, 2, 15-21] не приводится ссылок на методы или системы извлечения табличной информации, ориентированные на обработку метафайлов. Авторам также неизвестно об их существовании.

Сложность извлечения табличной информации во многом обусловлена тем, что разнообразие форм изображения таблиц очень велико. Существующие методы и системы извлечения табличной информации преимущественно ориентированы на определенные особенности таблиц, которые определяются стандартами и соглашениями некоторой предметной области. При этом эффективность таких методов и систем во многом зависит от тех задач, на которые они ориентировались при разработке: являясь эффективными при решении одних задач, они могут оказаться неэффективными при решении других. Предлагаемые в рамках данной технологии методы извлечения табличной информации ориентируются на особенности так называемых статистических таблиц. Такие таблицы используются в государственных статистических отчетах России, США, Евросоюза, Китая, Японии и других стран, в медицинских статистических сборниках, в научно-технических изданиях, а также в финансовых отчетах различных компаний.

2. Таблицы в статистических документах. Статистическая таблица состоит из шапки с заголовками столбцов, боковика с заголовками строк, тела с элементами данных, а также может иметь перерезы внутри тела (см. рис. 1). При этом

Рис. 1. Статистическая таблица

заголовки столбцов и строк могут образовывать многоуровневые иерархии вложенности. Охватывающие заголовки столбцов всегда расположены непосредственно над соответствующими им вложенными заголовками. Вложенность заголовков строк образуется с помощью отступов от левого края. Статистическая таблица может иметь полную или частичную разграфку или не иметь ее вовсе. При этом разграфка таблицы может быть образована как графическими примитивами, так и символами псевдографики, в последнем случае будем говорить, что таблица имеет текстовую разграфку.

Кроме таблиц страницы статистических документов могут содержать текст, включая текст с выравниванием по ширине, колонтитулы с табличным форматированием, а также надписи к рисункам.

3. Обработка страницы окумента. После печати документа в метафайлы каждой его странице будет соответствовать отдельный метафайл. Метафайл состоит из набора записей, каждая из которых представляет некоторую GDI-инструкцию. При этом инструкциям вывода текста соответствуют записи типа EMR_EXTTEXTOUTW, а также записи типа EMR_SMALLTEXTOUT [13]. Инструкциям вывода линеек часто соответствуют записи типа EMR_BITBLT [13]. С помощью контекста устройства, на котором воспроизводится обрабатываемый метафайл, в соответствии с системами координат и режимами отображения, используемыми в данном метафайле, интерпретируются GDI-инструкции, представленные записями указанных типов. При этом из метафайла извлекаются структуры, называемые текстовыми элементами, каждая из которых соответствует отдельному «слову» (под «словом» здесь понимается последовательность подряд идущих непробельных символов в строке текста) и содержит дополнительную информацию: шрифтовые метрики, межсимвольные интервалы и ограничивающий прямоугольник. Также из метафайла извлекаются линейки (линии разграфки).

Извлеченные из метафайла данные проходят предобработку. Текстовая разграфка исключается из текста и объединяется с остальной разграфкой. Выполняется объединение текстовых элементов, вплотную прилегающих друг к другу боковыми сторонами своих ограничивающих прямоугольников, а также разделение текстовых элементов, имеющих удлиненные межсимвольные интервалы, которые используются вместо пробелов. После предобработки большинство текстовых элементов будут соответствовать отдельным целым «словам». Более подробно предлагаемый процесс извлечения данных из метафайлов и их предобработка обсуждаются в работах [8, 22, 23].

Извлечение табличной информации начинается с обнаружения таблиц на странице документа, т.е. с поиска ограничивающих прямоугольников таблиц. Для этого текстовые элементы, близко расположенные в одной строке текста друг к другу и при этом не разделенные линейками, объединяются в более крупные структуры, называемые текстовыми блоками, для которых также вычисляются ограничивающие прямоугольники. Затем среди строк, составленных из текстовых блоков, выбираются те, которые удовлетворяют ряду эвристик о составе табличных строк. На обрабатываемой странице выполняется поиск последовательностей подряд расположенных сверху вниз выбранных табличных строк, которые коррелируют между собой, по расположению вертикальных промежутков «белого» пространства (т.е. пространства, не занятого ограничивающими прямоугольниками текстовых блоков) между текстовыми блоками, принадлежащими данным строкам. Обнаруженные последовательности строк могут оказаться таблицами или их частями. Поэтому выполняется дополнительное объединение соседних последовательностей строк, которые коррелируют по расположению своих вертикальных промежутков «белого» пространства. После этого вычисляются прямоугольники, ограничивающие такие последовательности. Предполагается, что каждый такой прямоугольник ограничивает таблицу. Более подробно предлагаемый метод обнаружения таблиц рассматривается в работах [8, 22, 23].

4. Анализ и обработка таблицы. Каждая таблица, обнаруженная на странице документа, обрабатывается и анализируется. Прежде всего выполняется функциональный анализ таблицы. Функция (роль) ячейки определяется ее месторасположением в таблице (например, ячейка, расположенная в шапке таблицы, является заголовком столбца). Предлагаемый метод функционального анализа строится как поиск базовой точки тела таблицы, которая делит таблицу на шапку, боковик и тело (см. рис. 2). Для этого внутри таблицы определяется область поиска базовой точки тела таблицы — той части таблицы, которая начинается непосредственно под

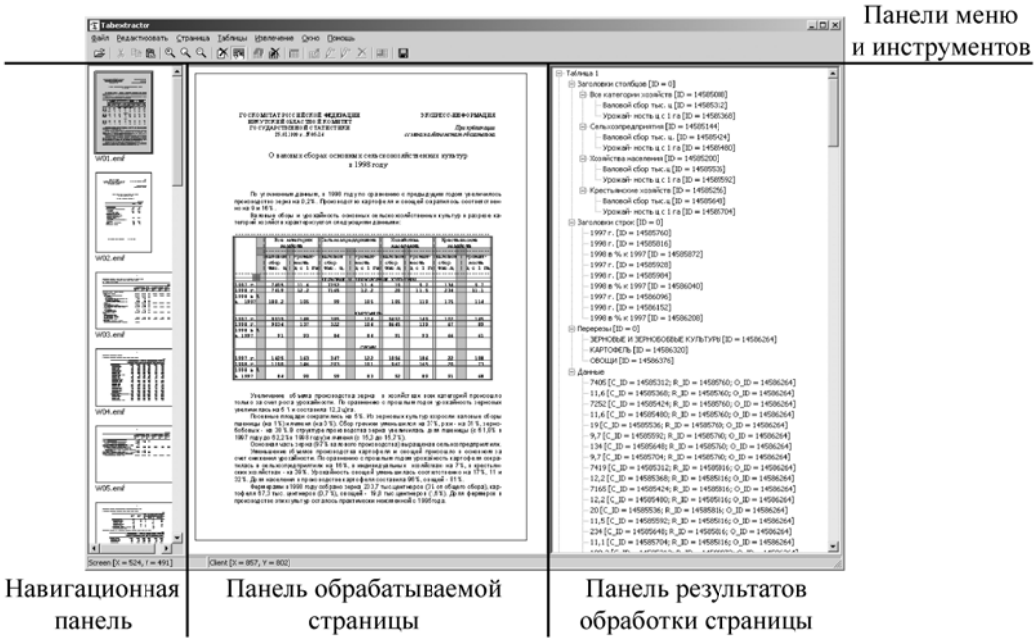


Рис. 2. Программная система извлечения табличной информации.

самым нижним охватывающим заголовком столб-столбца. Эта область сегментируется на ячейки с помощью предварительной разграфки таблицы, которая строится по вертикальным промежуткам «белого» пространства этой таблицы и ограничивающим прямоугольникам ее строк. Данные, содержащиеся в теле статистической таблицы, являются числами или специальными знаками из ограниченного набора. С помощью заранее заданных регулярных выражений для каждой непустой ячейки определяется тип данных содержащегося в ней текста. По ячейкам сегментированной области поиска базовой точки тела таблицы, содержащим числовые данные, строится ограничивающий прямоугольник тела таблицы. Вершина в левом верхнем углу этого прямоугольника является базовой точкой тела таблицы. Кроме того, отдельно определяются строки таблицы, содержащие перерезы.

На основе результатов функционального анализа таблицы выполняется ее сегментация. Для этого необходимо иметь информацию о границах ячеек. Рассматриваемые статистические таблицы, как правило, имеют только частичную разграфку или не имеют ее вовсе. Предлагаемый метод сегментации таблицы основан на восстановлении полной разграфки обрабатываемой таблицы. Прежде всего по вертикальным промежуткам «белого» пространства обрабатываемой таблицы восстанавливаются вертикальные линейки. Затем из верхних вершин полученных вертикальных линеек протягиваются горизонтальные линейки вправо и влево до ближайших не менее протяженных вертикальных линеек. Полученные горизонтальные и вертикальные линейки составляют предварительную разграфку в шапке таблицы. После этого внутри каждой ячейки предварительной разграфки шапки таблицы текстовые блоки объединяются. Далее по горизонтальным промежуткам «белого» пространства обрабатываемой таблицы восстанавливаются горизонтальные линейки в ее шапке. Горизонтальные линейки в теле и боковике восстанавливаются по ограничивающим прямоугольникам табличных строк. Эти горизонтальные линейки и полученные ранее вертикальные линейки составляют полную разграфку обрабатываемой таблицы, которая корректируется с помощью исходной разграфки этой таблицы при ее наличии. С помощью восстановленной полной разграфки таблица сегментируется на отдельные ячейки.

Для полученных ячеек таблицы выполняется структурный анализ, в результате которого строится структурное описание таблицы, включающее в себя дерево заголовков столбцов, дерево заголовков строк, дерево перерезов и набор элементов данных (значений из тела таблицы). Эти деревья соответствуют тем иерархиям вложенности, которые образуют заголовки.

Вложенные заголовки являются в этих деревьях подузлами охватывающих заголовков; корнями этих деревьев являются пустые заголовки. Каждый элемент данных сопоставляется с одним заголовком столбца, одним заголовком строки и одним перерезом. Для формирования деревьев заголовков и связывания элементов данных с заголовками выполняется анализ компоновки ячеек таблицы. В зависимости от предметных задач, для решения которых требуется извлекать табличную информацию, такие структурные описания могут интерпретироваться для преобразования их к требуемому виду. Более подробно предлагаемая модель структурного описания таблицы рассматривается в работах [7, 24].

5. Программная система извлечения табличной информации. На основе описанной технологии была разработана программная система для извлечения табличной информации из электронных статистических документов, представленных в виде метафайлов. Эта система имеет графический пользовательский интерфейс, который визуализирует процесс извлечения табличной информации и позволяет пользователю корректировать результаты каждого этапа этого процесса (см. рис. 2).

Пользователь может открыть один или несколько метафайлов, каждый из которых представляет некоторую страницу документа. При этом в навигационной панели для каждой страницы будет создан ее эскиз (миниатюрное изображение). Эскизы страниц служат как навигационное средство. Выбирая эскиз страницы, пользователь переходит к обработке соответствующей страницы документа. Извлечение табличной информации на выбранной странице выполняется поэтапно.

Прежде всего, выполняется автоматическое обнаружение таблиц, в результате которого на странице документа визуализируются ограничивающие прямоугольники обнаруженных таблиц. При необходимости пользователь может вручную переместить, изменить или удалить любой ограничивающий прямоугольник таблицы, а также вручную выделить ограничивающий прямоугольник таблицы. Затем внутри каждой таблицы, обнаруженной на странице документа, выполняется автоматический поиск базовой точки ее тела. Обнаруженные базовые точки тел таблиц также визуализируются на обрабатываемой странице документа. При этом пользователь имеет возможность скорректировать полученные результаты, вручную перемещая базовую точку тела таблицы внутри ее ограничивающего прямоугольника.

После этого выполняется автоматическое восстановление полной разграфки каждой таблицы, обнаруженной на странице документа. Восстановленные вертикальные и горизонтальные линейки визуализируются внутри таблиц на обрабатываемой странице документа. При необходимости пользователь имеет возможность вручную скорректировать автоматически восстановленную разграфку: удалить, добавить, переместить или изменить линейки. Завершается обработка таблиц автоматически выполняемым структурным анализом. В результате для каждой таблицы строится ее структурное описание, которое отображается в расположенной справа панели результатов обработки страницы. При этом пользователь может отредактировать наименования заголовков и значения элементов данных, а также сохранить полученные структурные описания таблиц в виде XML-документов, которые в дальнейшем могут трансформироваться к требуемому виду, например, к электронным таблицам или таблицам реляционных баз данных.

Заключение. Анализ структуры и особенностей статистических таблиц позволил сформулировать эвристики, на основе которых разработаны описанные методы извлечения табличной информации. Использование в предлагаемой технологии в качестве входных данных метафайлов позволило применить ее к документам, представленным в разных форматах (например, PDF, DOC, XLS, HTML, ASCII-текст). Данная технология показала высокую эффективность при извлечении табличной информации из научно-технических изданий, государственных, медицинских и финансовых статистических отчетов.

Работа выполнена при финансовой поддержке президентской программы «Ведущие научные школы РФ» (проект № НШ-1676.2008.1).

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Embley, D.W. Table-processing paradigms: a research survey / D.W. Embley, M. Hurst, D. Lopresti, G. Nagy // Intern. J. on Document Analysis and Recognition. – 2006. – Vol. 8, No. 2. – P. 66-86.
2. Silva, A.C. Design of an end-to-end method to extract information from tables / A.C. Silva, A.M. Jorge, L. Torgo // Intern. J. on Document Analysis and Recognition. - 2006. – Vol. 8, No. 2. – P. 144-171.
3. Douglas, S. Using Natural Language Processing for Identifying and Interpreting Tables in Plain Text / S. Douglas, H. Matthew, Q. David // 4th

Symp. on Document Analysis and Information Retrieval. – USA. – 1995. – P. 535-545.
4. Hu, J. Medium-Independent Table Detection / J. Hu, R. Kashi, D. Lopresti, G. Wilfong // Document Recognition and Retrieval VII, SPIE (USA). – 2000. – Vol. 3967. – P. 291-302.
5. Hu, J. Table structure recognition and evaluation / J. Hu, R. Kashi, D. Lopresti, G. Wilfong // Document Recognition and Retrieval VIII, SPIE (USA). – 2001. – Vol. 4307-05. – P. 44-55.
6. Mandal, S. A simple and effective table detection system from document images / S. Mandal, S.P. Chowdhury, A.K. Das, B. Chanda // Intern. J. on Document Analysis and Recognition. – 2006. – Vol. 8, No. 2. – P. 172-182.
7. Хмельнов, А.Е. Метод извлечения таблиц из неформатированного текста / А.Е. Хмельнов, А.О. Шигаров // Вычисл. технологии. - 2008. – Т. 13, спец. вып. 1. – С. 93-101.
8. Бычков, И.В. Эвристический метод обнаружения таблиц в разноформатных документах / И.В. Бычков, Г.М. Ружников, А.Е. Хмельнов, А.О. Шигаров. – 2009. – Т. 14, № 2. – С. 58-73.
9. Ramel, J.Y. Detection, Extraction and Representation of Tables / J.Y. Ramel, M. Crucianu, N. Vincent, C. Faure // Proc. 7th Intern. Conf. on Document Analysis and Recognition. – IEEE Computer Society. – 2003. – Vol. 2. – P. 374-379.
10. Hassan, T. Table Recognition and Understanding from PDF Files / T. Hassan, R. Baumgartner // Proc. 9th Intern. Conf. on Document Analysis and Recognition (ICDAR 2007). – IEEE Computer Society. – 2007. – P. 1143-1147.
11. PostScript Language Reference, Third Edition. – Addison-Wesley, 1999.
12. PDF Reference Version 1.6 (5th Edition). – Adobe Press, 2005.
13. Microsoft Developer Network. – http://msdn.microsoft.com/.
14. PCL 5 Printer Language Technical Reference Manual. – First Edition. – HP, 1992.
15. Handley, J.C. Document recognition / J.C. Handley // Electronic Imaging Technology. Chapter 8. – IS&T/SPIE Optical Engineering Press. – 1999.
16. Hurst, M. The Interpretation of Tables in Texts, Ph.D. thesis / M. Hurst // University of Edinburgh, 2000.
17. Embley, D.W. Notes on Contemporary Table Recognition / D.W. Embley, D. Lopresti, G. Nagy // Proc. 7th Int. Workshop on Document Analysis Systems. – Springer. – 2006. – P. 164-175.
18. Lopresti, D. Automated table processing: An (opinionated) survey / D. Lopresti, G. Nagy // Third IAPR Intern. Workshop on Graphics Recognition. – India. – 1999. – P. 109-134.
19. Lopresti, D. A tabular survey of automated table processing / D. Lopresti, G. Nagy // Lecture Notes in Computer Science. – 2000. – Vol. 1941. – P. 93-120.
20. Zanibbi, R. A survey of table recognition: Models, observations, transformations, and inferences / R. Zanibbi, D. Blostein, J.R. Cordy // Intern. J. on Document Analysis and Recognition. – 2004. – Vol. 7, No. 1. – P. 1–16.
21. Zanibbi, R. A Language for Specifying and Comparing Table Recognition Strategies, Ph.D. thesis / R. Zanibbi // Queen's University Kingston. – Canada. – 2004.
22. Bychkov, I.V. A method for table detection in metafiles / I.V. Bychkov, A.E. Hmelnov, G.M. Ruzhnikov, A.O. Shigarov // Proc. 9th Intern. Conf. on Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies. –2008. – Vol. 1. – P. 66-69.
23. Бычков, И.В. Метод обнаружения таблиц в метафайлах / И.В. Бычков, Г.М. Ружников, А.Е. Хмельнов, А.О. Шигаров // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2008. Спецвыпуск. – С. 47-51.
24. Хмельнов, А.Е. Извлечение таблиц из неформатированного текста / А.Е. Хмельнов, А.О. Шигаров // Докл. 13-й Всерос. конф. Математические методы распознавания образов. – 2007. – С. 551-553.

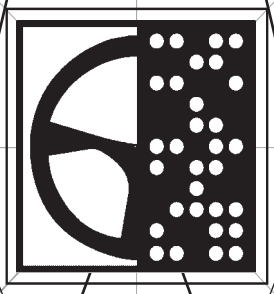
Министерство образования и науки Российской Федерации
Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта

Иркутский государственный университет путей сообщения
Иркутский научный центр СО РАН
Российская инженерная академия

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование



Раздел 2.
Системный анализ и его приложения

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
Телекоммуникации и связь
Управление техническими системами
Информационные технологии

Елисеев С.В., Хоменко А.П., Упырь Р.Ю. УДК 62.52

МЕХАТРОНИКА ВИБРОЗАЩИТНЫХ СИСТЕМ С РЫЧАЖНЫМИ СВЯЗЯМИ

Введение. Приложение методов теоретической механики к задачам транспортной динамики создает необходимую базу для решения вопросов обеспечения надежности машин, увеличения долговечности работы узлов и деталей при одновременном снижении материалоемкости конструкций. Объекты транспортной динамики (подвижной состав, автомобильный транспорт) широко используют различного рода амортизаторы, рессоры, гасители колебаний, демпферы, пневматические баллоны и средства для снижения динамических нагрузок между узлами машин и их деталями, а также ограничения параметров динамического состояния машин. В связи с этим, методы теории колебаний нашли широкое применение в динамике машин, что служит в настоящее время основой для поиска и разработки новых подходов, связанных с расширением представлений о возможных формах связей и способах использования управляющих сил [1].

Несмотря на достаточное развитие многих разделов современной динамики машин ряд направлений по-прежнему вызывает интерес, что объясняется общностью задач управления динамическим состоянием механических систем с различными, в том числе и нетрадиционными связями. Последнее характерно для робототехники, мехатроники, вибрационной диагностики, теории и практики активной вибрационной защиты. Особое внимание в связи с этим представляет оценка возможностей и особенностей динамических взаимодействий при учете в структуре систем эффектов, создаваемых рычажными взаимодействиями, преобразованиями относительного движения элементов и устройств и других форм введения дополнительных связей. Детали взаимодействия между элементами машин, определяется параллельным разнесением силовых факторов, возможностями последовательных и параллельных соединений типовых элементов, что позволяет развивать методы динамического синтеза с учетом особенностей структурных форм представления механических колебательных систем на основе привлечения аналитического аппарата теории автоматического управления [2].

Актуальность выбора такого направления исследования предопределяется необходимостью учета влияния на работоспособность машин и агрегатов вибраций, ударов и других динамических воздействий, характерных для оценки качества работы технологических машин, оборудования и сложных технических систем, в целом. Проблемы вибрационной защиты, виброизоляции объектов транспорта, машин, оборудования, приборов и человека-оператора являются важнейшими направлениями междисциплинарных исследований по проблемам динамики машин в их тесной взаимосвязи с проблемами системного анализа, теории автоматического управления, теории механизмов и машин, мехатроники и робототехники.

Вместе с тем, упомянутые исследования, хотя и были представлены в ряде работ[3,4,5], однако, не получили систематического развития, особенно в таких направлениях, как учет особенностей использования в колебательных структурах устройств с преобразованием движения, рычажных механизмов и вносимых ими связей, дополнительных к традиционным.

1. Современное состояние разработок в области теоретических и инженерно-технических разработок виброзащиты и виброизоляции технических объектов. В качестве объектов виброзащиты и виброизоляции рассматриваются транспортные средства подвижного состава железнодорожного транспорта, однако развиваемый подход может быть развернут в отношении автомобильного транспорта, тракторов и других объектов, работающих в условиях динамических взаимодействий с окружающей средой.

На рис.1 представлена одна из достаточно распространенных расчетных схем четырехосного вагона [6,7]. Такая система может иметь в зависимости от детализации рассмотрения (плоские или пространственные; продольные, поперечные или вертикальные колебания) более двух десятков степеней свободы и даже в линеаризованном виде описывается сложной системой дифференциальных уравнений. Для практических целей в зависимости от специфики задач транспортной динамики используют более простые модели.

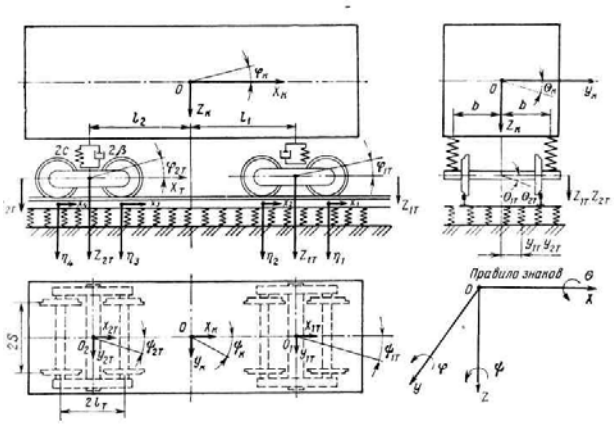


Рис.1. Расчетная схема четырехосного вагона

Задачи вибрационной защиты технических объектов во многом опираются на традиционные подходы, в которых находит отражение отраслевая специфика. Вместе с тем, вполне определенно формируется направление, ориентированное на обобщение задач виброзащиты и виброизоляции на основе системного восприятия методов и средств теории автоматического управления и соответствующих им структурных методов исследования. Даже на примере четырехосного вагона видно, что транспортные системы и их элементы относятся к сложным техническим объектам, состоящим, в свою очередь, из агрегатов и узлов.

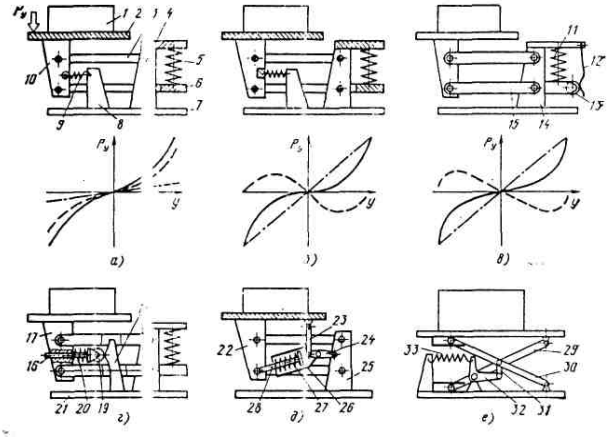


Рис. 2. Принципиальные схемы подвесок, позволяющие обеспечить жесткость упругих элементов с прогрессирующим изменением усилия

Расчетные схемы, используемые для решения локальных задач динамики подвижного состава, представлены в табл. 1; возможные способы использования рычажных соединений приведены в табл. 2. Таблицы, содержащие информацию о рычажных схемах для исследования вертикальных, боковых, пространственных и продольных колебаний представлены в работе [8]. Не менее важной задачей является защита человека-оператора на транспортных средствах. На рис. 2 приведены расчетные схемы виброзащитных систем, используемых в создании кресел машинистов.

Таблица 1

Расчетные схемы в динамических моделях подвижного состава

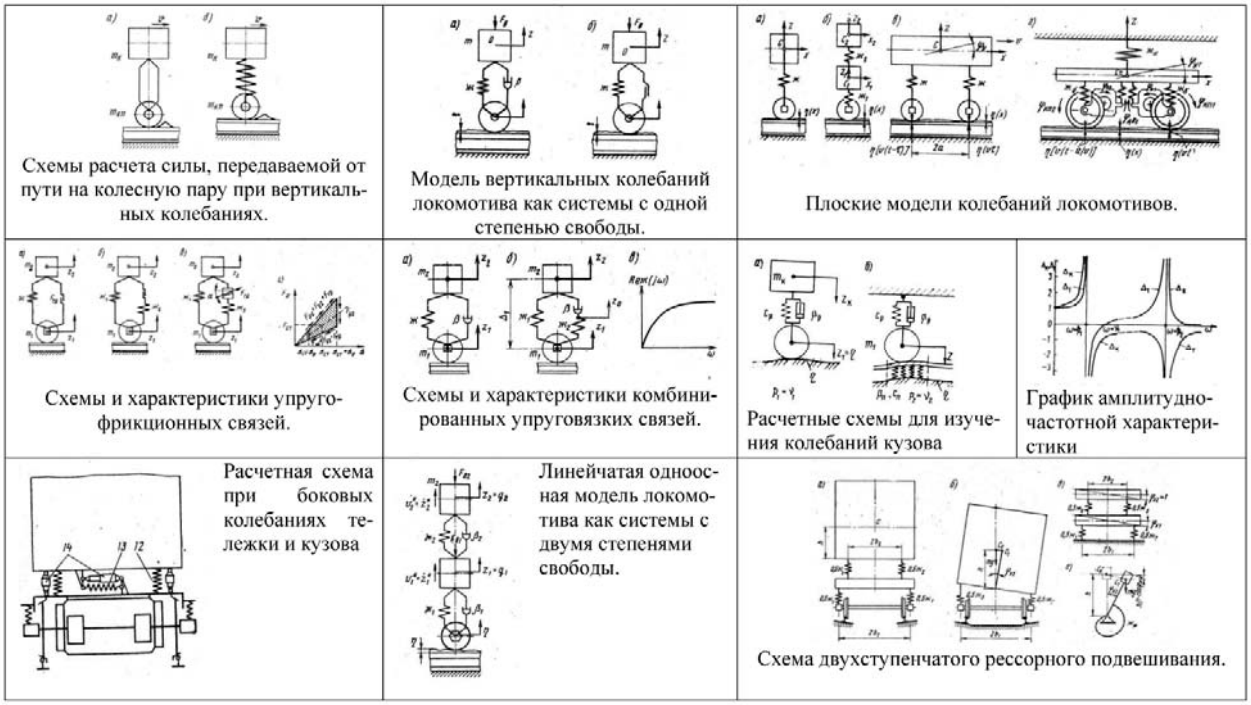
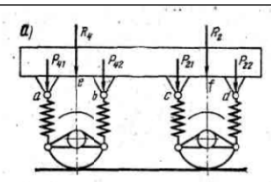
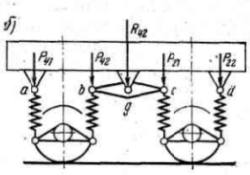
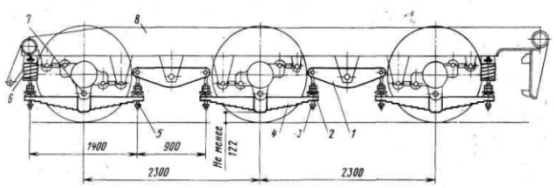
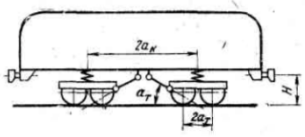
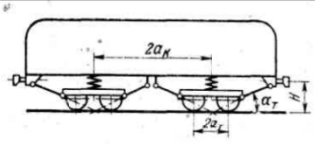
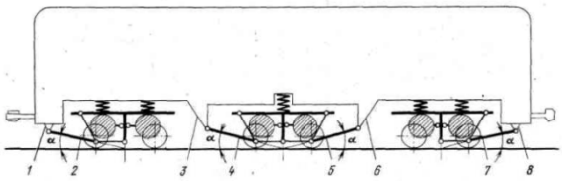
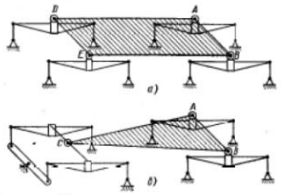
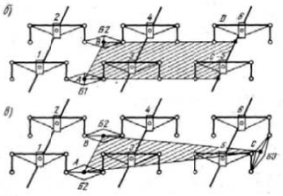
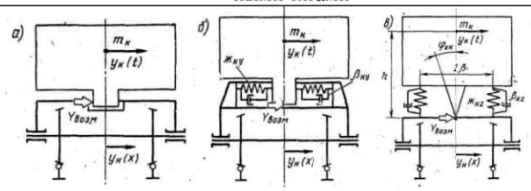


Таблица 2

Модели для исследования колебаний подвижного состава с учетом связей рычажного типа

<table>
<tr>
<td> 
Схемы подвешивания двухосной тележки.</td>
<td> 
Схемы подвешивания двухосной тележки.</td>
<td colspan="2"> 
Схемы подвешивания трехосной тележки</td>
</tr>
<tr>
<td> 
Схема с тяговыми связями двустороннего действия.</td>
<td> 
Схема с тяговыми связями, работающими на растяжение.</td>
<td colspan="2"> 
Схема передачи продольных сил от тележки к кузову наклонными тягами</td>
</tr>
<tr>
<td> 
Схемы сбалансированного рессорного подвешивания.</td>
<td> 
Схемы сбалансированного рессорного подвешивания.</td>
<td colspan="2"> 
Схемы с поперечной связью кузова и тележки.</td>
</tr>
</table>

Реальные потребности решения конструкторско-технических задач, связанных с отработкой отдельных блоков (тележки, сцепка, соединение с кузовом локомотива или вагона и т.д.) или оценкой динамических свойств в определенных видах движения, как правило, реализуются на упрощенных моделях, которые в своих базовых формах принимают вид механических колебательных систем с одной, двумя или несколькими степенями свободы.

В качестве основных элементов систем рессорного подвешивания различного уровня используются упругие элементы, как правило, это витые пружины или листовые рессоры, а также устройства для рассеивания энергии колебаний в виде гидравлических демпферов, фрикционных гасителей и, в некоторых случаях, пневматических амортизаторов. Естественно, что в качестве системообразующих элементов выступают инерционно-массовые звенья колебательного контура в виде твердых тел, имеющих форму материальной точки; твердого тела балочного типа; твердого тела, закрепленного в точке или имеющего возможность совершать более сложные движения.

Усложнением, относительно обозначенных форм представления инерционно-массовых элементов, являются соединения твердых тел, реализуемых через шарниры или кинематические пары III, IV или V классов [9], поэтому особую роль в расчетных схемах играют рычажные связи. Последние используются в различных целях, однако, их закрепление в геометрическом пространстве рессорного подвешивания, в большинстве случаев, «геометрически» не фиксируется. Таким образом, механическая колебательная система, как расчетная схема, в большинстве задач транспортной динамики представляет собой колебательную структуру той или иной сложности, в которой используется набор типовых звеньев, состоящий из упругих элементов, демпферов, массоинерционных элементов, соединенных шарнирами и рычажных механизмов (в обобщенном смысле), помогающих формировать пространственную структуру взаимодействия элементов виброзащитной системы.

Обобщенное представление о рычажных взаимодействиях основано на учете того обстоятельства, что точки крепления пружин, демпферов, фрикционных гасителей разнесены в пространственной схеме (в частности, в плоской), что предполагает возможности появления особенностей в динамике системы в целом. Отметим, что принципиальное рассмотрение существующего положения свидетельствует о большой общности задач виброзащиты и виброизоляции [2]. В этом направлении в последнее время наметились определенные сдвиги, которые связаны с использованием подходов динамики управляемых систем и теории активных виброзащитных систем, что ини-

циирует расширение набора традиционных средств управления динамическим состоянием объектов путем введения сервоприводов или силовых исполнительных механизмов. Это нашло отражение в средствах защиты подвижного состава в виде управляемых пневматических систем рессорного подвешивания, мехатронных систем рессорной подвески и систем активного гашения колебаний.

Другие виды транспортных систем, в частности, автомобильный и гусеничный транспорт, в задачах динамики сталкиваются с проблемами того же уровня сложности. Рычажные устройства используются в формировании рабочего пространства системы сбалансированного рессорного подвешивания, а также в создании систем передачи продольных сил от тележки к кузову. Механическая система, через которую реализуется динамическое взаимодействие тележки с кузовом, имеет достаточно сложное устройство, в котором можно отметить соединение упругих и диссипативных элементов с использованием рычажных механизмов. В обеспечении устойчивости взаимного положения кузова и тележек используются шарнирно-рычажные формы соединения массоинерционных элементов, определяющие условия связности работы кузова и тележек. Подвеска тягового двигателя в опорно-осевом конструктивном исполнении обеспечивает относительное движение тягового двигателя, что предполагает возможность существования режимов динамического гашения колебаний. Отметим, что рычажные соединения, обеспечивающие систему пространственного размещения упругих и диссипативных элементов рессорного подвешивания, выступают и в роли механизмов, реализующих схемы передачи усилий и связности движений.

Рычажные связи, использование которых является достаточно распространенным явлением в расчетных схемах транспортной динамики, учитываются при конструктивно-технической проработке систем рессорного подвешивания, обеспечения устойчивости наклонов кузова и боковых колебаний, а также в режимах обеспечения тяги и торможения. Однако они, как правило, участвуют в расчетах статических нагружений, но не рассматриваются как элементы динамической природы. В табл. 3 представлены конструктивно-рычажные формы рычажно-шарнирных виброизоляторов [10].

В работе [5] рассмотрены основные типы активных виброзащитных систем, использующих электрогидравлические и пневматические исполнительные механизмы или приводы. Важным для нас обстоятельством является то, что активная виброзащитная система в качестве основы имеет пассивную часть, которая реализуется на традиционных элементах. Однако возможность реализации управления связана с введением новых элементов, которые можно назвать активными и

Таблица 3

Конструктивные решения рычажно-шарнирных виброизоляторов [10]

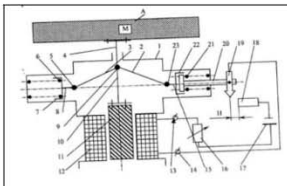
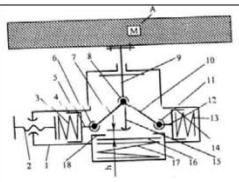
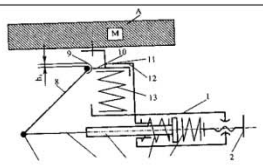
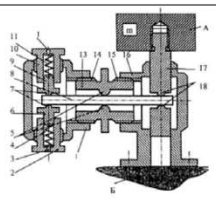
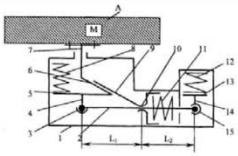
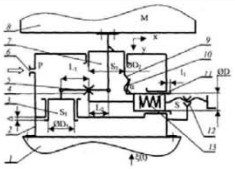
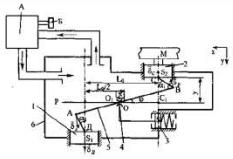
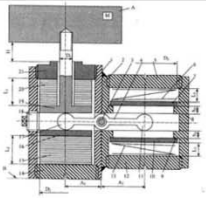
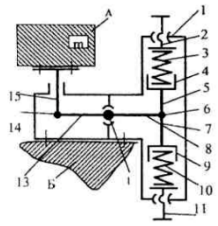
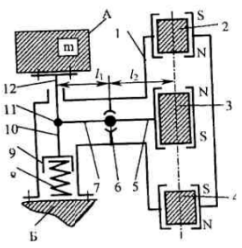
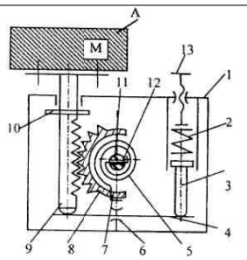
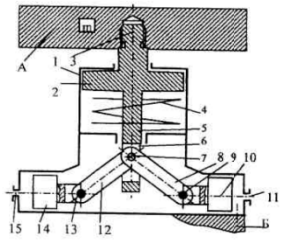
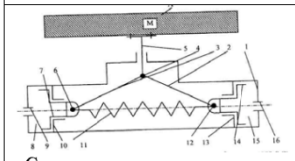
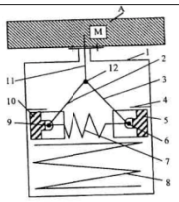
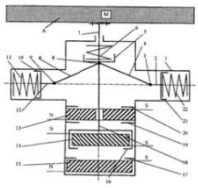
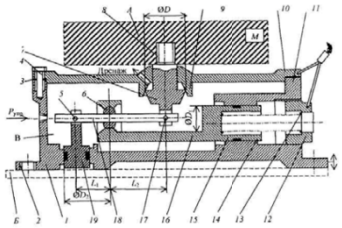
 Схема рычажно-шарнирного виброизолятора в комбинации с электромагнитным демпфером.	 Схема рычажного виброизолятора с встроенным противоударным устройством.	 Схема рычажного виброизолятора с переключаемой жесткостью упругого элемента.	 Рычажно-шарнирный виброизолятор с механическим регулированием жесткости упругих элементов
 Схема рычажно-клинового виброизолятора с переставляемой («плавающей») осью вращения рычага.	 Конструктивно-расчетная схема двухплечевого рычажно-поршневого демпфера с перестраиваемой осью вращения в виде ортогонально расположенного относительно поршней плунжера с клиновым механизмом нагружения.	 Конструктивно-расчетная схема пневматического виброизолятора с рычажно-поршневым механизмом управления	 Конструктивно-расчетная схема виброизолятора на базе демпфера сухого трения с противоударным рычажно-шарнирным механизмом.

Таблица 3 (продолжение)

Конструктивные решения рычажно-шарнирных виброизоляторов [10]

 Типовая конструкция пружинного рычажно-шарнирного виброизолятора	 Пружинный рычажно-шарнирный виброизолятор с корректором жесткости упругих элементов на базе постоянных магнитов	 Пружинный виброизолятор с рычажным шарнирно-поршневым механизмом рассеивания энергии.	 Рычажно-шарнирный виброизолятор с блоком спиральной и цилиндрической пружин.
 Схема рычажно-шарнирного виброизолятора в комбинации с газовым демпфером.	 Схема рычажно-шарнирного виброизолятора в комбинации с демпфером сухого трения.	 Схема рычажно-шарнирного виброизолятора в комбинации с магнитным демпфером.	 Виброизолятор с переставляемой осью рычажно-поршневого механизма.

которые в разной форме представляют собой сервопривода, той или иной природы. Автоматическое управление колебаниями задачу виброзащиты и виброизоляции, по-существу, превращает в задачу автоматического управления или стабилизации динамического состояния, что требует разработки достаточно специфичных математических моделей, отражающих сложную динамику взаимодействия элементов системы с учетом различного рода обратных связей. В связи с этим, перспективными представляются структурные интерпретации дифференциальных уравнений, использование передаточных функций и частотных методов оценки динамических свойств систем в их реакциях на внешние возмущения и воздействия. Структурные методы исследования обладают в рассмотренном спектре задач определенными преимуществами, которые позволяют решать не только задачи анализа динамических свойств, но и представляют возможности для синтеза систем, в том числе для поиска и разработки новых технических средств для управления динамическим состоянием.

Особенностью активных виброзащитных систем, как и систем автоматического регулирования и управления, является их замкнутость, то есть наличие обратной связи между “выходом” $\overline{y}(t)$ и “входом” $\overline{z}(t)$. В общем виде в такой системе можно выделить три составных части: объект защиты, регулирующее устройство, и связи между ними. Если структурные связи и звенья между ними в обычной пассивной ВЗС считать естественными или основными, то включение в ее структуру любых других звеньев может рассматриваться как процесс наложения дополнительных связей с целью изменения динамических свойств всей системы или ее отдельных фрагментов. С энергетической точки зрения дополнительные связи могут быть активными или пассивными, а с точки зрения их математического описания – линейными и нелинейными. Естественно, что выбор типов дополнительных связей и способов их включения в структуру должны производиться в соответствии с требованиями к системе защиты.

На рис. 3, 4 показана базовая расчетная схема ВЗС с дополнительной связью и ее структурный аналог (с развитой системой введения управляющих воздействий (рис. 4).

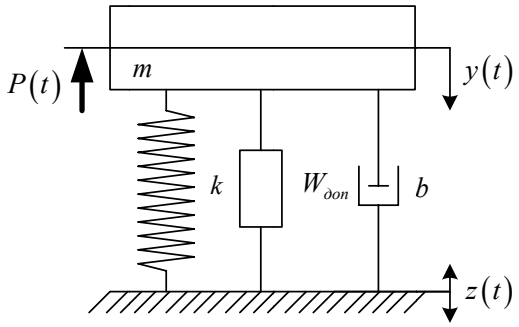


Рис. 3. Расчетная схема виброзащитной системы с дополнительной связью

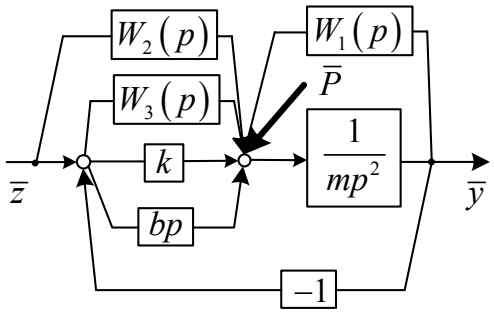


Рис. 4. Структурная схема активной виброзащитной системы с управлением общего вида

2. Элементы структурной теории виброзащитных систем. Авторами развивается подход к построению виброзащитных систем, основанный на использовании по сравнению с обычными подходами, расширенный набор типовых элементов или звеньев. К известным элементам в виде пружин и демпферов добавлены элементарные звенья, обеспечивающие двойное дифференцирование, а также рычажные связи. Последние играют особую роль в формировании структуры колебательной системы, поскольку входной сигнал изменяется на выходе по величине и направлению. Вместе с тем рычажное звено не входит в расширенный набор типовых элементарных звеньев и реализует в системе определенные функции координации или взаимосвязи движений. Использование таких представлений позволило рассмотреть задачу введения дополнительной связи в виде колебательной цепи, как показано на рис. 5. Такая расчетная схема может быть приведена к виду с дополнительной параллельной связью (рис. 6), что позволяет внести понятие обобщенного упругого элемента [11].

Передаточная функция обобщенной пружины определяется выражением

$$W_{доп}(p) = \frac{\overline{F}}{\overline{y}} = \frac{k_2\left(m_1 p^2 + k_1\right)}{m_1 p^2 + k_1 + k_2}, \qquad (1)$$

из которого может быть найдена приведенная жесткость

$$K_{пр} = k_2 \cdot \left| \frac{k_1 - m_1 \cdot \omega^2}{k_1 + k_2 - m_1 \cdot \omega^2} \right|. \qquad (2)$$

График изменения приведенной жесткости представлен на рис. 7.

Можно отметить, что при определенных условиях обобщенная пружина работает как блок с последовательным соединением пружин $k_1 \cdot k_2 / \left(k_1 + k_2\right)$.

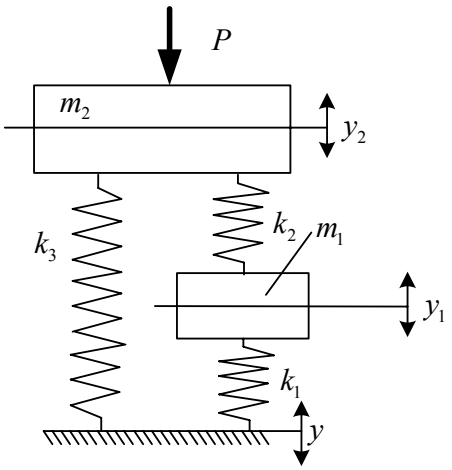


Рис. 5. Расчетная схема ВЗС с дополнительной цепью, колебательного вида

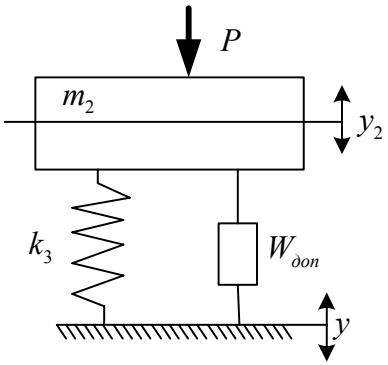


Рис. 6. Структурная схема ВЗС с дополнительной связью в виде колебательной структуры с одной степенью свободы

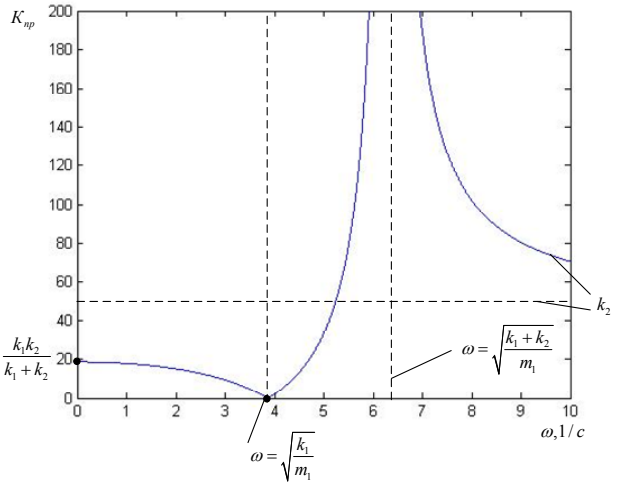


Рис. 7. Зависимость приведенной жесткости дополнительной связи от частоты

На высоких частотах блок или обобщенная пружина работает как пружина с жесткостью k_2. Обобщенная пружина обладает свойством запира-

ния на частоте $\sqrt{(k_1+k_2)/m_1}$ и обладает нулевой жесткостью при резонансе $\sqrt{k_1/m_1}$. Характер внешнего воздействия (силовой или кинематический) имеет принципиальное значение. В случае кинематического воздействия такой подход приводит к необходимости рассмотрения «скрытых» сил, как это делается в вибрационной механике. Природа этих сил связана с влиянием переносных сил инерции, вызванных движением основания.

Аналогичный прием может быть распространен на случаи дополнительной обратной цепи с большим числом степеней свободы, как было показано авторами в работе [11]. В этом случае обобщенная пружина, как некоторый новый элемент в структуре виброзащитной системы, будет обладать свойством своеобразного переключателя в структуре: на одних частотах система запирается (режим динамического гашения), а на других жесткость «зануляется», что соответствует режиму резонанса.

Введение типовых звеньев двойного дифференцирования позволяет расширить спектр динамических свойств; разработан алгоритм построения расчетных схем для обобщенной пружины с n - элементами. Авторами развито понятие обобщенной пружины как некоторого «дополнительного» звена, вводимого параллельно упругому звену базовой модели. При этом обобщенная пружина может выстраиваться из любого набора типовых элементов на основе правил последовательного и параллельного соединения пружин. В работе [8] приводятся примеры такого обобщения и графики зависимости приведенной жесткости обобщенной пружины от частоты внешнего воздействия.

Обнаружение рычажного взаимодействия в системах балочного типа возможно при использовании в составлении дифференциальных уравнений движения принципа Даламбера, а не общего уравнения Лагранжа 2-го рода. На рис. 8 отражено еще одно любопытное свойство – расчетная схема включает в свой состав типовые элементарные звенья в виде звеньев двойного дифференцирования, что раньше вводилось как некоторый постулат. На самом деле такие связи существуют в «естественном» виде [12].

Присутствие рычажного механизма, как некоторого нового элемента с функциями соединения и координации, подтверждается при рассмотрении балочной системы в координатах y_c, φ (рис.9).

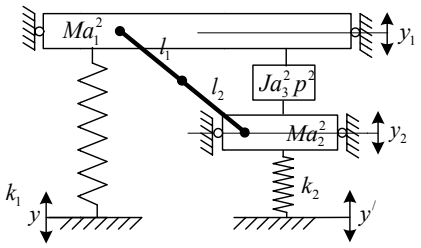


Рис. 8. Расчетная схема исходной ВЗС при введении дополнительных типовых звеньев и рычажной связи

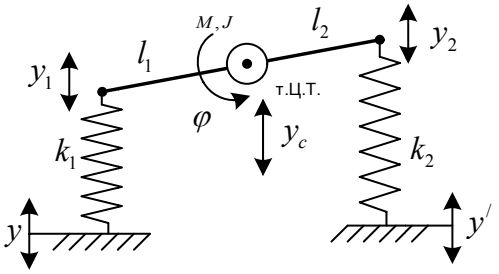


Рис. 9. Расчетная схема ВЗС для вывода дифференциальных уравнений в обобщенных координатах y_c и φ

3. Возможности и формы рычажных взаимодействий в системе соединения типовых элементарных звеньев виброзащитных систем. Как было показано в работе [13], введение рычажных связей первого и второго рода приводит к учету характерных особенностей при рассмотрении динамических свойств механических колебательных систем. Расчетная схема виброзащитной системы с рычагом второго рода приведена на рис. 10, а ее структурная схема представлена на рис.11.

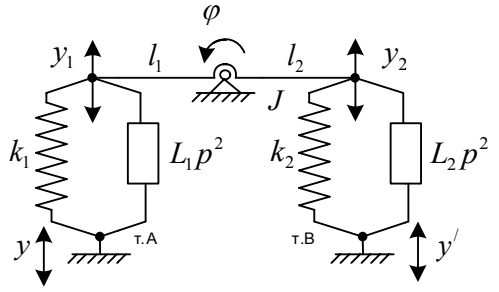


Рис. 10. Расчетная схема ВЗС с рычажными связями

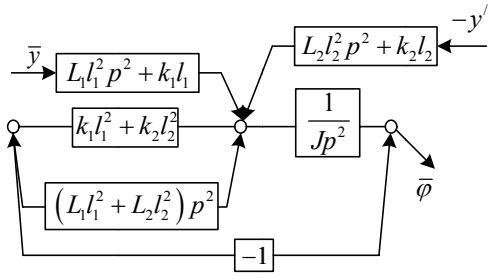


Рис. 11. Структурная схема ВЗС соответствующая расчетной схеме на рис. 10

Передаточная функция системы при $y = y^{/}$ имеет виде

$$W(p) = \frac{\overline{\varphi}}{\overline{y}} = \frac{p^2\left(L_1 l_1 - L_2 l_2\right) + k_1 l_1 - k_2 l_2}{\left(J + L_1 l_1^2 + L_2 l_2^2\right) p^2 + k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2}, \quad (3)$$

что дает возможность оценить характер влияния рычажных связей второго рода на динамические свойства ВЗС такого типа, по сравнению с обычными системами, совершающими прямолинейные, а не качательные движения. Отношение частот собственных колебаний и динамического гашения имеет вид

$$R = \frac{\left(k_1 + k_2 i^2\right)\left(L_1 - L_2 i\right)}{\left(\dfrac{J}{l_1^2} + L_1 + L_2 i^2\right)\left(k_1 - k_2 i\right)}, \quad (4)$$

что дает представление о существенном расширении свойств системы через возможности реализации режимов динамического гашения в передаче движения «угол поворота - кинематическое воздействие». Последнее представляет интерес для задач рационального конструирования рессорного подвешивания транспортных средств (i - передаточное отношение рычага). При использовании рычага первого рода с схеме, аналогичной рис. 10, знак (-) в выражении (3) изменится на (+), с соответствующим изменением динамических свойств системы в целом.

Рассмотрены динамические свойства систем, содержащих несколько рычагов второго рода [13], разработана методика упрощения систем с определением приведенной жесткости системы, что показано, в качестве примера, в таблице 4. Получена формула для расчета механических систем, содержащих n рычажных связей второго рода. В этом случае выражение для коэффициента приведенной жесткости имеет вид:

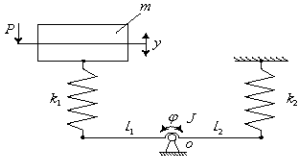
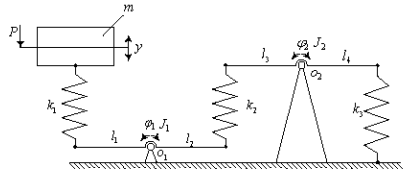
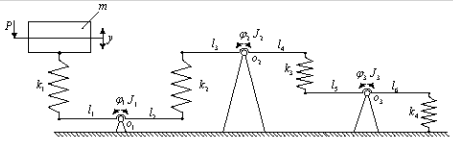
$$K_{np} = \frac{k_1 k_2 \ldots k_n \cdot \left(i_1^2 \cdot i_2^2 \ldots i_n^2\right)}{k_1\left[k_2\left[\begin{array}{l} \ldots\left[k_n\left[\begin{array}{l} k_{n-1}\left(k_n + k_{n+1}\cdot i_n^2\right) + \\ + k_n k_{n+1}\cdot i_{n-1}^2 \cdot i_n^2 \end{array}\right] + \\ + k_{n-1} k_n k_{n+1} \cdot i_{n-2}^2 \cdot i_{n-1}^2 \cdot i_n^2 \end{array}\right]\ldots\right] + k_2 k_3 \ldots k_{n+1} \cdot \left(i_1^2 \cdot i_2^2 \ldots i_n^2\right)} \quad (5)$$

В отношении рассмотренных авторами систем, состоящих из рычагов второго рода, в целом, можно отметить, что соединение элементов принимает форму последовательного соединения пружин с учетом геометрических особенностей рычажных связей. Введение в системы рычагов первого рода имеет свои особенности, хотя в этом случае коэффициент приведенной жесткости системы определяется по формулам последовательного соединения пружин.

Исследованиями установлено, что при введении рычажного соединения происходит уменьшение резонансной частоты и соответственно уменьшение периода колебаний; рычажные соотношения имеют одинаковую форму, как для рычагов второго, так и первого рода. На основе введения рычажных связей появляется возможность получения управляемо гасителя колебании, действующего путем изменения количества рычажных связей и длин плеч каждой из них.

Таблица 4

Значения приведенной жесткости для систем с рычажной связью второго рода

n	Расчетная схема	Приведенный коэффициент жесткости системы
1		$K_p = \dfrac{k_1 k_2 i^2}{k_1 + k_2 i^2}$
2		$K_p = \dfrac{k_1 k_2 k_3 \cdot i_1^2 \cdot i_2^2}{k_1\left(k_2 + k_3 \cdot i_2^2\right) + k_2 k_3 \cdot i_1^2 \cdot i_2^2}$
3		$K_p = \dfrac{k_1 k_2 k_3 k_4 \cdot i_1^2 \cdot i_2^2 \cdot i_3^2}{k_1\left[k_2\left(k_3 + k_4 \cdot i_3^2\right) + k_3 k_4 \cdot i_2^2 \cdot i_3^2\right] + k_2 k_3 k_4 \cdot i_1^2 \cdot i_2^2 \cdot i_3^2}$

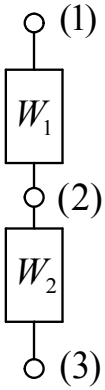


Рис. 12. Схема последовательного соединения звеньев

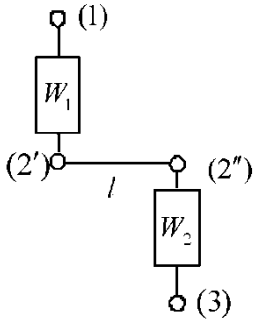


Рис.13. Последовательное соединение звеньев с разнесенными точками контакта (2′) и (2″), l - длина рычага

Рассмотрение рычажных взаимодействий, реализуемых в различных механических колебательных системах на основе рычагов первого и второго рода [14], показало большое значение соединений типа

$$W = \frac{W_1 W_2}{W_1 + W_2}, \qquad (6)$$

где W_1 и W_2 - передаточные функции типовых элементарных звеньев. Если рассматривать точку (2) (рис. 12) таким образом, что в ней соединяются элементы двух звеньев (точки (2′) и (2″)), то между точками (2′) и (2″) можно ввести новое звено – рычаг, так, как это показано на рис. 13.

Рычаг может быть безынерционным звеном, а в некоторых случаях, обладать массоинерционными свойствами.

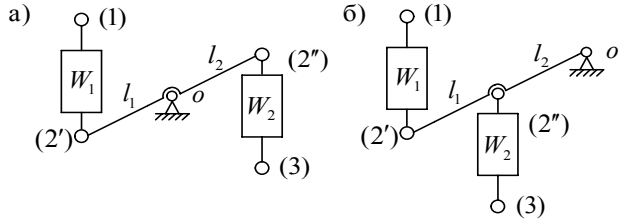


Рис. 14. Рычаг второго рода (*а*) и рычаг первого рода (*б*) в соединении типовых звеньев

Если сравнить соединения на рис. 12 и рис. 14, *а*, *б*, то можно отметить, что они будут различными; можно сделать предположение о «закреплении» точки опоры на одном из элементов системы, который входит в общую схему; наконец, можно рассматривать соединение с рычагом, у которого «точка опоры» будет скользящей (как при колебаниях твердого тела в виде балки, расположенного на двух опорах).

На рис. 15, *а* представлен один из вариантов введения рычажного звена (рычаг 2-го рода), а на рис. 15, *б* – показана расчетная схема, включающая упругие и массовые элементы, обеспечивающие включение связки W_1, W_2 в колебательную систему.

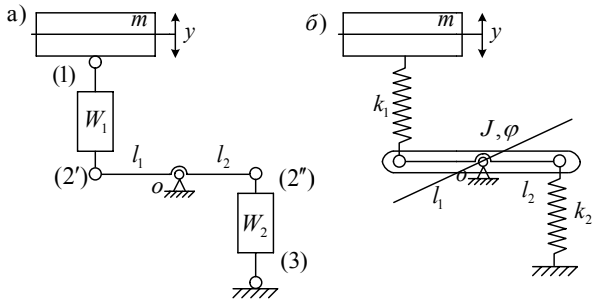


Рис. 15. Расчетные схемы последовательного соединения W_1 и W_2 через рычажное звено: *а*) общий случай; *б*) W_1 и W_2 являются упругими элементами

Предлагая общий способ учета свойств рычажного соединения, будем полагать, что рычаг обладает моментом инерции J и может совершать угловые движения φ. Используя уравнение Лагранжа II рода и полагая, что сила P приложена к массе, получим уравнения движения в виде

$$\begin{cases} m\ddot{y} + k_1 y - k_1 l_1 \varphi = P, \\ J\ddot{\varphi} + (k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2)\varphi - k_1 l_1 y = k_2 l_2. \end{cases} \qquad (7)$$

Если принять $J = 0$ (то есть рычаг будет невесомым), тогда при учете

$$\varphi = y \frac{k_1 k_2 l_1^2}{k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2},\ i = \frac{l_2}{l_1}, \qquad (8)$$

получим

$$m\ddot{y} + y \frac{k_1 k_2 i^2}{k_1 + k_2 i^2} = 0. \qquad (9)$$

Из (9) следует, что дополнительное соединение в виде рычага второго рода, имеющее передаточное отношение i, эквивалентно введению в систему новой пружины, но уже с другой жесткостью $k_2 i^2$. Из этого следует, что введение рычага не меняет характера изначального соединения, элементы взаимодействуют последовательно в

соответствии с (6), но рычаг изменяет приведенную жесткость. Если $i=1$, то введение рычага не меняет приведенную жесткость, но позволяет разнести в пространстве точку соединения двух элементов k_1 и k_2. При $i=0$ ($l_2=0$) – исходная система вырождается, также как при $i=\infty$ ($l_1=0$). Таким образом, пределы изменения i определяются условиями $0<i<\infty$ (но $i\neq 0$ и $i\neq\infty$).

Определение приведенной жесткости, которая формируется как последовательное соединение пружины k_1 и k_2 с точкой ($2^{/}$) и ($2^{//}$), разнесенными безынерционным рычагом первого рода, дает выражение такого же типа, что и для рычага второго рода. При этом, если $i=1$, то рычаг не вносит ничего особенного по сравнению с обычным последовательным соединением. Если $i=0$, то и $l_2=0$, что соответствует соединению k_2 с неподвижной точкой и соединение становиться невозможным. Если $i>0$, то физически это означает перенос точки ($2^{//}$) влево, что не изменит качественной картины результатов.

Таким образом, использование безынерционного рычага второго или первого рода для разноса точек соединения элементов W_1 и W_2 (точки ($2^{/}$) и ($2^{//}$)), не меняет типа соединения, то есть последовательный тип соединение остается, однако выражение для приведенной характеристики соединения будет включать передаточные коэффициенты рычага.

Авторами предложен обобщенный подход, в котором рычаг рассматривается с опорной точкой взятой на звене, примеры таких соединений приведены на рис.16.

Звено балочного типа имеющее массу и момент инерции (M и J), представляющее собой весомый рычаг на упругих опорах k_1 и k_2, может быть приведено к упрощенной расчетной схеме в виде стержня, имеющего точку опоры в центре тяжести, при этом

$$K_{\text{пр}}=\frac{k_1k_2(1+i)^2}{k_1\left(1+Q\right)+k_2\left(i^2+Q\right)}, \qquad (10)$$

где $Q=\dfrac{J}{Ml_1^2}$, $i=\dfrac{l_2}{l_1}$.

На основе проведенных исследований, можно сделать вывод, что, если рычаг обладает массой и моментом инерции, то в таком виде он представляет собой обычную расчетную схему механической колебательной системы в виде твердого тела на двух упругих опорах. В этом случае «как бы» стирается грань между последовательным и параллельным соединением, если приложение силы, соотносится с ее действием на плечо рычага между точками разнесения ($1^{/}$), ($1^{//}$), ($2^{/}$) и ($2^{//}$) (точка *E* на рис.17).

Однако полученные результаты имеют практическое значение, поскольку развиваемый подход, позволяет внести в рассмотрение детали взаимодействия, определяемые характером накладываемых связей, реализуемых через механические звенья, механические цепи. Последнее имеет значение для более полного учета особенностей конструктивных и динамических свойств колебательных систем, когда определяются для практических целей их динамические характеристики.

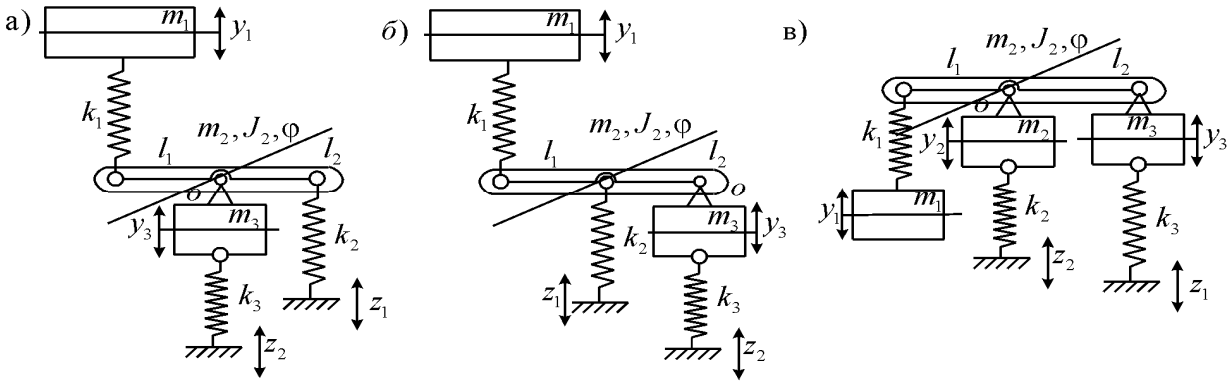


Рис. 16. Рассмотрены схемы колебательных систем с рычагами, точки опоры которых, принадлежат другим элементам (во всех вариантах точка опоры помещается на элемент массы): а) опора на элементе массой m_3 ; б) опора на элементе массой m_3 ; в) опора на элементе массой m_2

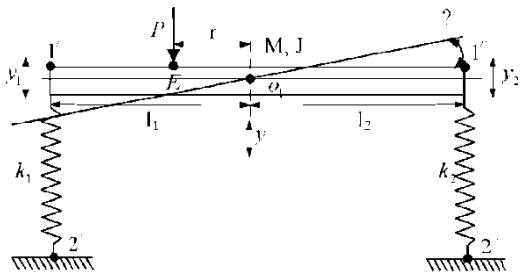


Рис. 17. Расчетная схема для определения силовых нагрузок в точка ($1^{/}$) и ($1^{//}$)

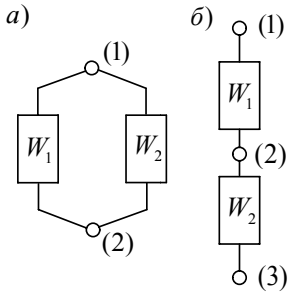


Рис.18. Два вида типовых соединений: параллельное (*а*) и последовательное (*б*)

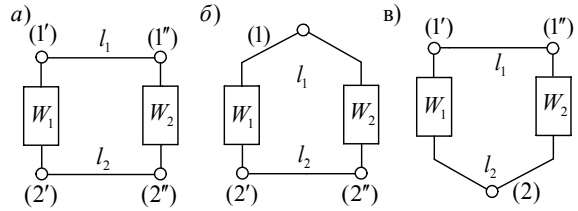


Рис. 19. Возможные формы соединений в точке 2 при введении промежуточной связи: задействованы точки 1 и 2 (*а*); задействована точка 2 (*б*); задействована точка 1 (*в*)

При параллельном соединении [15], если иметь в виду рычажное соединение, то схема на рис. 18, *а*, преобразуется к виду, как показано на рис. 19, *а, б, в*. «Разнос» точек на рис. 19, *а, б, в* обеспечивается безынерционным (в данном случае) рычагом, который не имеет точки опоры. Однако такая связь может быть реализована, если элементы W_1 и W_2, будут вводить в структуру точки $1'$, $1''$, $2'$, $2''$, которые обеспечат определенное количество связей, позволяющих, в том числе, ввести в рассмотрение рычаг с инерционными свойствами.

Если рассматривать соединения, приведенные на рис. 18, *а, б*, то параметры элемента при «сворачивании» схемы определяться при параллельном соединении:

$$W = W_1 + W_2, \qquad (11)$$

при последовательном -

$$W = \frac{W_1 W_2}{W_1 + W_2}, \qquad (12)$$

а точка (2) уходит в сворачиваемую схему. При этом схема с введением рычага в последовательное соединение имеет вид в соответствии с рис. 13.

Рассмотрено параллельное соединение, его возможные трансформации при введении рычажных соединений, как это показано на рис. 20, *а-ж*.

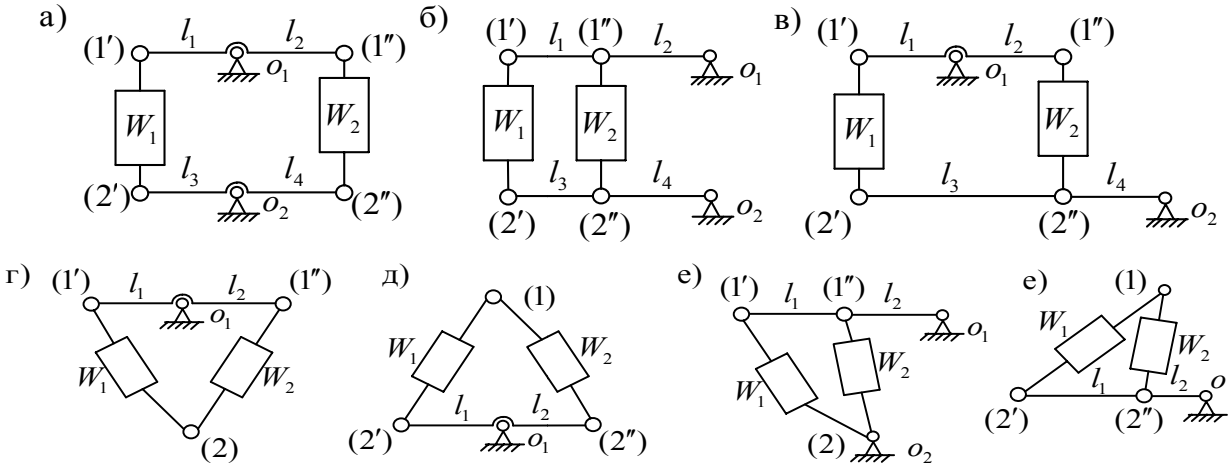


Рис. 20. Возможные формы параллельного соединения W_1 и W_2 при использовании невесомого стержня (рычага) с опорой на неподвижное основание: а) точки 1 и 2 «разносятся» рычагом 2-го рода; б) точки 1 и 2 «разносятся» рычагами 1-го рода; в) точка 1 «разносится» рычагом 2-го рода, точка 2 – рычагом 1-го рода; г) точка 1 «разносится» рычагом 2-го рода, в точке 2 – обычное соединение; д) точка 2 «разносится» рычагом 2-го рода, в точке 1 – обычное соединение; е) точка 1 «разносится» рычагом 1-го рода, в точке 2 – обычное соединение; ж) точка 2 «разноситься» рычагом 1-го рода, в точке 1 – обычное соединение

Безусловно, наличие необходимой точки опоры для звена, реализующего функцию соединения, изменяет «качество» соединения, которое находит соответствующее отображение в динамических свойствах системы, в целом. Однако, при определенных обстоятельствах – симметричность рычага, совпадение точек соединения, обычный вид параллельного соединения можно рассматривать как частный случай предлагаемого подхода. Обратим внимание на одну характерную деталь соединения, которое привносит не только масштабное изменение взаимодействия элементов W_1 и W_2 (масштабирование), но и в определенных условиях – изменение знака. Учет инерционных свойств элемента, реализующего функцию соединения элементов, приводит к иным схемам взаимодействия, которые, существенным образом, изменяют динамические свойства системы, однако, принимая массоинерционные параметры, равные нулю, можно получить рассмотренные на рис. 20, *а-ж* ситуации, как частные случаи. Учет массоинерционных свойств рычага позволяет ввести в рассмотрение еще одну характерную деталь, которая связана с предположением о существовании скользящей точки опоры рычага. В таком случае реализация функции параллельного соединения двух звеньев может осуществляться без связи с неподвижным основанием. В этом случае основной параметр рычага – передаточное отношение будет иметь отличные от невесомого стержня, зависящие от частот взаимодействия характеристики. Для весомого рычага, как твердого тела в виде балки, обладающего массой M и соответствующим моментом инерции, необходимо особое внимание уделять возможностям физической осуществимости условий

$$J \neq 0,\ M = 0;\ J = 0,\ M \neq 0;\ J \neq 0,\ M \neq 0;\ J = 0,\ M = 0. \qquad (13)$$

И, наконец, точка опоры невесомого стержня (рычага) и весомого (в том числе) может быть связана не с неподвижным основанием, а с точкой соединения от другого элемента системы. Например, точка опоры может принадлежать пружине (упругий элемент), промежуточной массе, в свою очередь, опертой на упругий элемент и т.д.

В работе [16] представлены материалы по детализированию расчетных схем, представленных на рис. 20.

4. Рычажные связи в задачах виброзащиты машин и оборудования. Рассмотрены некоторые возможные приложений на примере расчетных схем систем амортизации и рессорного подвешивания с несколькими степенями свободы [17].

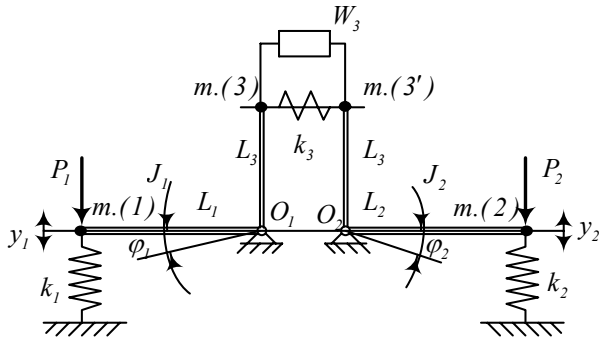


Рис. 21. Расчетная схема рабочего блок виброзаглаживающей технологической машины

На рис. 21.приведена расчетная схема для рабочего блока технологической машины для вибрационного заглаживания бетонных поверхностей, на рис. 22 – соответствующая структурная схема, с использованием которой получено выражение для передаточной функции. В этом выражении отражено введение в «створ» рычажных механизмов элементарного звена расширенного набора двойного дифференцирования ($W_3 = Lp^2$).

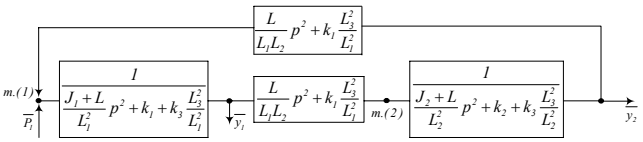


Рис. 22. Структурная схема системы с учетом введения дополнительной связи

На рис. 23 рассмотрена расчетная ВЗС с рычажными связями для защиты приборного оборудования [18]. Если принять рычажную схему ВЗС в виде, как показано на рис. 23, то кинетическая энергия системы будет определяться выражением

$$T = \frac{1}{2}m\dot{x}^2 + \frac{1}{2}m_1\dot{x}_1^2 + \frac{1}{2}m_2\dot{x}_2^2, \qquad (14)$$

а потенциальная энергия соответственно –

$$\Pi = \frac{1}{2}k_1\left(x_1 - y_1\right)^2 + \frac{1}{2}k_2\left(x_2 - y_2\right)^2 + \frac{1}{2}k\left(l_1\varphi_1 - l_2\varphi_2\right)^2. \qquad (15)$$

Получены дифференциальные уравнения движения в системе координат x, x_1, x_2 (при $l_1 = l_1^{/}$, $l_2 = l_2^{/}$):

$$\begin{aligned} &m\ddot{x} + kx + kx_1 + kx_2 = P, \\ &m_1\ddot{x}_1 + \left(k_1 + k\right)x_1 - 2kx_2 + kx = k_1y_1, \\ &m_2\ddot{x}_2 + \left(k_2 + k\right)x_2 - 2kx_1 + kx = k_2y_2. \end{aligned} \qquad (16)$$

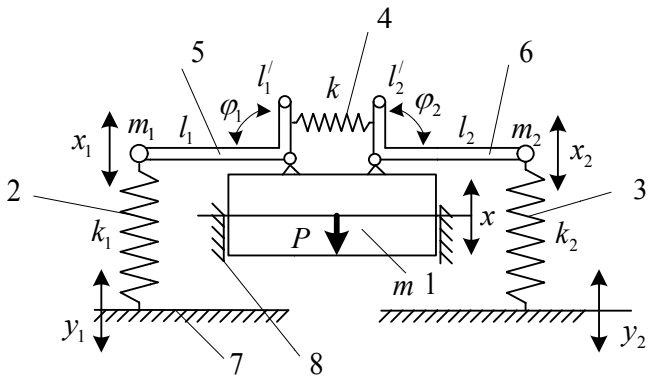


Рис. 23. Расчетная схема ВЗС с рычажными связями: объект защиты – 1, пружины – 2,3, соединительная пружина – 4, Г-образный рычаг – 5,6, основание – 7

При силовом возмущении и параметрах $k_1 = k_2 = k$ и $m_1 = m_2 = m$ частота динамического гашения определяется выражением

$$\omega_{дин}^2 = 4\frac{k}{m}. \qquad (17)$$

Для оценки физической реализуемости режима динамического гашения исследовано частотное уравнение числителя передаточной функции $\overline{x} / \overline{P}$, получены ограничения на соотношения между жесткостями k_1, k_2 и k. При кинематическом возмущении ($\overline{x} / \overline{y}$) частота динамического гашения определяется выражением

$$\omega_{дин}^2 = \frac{2k_1k_2 + 3k\left(k_1 + k_2\right)}{m_2k_1 + m_1k_2}. \qquad (18)$$

Рассмотрена система координат x, φ_1 и φ_2, в частности, показана возможность реализации при силовом возмущении существование двух режимов динамического гашения. Особенности расчетной схемы на рис. 23, связаны с введение системы Г – образных рычагов, которые привносят в структуру схемы ряд характерных деталей, которые зависят от выбора системы обобщенных координат. Если принять в расчет систему координат x_1, x_2, x_3, то парциальные системы или парциальные блоки имеют упругие связи, что предполагает обязательное взаимодействие парциальных систем (в координатах x_1, x_2, x_3) при любой частоте динамического гашения. Однако, режимы динамического гашения в виброзащитной системе могут быть созданы как при силовом, так и кинематическом возмущениях.

Выбор другой системы координат (x, φ_1 и φ_2) не изменяет значений частот собственных колебаний, однако меняет вид парциальных систем или парциальных блоков. В этом случае перекрестная связь между разными блоками становятся также разными: имеются и инерционно-упругие связи, которые могут «зануляться» на определенных частотах. Важным для нас обстоятельством является возможность, также создавать режимы динамического гашения при кинематическом и силовом возмущениях. Изменение значений частот динамического гашения в обычной ситуации связано с соответствующим выбором упругостей (k_1, k_2) и масс (m_1, m_2) настроечных элементов. В тех случаях, когда Г – образный рычаг не является равноплечим, появляется возможность в качестве настроечного параметра использовать так же передаточные отношения длин рычагов.

Одним из вариантов расширения динамических возможностей, вполне реализуемых, является установка устройства для преобразования движения Lp^2 параллельного упругому звену с жесткостью k. Такой прием изменяет форму соотношений, определяющих частоты динамического гашения, вид передаточных функций и частотное уравнение системы.

Исследования показали, что при введении дополнительного устройства в виде звена двойного дифференцирования с передаточной функцией Lp^2 возможны режимы динамического гашения и резонанса, реализуемые при определенном выборе параметров системы; для оценки устойчивости использованы критерии Рауса-Гурвица.

Сама по себе идея рассмотрения динамики сочленения твердых тел (типа велосипедные цепи или гусеничные трактора) представляются достаточно перспективной, поскольку открывает возможности к изучению волновых процессов в динамике систем с сосредоточенными параметрами. Методологическая основа развития единого подхода, заключается в детальном изучении динамических свойств базовых структур, из которых возможно построение более сложных образований.

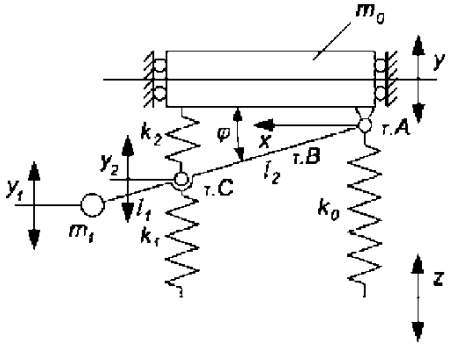


Рис. 24. Расчетная схема системы с сочлененными телами

Для системы, приведенной на рис. 24 составлена система дифференциальных уравнений движения, получены структурные схеме, определены передаточные функции. В частности, при силовом возмущении частота динамического гашения определяется выражением

$$\omega^2_{динР} = a\frac{k_1+k_2}{m}, \qquad (19)$$

где $a = \frac{l_2}{L} = \frac{l_2}{l_1+l_2}$ является настроечным параметром. В то же время при кинематическом возмущении

$$\omega^2_{дин} = \frac{a^2\left[k_0\left(k_1+k_2\right)+k_1k_2\right]}{m_1\left[k_1\left(1-a\right)+k_0\right]}. \qquad (20)$$

При $a=1$ имеем соответственно –

$$\omega^2_{дин} = \frac{k_1+k_2}{m_0}, \omega^2_{дин} = \frac{k_0\left(k_1+k_2\right)+k_1k_2}{m_1k_0}. \qquad (21)$$

Проведены исследования в других системах координат и видах возмущений, получены условия обеспечения устойчивости в виде

$$b^2 - 4cm_0m_1 > 0,$$

где $b = m_1\left(k_0+k_1-2ak_1^2\right)+a^2\left(k_1+k_2\right)m_0$,

$c = a^2\left(k_1k_0+k_2k_0+k_1k_2\right)$.

В системах балочного типа могут использоваться рычажные механизмы, однако их возможности как «настроечных» средств зависят от обеспечения устойчивости работы системы в целом. При определенном наборе параметров возможно появление условий для циклических движений. Для обеспечения устойчивости такого рода систем, авторами используются рычажно-зубчатые связи, как показано на рис. 25.

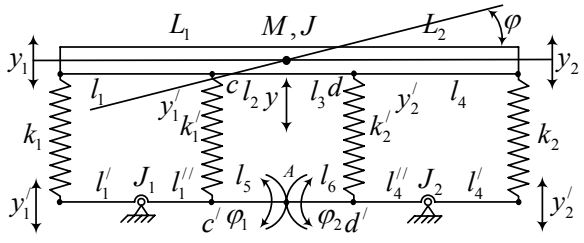


Рис. 25. Расчетная схема зубчатого соединения в схеме балочного типа в учетом введения элементов обеспечивающих устойчивость

Рассмотрены особенности динамических свойств колебательных систем с рычажными связями второго и первого родов [19]. Выявлено, что рычажные связи первого и второго рода поразному влияют на динамические свойства системы, поскольку реализуют различные виды обратных связей. Передаточное отношение рычага имеет знак и величину, что предопределяет значения этих параметров для оценки зон устойчивой работы. Рычажные связи второго рода вносят отрицательную связь, однако, область устойчивости работы требует отдельного рассмотрения. При рычажных связях первого рода при определенных сочетаниях параметров возможны режимы неустойчивости, так как в систему вводятся положительные связи.

Экспериментальные исследования, проведенные профессором Рябовым И.М. на опытных образцах, разработанных в Волгоградском государственном техническом университете, подтвердили результаты, полученные авторами при теоретических исследованиях, и показали принципиальную работоспособность предлагаемых технических решений[20].

На основе проведенных исследований могут быть сделаны следующие основные выводы:

1. Разработаны научно-методологические основы расширения элементной базы механических колебательных систем за счет введения элементарных звеньев двойного дифференцирования и рычажных связей. Последние обладают особыми связями, которые автор определяет функциями преобразования сигнала и координацией соединений элементарных звеньев.

2. Показано, что расширение типового набора элементарных звеньев, то есть добавление к пружинам и демпферам ряда других звеньев с передаточными функциями интегрирования, дифференцирования и запаздывания основано на общих свойствах этих звеньев – преобразование смещения в усилие, что предполагает свои правила коммутации в соединениях и возможности комбинационных построений.

3. Разработана научно-обоснованная методика построения механических цепей и структурных образований колебательных систем на основе редукции выражения передаточной функции общего вида цепи дополнительной обратной связи. Последняя, как показано авторами, может рассматриваться как обобщенная пружина. Такая пружина при малых и высоких частотах по своим свойствам близка к последовательно и параллельно соединенным пружинам, однако, в других условиях зависит от частоты внешнего воздействия и обладает свойствами открытия и запирания.

4. В дополнительных цепях, состоящих из колебательных структур, которые включаются параллельно основной пружине, в базовой схеме виброзащитной системы при кинематических возмущениях возможно появление эффектов дейст-

вия скрытых сил, соответствующих «скрытым силам» в вибрационной механике, что вызывается действием переносных сил инерции.

5. Предложен и разработан метод структурных преобразований последовательных и параллельных соединений элементов расширенного типового набора на основе технологии «расщепления» точки соединения двух звеньев, что позволило развить теоретическую базу для оценки спектра возможных свойств, привносимых в колебательные системы рычажными связями.

6. Показано, что рычажные механизмы первого и второго родов, вводимые в механические колебательные системы, изменяют свойства систем существенным образом, поскольку вносят, в зависимости от обстоятельств, дополнительные обратные связи положительной или отрицательной природы. Такие свойства проявляются в возможности потери устойчивости системы, появлении режимов движения с циклическими координатами. В общем случае рычажные связи с учетом их собственных инерционно-массовых свойств и динамических возможностей элементов расширенного набора позволяют получать дополнительные режимы динамического гашения при различных схемах внешнего нагружения.

7. Разработаны структурные методы динамического синтеза механических колебательных систем различного типа с рычажными механизмами для использования в задачах виброзащиты и виброизоляции машин и оборудования, в частности, для использования в задачах виброзащиты приборного оборудования и транспортной динамики; обосновано использование для обеспечения устойчивости движения в системах балочного типа зубчатых механизмов для связи парциальных систем. Показано, в целом, что динамические свойства рычажных связей обладают избирательностью к выбору параметров формирования пространственных форм расположения элементов виброзащитных систем, а физическая реализация возможностей эффективной работы требует соответствующих методов предварительной оценки необходимых и достаточных условий устойчивости.

8. Рычажные связи могут выступать инструментом настройки динамического состояния виброзащитных систем в плане обеспечения возможностей появления новых динамических режимов, таких как дополнительные формы динамического гашения, комбинационные эффекты, запирание, разнесение точек крепления элементов и наблюдении, и т.д., а также влиянием на перекрестные связи, возникающие в системах с несколькими степенями свободы. Отмечено, что рычажные связи приводят к несимметричным формам инерционно-упругих матриц.

9. Автором проведены экспериментальные исследования на примерах автомобильных амортизаторов с рычажными преобразователями относительного движения. Эксперимент подтвердил работоспособность конструктивных решений и правомерность результатов, полученных теоретическими исследованиями. Вместе с тем, эксперимент показал большое влияние на работу конструкций, приближенных к реальным условиям, нелинейных свойств, проявляющихся при взаимодействии элементов в относительном движении, в частности, сухого трения.

Заключение. Проведенные исследования позволяют ввести, при рассмотрении динамики взаимодействий между элементами в механических колебательных системах, новое понятие – **«Рычажные связи» (“lever ties”)**. При исследовании механических колебательных систем с пространственным расположением элементов системы (пружины, демпферы и др.) в математические модели могут быть введены отношения расстояний между координатами приложений усилий звеньев и координатами точек закрепления относительно неподвижной системы отсчета. Такие отношения длин и плеч авторы называют «рычажными связями», так как отношения длин или расстояний между точками по существу совпадают с передаточным отношением рычагов или рычажных механизмов. Рычажные связи обладают свойствами рычагов или рычажных механизмов (изменение знака, масштабирование и др.), но, по сравнению с классическим определением последних, рычажные связи являются обобщенным понятием, так как формируют пространственную геометрию взаимодействий между элементами в механических колебательных системах.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Отчет по НИР «Разработка математических моделей и методов мехатроники в задачах транспортной динамики» (№ ТН-08-05М от 06.06.2008). ИрГУПС. Иркутск, 2008. – 108с.
2. Елисеев С.В. Структурная теория виброзащитных систем. – Новосибирск: Наука, 1978. – 224с.
3. Генкин М.Д., Рябой В.М. Упруго-инерционные виброизолирующие системы. Предельные возможности, оптимальные структуры. – М.: Наука,1988. – 191с.
4. Говердовский В.И. Развитие теории и методов проектирования машин с системами инфрачас-

тотной виброзащиты // Автор. дисс. на соискание уч. ст. д.т.н. Сибирский государственный ун-т путей сообщения. Новосибирск, 2006. – 42 с.
5. Елисеев С.В., Резник Ю.Н., Хоменко А.П., Засядко А.А. Динамический синтез в обобщенных задачах виброзащиты и виброизоляции технических объектов. – Иркутск: Изд-во Иркутского государственного университета,2008. – 523 с.
6. Вагоны: проектирование, устройство и методы испытания / Л.Д. Кузьмин, Л.В. Кузнецов, Б.А. Ржавинский и др.// Под ред. Л.Д. Кузьмина. – М.: Машиностроение, 1978. – 376с.
7. Лазарян В.А. Динамика вагонов. Устойчивость движения и колебания. – М.: Транспорт, 1964. – 256с.
8. Упырь Р.Ю. Динамика механических колебательных систем с учетом пространственных форм соединения элементарных звеньев // Дисс. на соискание уч. ст. к.т.н. Иркутский гос. ун-т. путей сообщения. – Иркутск, 2009. – 189с.
9. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин. – М.: Изд-во «Наука», 1975. - 638с.
10. Конструирование и расчет рычажно-шарнирных средств виброзащиты оборудования и агрегатов железнодорожного транспорта / В.И. Варгунин, В.И. Гусаров, Б.Г. Иванов, А.С. Левченко и др.; Под ред. О.П. Мулюкина. – Самара: СамГАПС, 2006. – 86с.
11. Елисеев С.В., Упырь Р.Ю. Мехатронные подходы в задачах вибрационной защиты машин и оборудования // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - Иркутск, 2008. –№ 4 (20). – С. 8-16.
12. Упырь Р.Ю. Обоснование возможностей расширения элементной базы колебательных систем// Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - Иркутск, 2009. –№ 2 (22). – С. 123-127.
13. Елисеев С.В., Упырь Р.Ю. Рычажные связи в передаче механических воздействий // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - Иркутск, 2007 - №2 (14). - С. 38-46.
14. Елисеев С.В., Упырь Р.Ю. Рычажные механизмы в системах балочного типа // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - Иркутск, 2008 - №1 (17). - С. 23-33.
15. Упырь Р.Ю., Засядко А.А. Возможные представления параллельных и последовательных соединений в структурных интерпретациях механических колебательных систем / Решетневские чтения: материалы XI междунар. науч. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева (6-10 нояб.2007, г.Красноярск) / под общ. ред. И.В. Ковалева; Сиб.гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2007. – С. 264-265. ISSN 1990-7702.
16. Елисеев С.В., Упырь Р.Ю. Особенности параллельных соединений в механических цепях // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - Иркутск. - №2 (14). - 2007. – С. 102-113.
17. Ситов И.С., Упырь Р.Ю. Возможности динамического гашения колебаний в конструктивных вариантах рабочих блоков виброзаглаживающих технологических машин. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - Иркутск, 2009. –№ 1 (21). – С. 67-70.
18. Упырь Р.Ю., Елисеев С.В., Хоменко А.П., Ермошенко Ю.В. Динамический гаситель колебаний: Патент на полезную модель №82802 РФ F16F1500 от 22.12.08 , опубл. 10.05.09. Бюл. №13.
19. Хоменко А.П., Елисеев С.В. Устойчивость колебаний в двумерных системах с нетрадиционными связями// Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - Иркутск, 2009. –№ 2 (22). – С. 8-12.
20. Рябов И.М., Воробьев В.В., Упырь Р.Ю., Логунов А.С., Насников Д.Н. Экспериментальные исследования амортизирующих устройств транспортных средств // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - Иркутск, 2009. –№ 2 (22). – С. 81-84.

Асламова В. С., Мусева Т. Н.

УДК 519.6

РАЗНОСТНЫЕ СХЕМЫ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА В ПЕРЕМЕННЫХ «ФУНКЦИЯ ТОКА – ВИХРЬ» И ИХ РЕШЕНИЕ МЕТОДОМ ПРОГОНКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДРОБНЫХ ШАГОВ

Закрученные потоки нашли широкое применение в технических устройствах для интенсификации тепломассообменных и сепарационных процессов в поле действия центробежных сил (сушка дисперсных материалов, обеспыливание воздуха, энергоразделение в трубках Ранка и т. д.). Будем рассматривать закрученные потоки, в которых завихренность первоначально создается при помощи аксиального лопаточного аппарата, установленного на входе в прямоточный циклон. В работе исследуется течение, в котором завихренность постепенно уменьшается по мере продвижения вниз по потоку. В отечественной литературе уровень начальной завихренности определяется заданием величины $K = w_{\max} / u_{\max}$, где $w_{\max}, u_{\max}$ – максимальные тангенциальная и осевая компоненты скорости в аппарате [1].

Большинство технических устройств (циклоны, турбомашины, компрессоры, насосы) являются телами вращения, имеющими ось симметрии. Поэтому течения, рассматриваемые в этих устройствах, являются осесимметричными. Задача экспериментального измерения компонент скорости потока в циклонных пылеуловителях трудно реализуема на практике из-за конструктивных особенностей циклона (малая величина кольцевого зазора сепарационной камеры), отсутствия доступных и надежных измерительных приборов. Получим компоненты скорости потока в результате численного решения задачи об осесимметричном закрученном течении газопылевого потока.

Осесимметричное движение с вращением описывается системой уравнений Навье-Стокса в частных производных, аналитическое решение которых затруднено из-за их нелинейности. Для решения таких задач применяется «явный» и «неявный» метод установления [2]. Этот метод упрощает решение многих стационарных задач математической физики, описывающих равновесные состояния, интерпретируемые как результат развивающегося во времени процесса. Идея решения стационарных задач методом установления состоит в том, что вместо стационарной задачи можно решать нестационарную задачу до того времени, пока ее решение перестает меняться в пределах интересующей нас точности.

В нашей работе уравнения движения были аппроксимированы центральными разностями, решались методом прогонки [3] с использованием метода дробных шагов (метод покомпонентного расщепления). Основой построения рассматриваемых схем является разбиение расчета на одном шаге по времени τ, т.е. перехода от i-го к i+1-му слою на отдельные этапы. Такие разностные схемы называют схемами расщепления или схемами дробных шагов. Одной из таких схем, используемых для решения задач при наличии двух пространственных переменных, является схема переменных направлений или продольно-поперечной прогонки. Суть этой схемы состоит в том, что шаг по времени τ делится на два полушага. На первом из них вторая производная по одной из координат аппроксимируется на промежуточном слое i+1/2, т. е. используется неявная аппроксимация; в этом случае вторая производная по другой переменной аппроксимируется на i-м слое, т.е. явно. На втором полушаге наоборот – неявная аппроксимация используется по другому направлению [3].

При постановке задачи расчета закрученного периодического течения газопылевого потока (жидкости) в сепарационной камере прямоточного циклона приняты следующие допущения: течение является всюду осесимметричным, что подразумевает отсутствие градиентов в окружном направлении и согласуется с работами [4, 5, 6]; гравитационная сила существенно меньше центробежной

[7]; жидкость является вязкой и несжимаемой; режим движения ламинарный. Следует заметить, что вблизи стенок циклона в пределах пограничного слоя концентрированный газопылевой поток можно считать вязкой несжимаемой жидкостью.

Тогда уравнения Навье-Стокса в цилиндрических координатах (x, r, φ) примут следующий вид [8]:

$$u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial r}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x}+\frac{\mu}{\rho}\Delta u,$$

$$u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial r}-\frac{w^2}{r}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial r}+\frac{\mu}{\rho}\left(\Delta v-\frac{v}{r^2}\right),$$

$$u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial r}+v\frac{w}{r}=\frac{\mu}{\rho}\left(\Delta w-\frac{w}{r^2}\right),$$

где $\Delta=\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}$ – оператор Лапласа, u, v, w – осевая, радиальная и окружная компоненты скорости, P – давление, μ – динамическая вязкость, ρ – плотность.

Решение будем искать для части цилиндрического корпуса прямоточного циклона (ПЦ), ограниченную сечениями AB и CD, перпендикулярными оси x (рис. 1). На участке EF изменяется закрутка потока с помощью механических устройств, различных сопловых ускорителей, за счет расширения или сужения потока. Интенсивность закрутки потока будем характеризовать локальным параметром закрутки, который приблизительно равен тангенсу угла наклона потока в области пристенного течения: $tg\varphi = w/u$ [9]. Для рассматриваемого циклона участок EF соответствует наличию промежуточного отбора (ПО) пыли. ПО оказывает существенное влияние на структуру закрученного потока и процесс сепарации пыли.

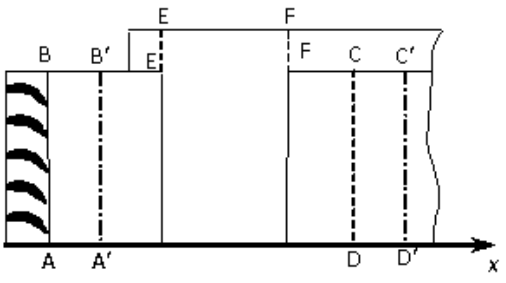


Рис. 1. Сепарационная камера ПЦ с промежуточным отбором пыли

Вследствие прилипания частиц жидкости к неподвижным стенкам циклона их осевая и радиальная компоненты скорости будут равны нулю. Это равносильно требованию равенства нулю нормальных и касательных производных функции тока на стенке. Тогда граничные условия запишутся следующим образом:

$u = 0$, $v = 0$, $w = w_0$ на BE и FC;

$u = 0$, $v = 0$, $w = w_1$ на EF;

$w_0 = \text{const}$, $w_1 = \text{const}$,

где w_0, w_1 – величины окружной компоненты скорости после аксиального лопаточного аппарата и промежуточного отбора соответственно.

Практически все сепарационные устройства являются симметричными, поэтому в качестве граничных условий на оси аппарата $(r = 0)$ используем соотношения: $\partial u/\partial r = 0$, $v = 0$, $w = 0$ на AD, что полностью согласуется с граничными условиями в работах [5, 10].Для рассматриваемых сечений AB и CD будем задавать условия периодичности, зависящие от периодической формы сечения канала. Для осевой компоненты скорости эти условия примут вид:

$$u(x_A, r, \phi) = u(x_D, r, \phi),\ \frac{\partial u(x_A, r, \phi)}{\partial x} = \frac{\partial u(x_D, r, \phi)}{\partial x}.$$

Аналогично записываются условия периодичности для радиальной и окружной компонент скорости.

Опыт численного решения уравнений газовой динамики, в том числе и уравнений Навье-Стокса, показывает, что лучшими разностными схемами являются дивергентные (консервативные) схемы, построенные на основе интегральных соотношений или уравнений движения в дивергентной форме. Для этих схем выполняются разностные законы сохранения. Это дает физически более обоснованный результат [2, 11]. Поэтому будем составлять уравнения для функций тока Ψ, вихря скорости Ω, момента импульса Φ в дивергентной форме.

Уравнение для момента импульса Φ единицы массы жидкости относительно оси симметрии x в дивергентной форме получаем из уравнения баланса для момента импульса на среднем радиусе r_{cp} элементарного объема в цилиндрических координатах $(\Delta x, \Delta r, \Delta\varphi)$ (рис. 2): $\left(\vec{r}\times\vec{u}\right)_x = w\cdot r = \Phi$.

Из закона сохранения момента импульса, согласно которому изменение момента импульса элементарного объема в единицу времени равно моменту приложенных сил, следует

$$\frac{d}{dt}\left(\rho\cdot\Delta x\cdot\Delta r\cdot r_{cp}\cdot\Delta\phi\cdot w\cdot r\right)=$$

$$=\tau_{1x\phi}\cdot r_{cp}^2\cdot\Delta r\cdot\Delta\phi-\tau_{2x\phi}\cdot r_{cp}^2\cdot\Delta r\cdot\Delta\phi+$$

$$+\tau_{3r\phi}\cdot r^2\cdot\Delta\phi\cdot\Delta x-\tau_{4r\phi}\cdot\Delta\phi\cdot\Delta x\cdot\left(r+\Delta r\right)^2,$$

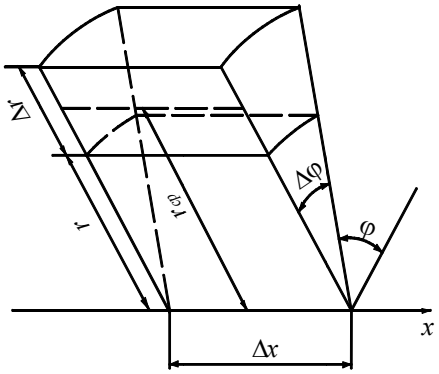


Рис. 2. Элементарный объем жидкости в цилиндрических координатах

где $\tau_{1x\varphi}$, $\tau_{2x\varphi}$ – касательные напряжения на гранях элементарного объема с абсциссой x и $x+\Delta x$; $\tau_{3r\varphi}, \tau_{4r\varphi}$ – касательные напряжения на криволинейных гранях радиусов r и $r+\Delta r$ элементарного объема.

Для установившегося движения элементарного объема единичной массы

$$\left[\left(u\cdot r_{cp}\cdot\Phi\right)_1-\left(u\cdot r_{cp}\cdot\Phi\right)_2\right]\cdot\Delta r\cdot\Delta\phi+$$
$$+\left[\left(v\cdot r\cdot\Phi\right)_3-\left(v\cdot r\cdot\Phi\right)_4\right]\cdot\Delta x\cdot\Delta\phi=$$
$$=\tau_{1x\phi}\cdot r_{cp}^2\cdot\Delta r\cdot\Delta\phi-\tau_{2x\phi}\cdot r_{cp}^2\cdot\Delta r\cdot\Delta\phi+$$
$$+\tau_{3r\phi}\cdot r^2\cdot\Delta\phi\cdot\Delta x-\tau_{4r\phi}\cdot\Delta\phi\cdot\Delta x\cdot\left(r+\Delta r\right)^2.$$

Разделив последнее уравнение на элементарный объем, и выполняя предельный переход при стремлении объема к нулю, получим

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(ru\Phi\right)+\frac{\partial}{\partial r}\left(rv\Phi\right)=\frac{\partial}{\partial x}\left(r^2\tau_{x\phi}\right)+\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\tau_{r\phi}\right).$$

Для приведения полученного уравнения к дивергентной форме используем связь компонент скорости с функцией тока и касательных напряжений с моментом импульса в цилиндрических координатах [12]:

$$u=1/r\cdot\partial\Psi/\partial r,\ v=-1/r\cdot\partial\Psi/\partial x, \qquad (1)$$
$$\tau_{r\phi}=\mu\cdot r\cdot\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{w}{r}\right)=\mu\cdot\left(\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial\Phi}{\partial r}-\frac{2\cdot\Phi}{r^2}\right),$$
$$\tau_{x\phi}=\mu\,\partial w/\partial x=\mu/r\cdot\partial\Phi/\partial x.$$

Перейдем к безразмерным координатам, выбрав в качестве масштабов среднерасходную скорость U потока в плане циклона и радиус сепарационной камеры циклона R: $u'=v_x/U$; $v'=v_r/U$; $w'=v_\varphi/U$; $x'=x/R$; $r'=r/R$. Для удобства далее везде штрихи будут опущены. Тогда дивергентная форма уравнения для момента импульса примет вид

$$\frac{1}{\mathrm{Re}}\cdot\left[r\frac{\partial^2\Phi}{\partial x^2}+\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial\Phi}{\partial r}-2\Phi\right)\right]-\frac{\partial}{\partial x}\left(\Phi\frac{\partial\Psi}{\partial r}\right)+$$
$$+\frac{\partial}{\partial r}\left(\Phi\frac{\partial\Psi}{\partial x}\right)=0, \qquad (2)$$

где $\mathrm{Re}=\rho UR/\mu$ - число Рейнольдса.

Дивергентная форма уравнения Ламба-Громеки для завихренности в случае несжимаемой жидкости запишется в форме:

$$-\vec{u}\times\vec{\omega}=-\nabla\left(\frac{1}{2}\vec{u}^2+P\right)-\frac{1}{\mathrm{Re}}\cdot\left(\nabla\times\vec{\omega}\right), \qquad (3)$$

где $\nabla=\vec{i}\frac{\partial}{\partial x}+\vec{j}\frac{\partial}{\partial r}+\vec{k}\frac{\partial}{\partial\varphi}$ - оператор Гамильтона. Применим к обеим частям уравнения (3) оператор *rot* и учитывая, что $rot\ grad\left(P+\vec{u}^2/2\right)=0$, получим

$$rot\left(\vec{u}\times\vec{\omega}\right)=1/\mathrm{Re}\cdot rot\ rot\ \vec{\omega}, \qquad (4)$$

где $rot\ \vec{\omega}=\nabla\times\vec{\omega}$.

В координатной форме уравнение (4) для окружной компоненты ω_φ угловой скорости ω имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(u\cdot\omega_\phi\right)+\frac{\partial}{\partial r}\left(v\cdot\omega_\phi\right)-\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}\left(w^2\right)=$$
$$\frac{1}{\mathrm{Re}}\left\{\frac{\partial^2\omega_\phi}{\partial x^2}+\frac{\partial}{\partial r}\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\cdot\omega_\phi\right)\right]\right\}, \qquad (5)$$

где компонента ω_φ характеризует вращение частиц относительно оси, которая имеет форму окружности (кольцевой вихрь). Вводя функции Ψ, Φ, $\Omega=\omega_\varphi/r$, после умножения уравнения (4) на Re/r, получим уравнение в дивергентной форме для определения функции Ω:

$$\frac{\partial^2\Omega}{\partial x^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\cdot\Omega\right)\right]-\frac{\mathrm{Re}}{r}\frac{\partial}{\partial x}\left(\Omega\frac{\partial\Psi}{\partial r}\right)+$$
$$+\frac{\mathrm{Re}}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\Omega\frac{\partial\Psi}{\partial x}\right)=-\frac{\mathrm{Re}}{r^4}\frac{\partial}{\partial x}\left(\Phi^2\right). \qquad (6)$$

Дивергентную форму уравнения для функции тока Ψ находим, исходя из связи окружной составляющей ротора с проекциями скорости $rot_\varphi u=\partial v/\partial x-\partial u/\partial r$, формул (1), введенного обозначения Ω:

$$-\frac{1}{r}\frac{\partial^2\Psi}{\partial x^2}-\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial\Psi}{\partial r}\right)=r\cdot\Omega. \qquad (7)$$

Умножив уравнение (7) на (-*r*), получим

$$\frac{\partial^2\Psi}{\partial x^2}+r\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial\Psi}{\partial r}\right)=-r^2\cdot\Omega. \qquad (8)$$

Зададим для уравнений (2), (6), (8) граничные условия. На оси симметрии $\partial\Psi/\partial x = 0$, следовательно, Ψ = const. Так как функция Ψ определяется с точностью до постоянной, то положим ее равной нулю $\Psi = 0$ на AD, условие прилипания: $\partial\Psi/\partial r = 0$ на BE и FC.

$$\left(\partial v/\partial x - \partial u/\partial r\right) = \omega_\varphi = r \cdot \Omega = 0 \text{ на AD;}$$

на неподвижном участке EF стенки промежуточного отбора в силу ее непроницаемости $\partial\Psi/\partial r = 0$, следовательно,

$$\Psi = \text{const} = 1 \text{ на BE, EF, FC,}$$

так как в качестве характерной скорости принята средняя скорость в плане циклона.

Граничные условия для функции Φ:

$\Phi = 0$ на AD,

$\Phi = R_0$ на BE, FC,

$\Phi = R_{01}$ на EF,

где R_0 – параметр закрутки, который определяет значение окружной компоненты скорости на входе в сепарационную камеру циклона после аксиального лопаточного аппарата, R_{01} – параметр раскрутки потока.

Условия периодичности на сечениях AB и CD для функции Ψ:

$$\Psi(x_A, r, \phi) = \Psi(x_D, r, \phi),$$
$$\partial\Psi(x_A, r, \phi)/\partial x = \partial\Psi(x_D, r, \phi)/\partial x.$$

Аналогично выглядят условия периодичности для функций Φ и Ω. На стенках циклона граничные условия для функции Ω можно не определять, так как фактически уравнение (8) является выражением функции Ω через функцию Ψ. Поэтому систему трех уравнений (2), (6), (8) можно свести к системе двух уравнений.

Постановка задачи течения вязкой несжимаемой жидкости в терминах «функция тока-вихрь» обладает той особенностью, что граничные условия задаются для функции тока, а не для вихря, который определен лишь внутри области [14]. Для преодоления этой трудности используем метод расчета граничных условий В.Н. Полежаева и В.Л. Грязнова, пригодный для стационарных и нестационарных задач и обладающий, в сочетании с неявными схемами переменных направлений, более быстрой сходимостью [14]. Согласно этому методу граничное условие для вихря будем ставить внутри основной области, отступив от входного сечения (границы) на один шаг. Поэтому введем вспомогательные сечения $A'B'$, $C'D'$, параллельные сечениям AB и CD (рис. 1). Тогда условия периодичности для функции Ψ запишутся:

$$\Psi(x_{A'}, r, \phi) = \Psi(x_{D'}, r, \phi),$$
$$\partial\Psi(x_{A'}, r, \phi)/\partial x = \partial\Psi(x_{D'}, r, \phi)/\partial x$$

Аналогично выглядят условия периодичности для функций Φ и Ω.

В меридиональной плоскости введем равномерную сетку с узлами

$$\omega_n = \left\{ \begin{array}{l} x_j = j \cdot \Delta x = j \cdot l;\ r_i = i \cdot \Delta r = i \cdot h; \\ i = 0,1,..,M+1; \\ j = 0,1,...,N+1; \\ l = \Delta x = \dfrac{1}{N+1};\ h = \Delta r = \dfrac{1}{M+1} \end{array} \right\}.$$

Здесь *h, l* – расстояние между соседними узлами сетки по осям *r* и *x* соответственно, *N+1, M+1* – число узлов по осям *r* и *x*.

Обозначив левые части уравнений (6), (2), (8) соответственно через $A\Omega$, $B\Phi$, $C\Psi$, и заменяя частные производные первого, второго порядка и смешанные производные центральными разностями по известным формулам на шаблоне «крест» [11, 13, 14], получим следующие разностные уравнения со вторым порядком точности относительно Δx и Δr:

$$A_h\Omega = -\frac{\mathrm{Re}}{r^4} \cdot \left(\Phi^2\right)_x^0;\ B_h\Phi = 0;\ C_h\Psi = -r^2 \cdot \Omega,$$

где $\left(\Phi^2\right)_x^0 = (\Phi^2_{i.,j+1} - \Phi^2_{i.,j-1})/(2\Delta x)$.

Расписывая операторы $A_h\Omega$, $B_h\Phi$, $C_h\Psi$, получим:

$$A_h\Omega = \frac{\Omega_{i,j+1}}{l^2} - \frac{2\Omega_{i,j}}{l^2} + \frac{\Omega_{i,j-1}}{l^2} + \frac{(i+1)^2}{h\left(i+1/2\right)}\Omega_{i+1,j} -$$
$$- \frac{2i^3\Omega_{i,j}}{h\left(i^2-1/4\right)} + \frac{(i-1)^2}{h\left(i-1/2\right)}\Omega_{i-1,j} + \frac{\mathrm{Re}}{4ih^2l}[\Omega_{i,j-1} \times$$
$$\times\left(\Psi_{i+1,j-1} - \Psi_{i-1,j-1}\right) - \Omega_{i,j+1}\left(\Psi_{i+1,j+1} - \Psi_{i-1,j+1}\right) +$$
$$+\Omega_{i+1,j}\left(\Psi_{i+1,j+1} - \Psi_{i+1,j-1}\right) - \Omega_{i-1,j}\left(\Psi_{i-1,j+1} -$$
$$-\Psi_{i-1,j-1}\right)] = -\frac{\mathrm{Re}}{2i^4h^4l}\left(\Phi^2_{i.,j+1} - \Phi^2_{i.,j-1}\right);$$

$$B_h\Phi = \frac{\Phi_{i,j+1}}{l^2} - \frac{2\Phi_{i,j}}{l^2} + \frac{\Phi_{i,j-1}}{l^2} + \frac{(i-1/2)}{ih^2}\Phi_{i+1,j} -$$
$$- \frac{2\Phi_{i,j}}{h^2} + \frac{(i+1/2)}{ih^2}\Phi_{i-1,j} + \frac{\mathrm{Re}}{4ih^2l}[\Phi_{i,j-1}\left(\Psi_{i+1,j-1} -$$
$$-\Psi_{i-1,j-1}\right) - \Phi_{i,j+1}\left(\Psi_{i+1,j+1} - \Psi_{i-1,j+1}\right) + \Phi_{i+1,j} \times$$
$$\times\left(\Psi_{i+1,j+1} - \Psi_{i+1,j-1}\right) - \Phi_{i-1,j}\left(\Psi_{i-1,j+1} - \Psi_{i-1,j-1}\right)] = 0;$$

$$C_h\Psi=\frac{\Psi_{i,j+1}}{l^2}-\frac{2\Psi_{i,j}}{l^2}+\frac{\Psi_{i,j-1}}{l^2}+\frac{i\Psi_{i+1,j}}{h^2(i+1/2)}+$$

$$+\frac{i}{h^2(i-1/2)}\Psi_{i-1,j}-\frac{2i^2}{h^2(i^2-1/4)}\Psi_{i,j}=-h^2i^2\Omega_{i,j}.$$

Здесь полуцелые индексы относятся к центру соответствующей ячейки, а целые – к ее граням.

Граничные условия будем задавать в соответствии с поставленной задачей:

$$\Psi_{0,j}=0;\ \Psi_{M+1,j}=1,\ \ j=0,1,...,N+1;$$

$$\Phi_{0,j}=0;\ \Phi_{M+1,j}=R_0,\quad \text{если}\quad j=0,1,...,L;$$

$$j=L_1,L_1+1,...,N+1$$

$$\Phi_{0,j}=0;\ \Phi_{M+1,j}=R_{01},\ \text{если}\ L<j<L_1.$$

Граничное условие для Ω задаем не на стенке циклона, а отступив от нее на один шаг сетки, учитывая условие прилипания $\Psi_{M+1,j}=1$:

$$\Omega_{M,j}=\left[\frac{2M}{\left(M^2-1/4\right)h^4}+\frac{2}{h^2M^2l^2}\right]\Psi_{M,j}-$$

$$-\frac{1}{M(M+1/2)h^4}-\frac{1}{M(M-1/2)h^4}\Psi_{M-1,j}-$$

$$-\frac{1}{h^2M^2l^2}\left[\Psi_{M,j+1}+\Psi_{M,j-1}\right].$$

Разложим функцию Ψ по формуле Тейлора в окрестности точки (M+1,j)

$$\Psi_{M,j}=\Psi_{M+1,j}-h\left(\frac{\partial\Psi}{\partial r}\right)_{M+1,j}+\frac{h^2}{2}\left(\frac{\partial^2\Psi}{\partial r^2}\right)_{M+1,j}+0(h^3) \tag{9}$$

$$\Psi_{M-1,j}=\Psi_{M+1,j}-2h\left(\frac{\partial\Psi}{\partial r}\right)_{M+1,j}+$$

$$+4\frac{h^2}{2}\left(\frac{\partial^2\Psi}{\partial r^2}\right)_{M+1,j}+0(h^3). \tag{10}$$

Умножив разложение (9) на 4, и вычтя из него разложение (10), получим

$$4\Psi_{M,j}-\Psi_{M-1,j}=3\Psi_{M+1,j}-2h\left(\frac{\partial\Psi}{\partial r}\right)_{M+1,j}.$$

С учетом условия $\left(\partial\Psi/\partial r\right)_{M+1,j}$=0, окончательно имеем

$$\Psi_{M,j}=0,25\left(3\Psi_{M+1,j}+\Psi_{M-1,j}\right). \tag{11}$$

Уравнение (8) для функции Ψ решается на полной сетке при условии $\Psi_{M+1,j}=1$ на стенке циклона, после чего на каждой итерации вводится поправка для функции Ψ по формуле (11), а затем вычисляется граничное условие для Ω. Особенность такой постановки граничного условия состоит в том, что условие прилипания реализуется на каждом временном шаге. При этом существенно, что условие прилипания и условие для функции Ω ставятся на разных границах, так как использование этих двух условий по одной и той же границе переопределяет нашу задачу и при численном решении может привести к снижению точности.

Из физических соображений, заключающихся в том, что величина осевой компоненты скорости намного превышает радиальную, было получено достаточное условие устойчивости используемых разностных схем: $\mathrm{Re}_h\le 2$, где сеточное число Рейнольдса $\mathrm{Re}_h=\max\{h\,\mathrm{Re}|u_x|, h\,\mathrm{Re}|u_r|\}$, при котором коэффициенты уравнения (14) неотрицательны и выполняется принцип максимума.

Запишем схему покомпонентного расщепления для неоднородной краевой задачи на основе схем Кранка-Николсона [2, 13]:

$$\frac{F^{n+1/2}-F^n}{\tau}=\frac{1}{2}\left(\lambda_1F^{n+1/2}+\lambda_2F^n+f\right), \tag{12}$$

$$\frac{F^{n+1}-F^{n+1/2}}{\tau}=\frac{1}{2}\left(\lambda_1F^{n+1/2}+\lambda_2F^n+f\right), \tag{13}$$

где τ - итерационный параметр, F – одна из функций Ω,Φ,Ψ, f – правые части разностных уравнений. Схема расщепления обладает вторым порядком аппроксимации по τ. Следует заметить, что в дискретном аналоге все физические величины определены только в узловых точках сетки. Следовательно, значение этих величин между узлами (что соответствует дробным индексам) определим на основе линейной интерполяции как среднее арифметическое их значений в соседних узловых точках:

$$F^{n+1/2}=\left(F^n+F^{n+1}\right)/2.$$

Запишем λ_1,λ_2,f для функции Ω:

$$\lambda_1=\frac{2\Omega_{i,j}}{l^2}+\Omega_{i,j+1}\left[\frac{\mathrm{Re}}{4ih^2l}\left(\Psi_{i+1,j+1}-\Psi_{i-1,j+1}\right)-\frac{1}{l^2}\right]+$$

$$+\Omega_{i,j-1}\left[\frac{-\mathrm{Re}}{4ih^2l}\left(\Psi_{i+1,j-1}-\Psi_{i-1,j-1}\right)-\frac{1}{l^2}\right];$$

$$\lambda_2=\frac{2i^2\Omega_{i,j}}{h^2\left(i^2-1/4\right)}+\Omega_{i-1,j}\left[\frac{\mathrm{Re}}{4ih^2l}\left(\Psi_{i-1,j+1}-\right.\right.$$

$$\left.\left.-\Psi_{i-1,j-1}\right)-\frac{(i-1)^2}{h^2\left(i-1/2\right)i}\right]+$$

$$+\Omega_{i+1,j}\left[\frac{-\mathrm{Re}}{4ih^2l}\left(\Psi_{i+1,j+1}-\Psi_{i+1,j-1}\right)-\frac{(i+1)^2}{h^2\left(i+1/2\right)i}\right];$$

$$f=-\frac{\mathrm{Re}}{2i^4h^4l}\left(\Phi^2_{i,j+1}-\Phi^2_{i,j-1}\right).$$

Для функции Φ:

$$\lambda_1 = \frac{2\Phi_{i,j}}{l^2} + \Phi_{i,j+1}\left[\frac{\mathrm{Re}}{4ih^2l}\left(\Psi_{i+1,j+1} - \Psi_{i-1,j+1}\right) - \right.$$

$$\left. - \frac{1}{l^2}\right] + \Phi_{i,j-1}\left[\frac{-\mathrm{Re}}{4ih^2l}\left(\Psi_{i+1,j-1} - \Psi_{i-1,j-1}\right) - \frac{1}{l^2}\right];$$

$$f = 0;$$

$$\lambda_2 = \frac{2\Phi_{i,j}}{h^2} + \Phi_{i+1,j}\left[-\frac{\mathrm{Re}}{4ih^2l}\left(\Psi_{i+1,j+1} - \Psi_{i+1,j-1}\right) - \right.$$

$$\left. - \frac{i-1/2}{h^2 i}\right] + \Phi_{i-1,j}\left[\frac{\mathrm{Re}}{4ih^2l}\left(\Psi_{i-1,j+1} - \Psi_{i-1,j-1}\right) - \right.$$

$$\left. - \left(i+1/2\right)\Big/\left(h^2 i\right)\right].$$

Для функции Ψ:

$$\lambda_1 = \frac{2}{l^2}\Psi_{i,j} - \frac{1}{l^2}\Psi_{i,j+1} - \frac{1}{l^2}\Psi_{i,j-1};$$

$$\lambda_2 = \frac{2}{h^2}\Psi_{i,j} - \frac{i\Psi_{i+1,j}}{h^2(i+1/2)} - \frac{i\Psi_{i-1,j}}{h^2(i-1/2)};$$

$$f = -i^2 r^2 \Omega_{i,j}.$$

Сформулированную задачу будем решать по схеме продольно-поперечной прогонки [2, 15]. Систему уравнений для трехточечной прогонки по оси *r* строим в виде

$$a_i F_{i+1} + b_i F_i + c_i F_{i-1} = f_i;\ F_0 = \gamma_1;$$
$$F_{M+1} = \gamma_2, \qquad (14)$$

где γ_1, γ_2 - граничные условия для функций Φ, Ψ на оси симметрии и на стенке циклона соответственно, а для функции Ω: $F_0 = \gamma_1$, $F_M = \gamma_2$, где γ_1 - условие на оси симметрии, а γ_2 - в пристеночном узле сетки.

Решение уравнения (14) будем искать в виде

$$F_i = X_i F_{i+1} + Y_i, \qquad (15)$$

где X_i, Y_i – прогоночные коэффициенты, $i = 0,1,...,M$. Для узла сетки $i-1$ соотношение (15) перепишется в виде $F_{i-1} = X_{i-1}F_i + Y_{i-1}$.

Подставляя F_{i-1} в (14), найдем

$$F_i = \frac{-a_i}{b_i + c_i X_{i-1}} F_{i+1} + \frac{f_i - c_i Y_{i-1}}{b_i + c_i X_{i-1}}$$

и получим рекуррентные соотношения для нахождения X_i и Y_i при прямой прогонки:

$$X_i = \frac{-a_i}{b_i + c_i X_{i-1}},\ Y_i = \frac{f_i - c_i Y_{i-1}}{b_i + c_i X_{i-1}}, \qquad (16)$$

где $X_0 = 0, Y_0 = \gamma_1$.

Обратную прогонку проводим по формуле (15) при $i = M, M-1,...,0$, используя граничное условие $F_{M+1} = \gamma_2$.

Для прямой прогонки по оси *r* коэффициенты a_i, b_i, c_i, f_i, используемые в соотношениях (16), имеют вид:

для функции Ω:

$$a_i = \frac{\tau\,\mathrm{Re}}{4ih^2l}\left(\Psi_{i+1,j+1} - \Psi_{i+1,j-1}\right) - \frac{(i+1)^2}{(i+1/2)h^2 i};$$

$$b_i = -1 - \frac{2i^2\tau}{(i^2 - 1/4)h^2};$$

$$c_i = -\frac{\tau\,\mathrm{Re}}{4ih^2l}\left(\Psi_{i-1,j+1} - \Psi_{i-1,j-1}\right) + \frac{(i-1)^2\tau}{(i-1/2)h^2 i};$$

$$f_i = \Omega_{i,j+1}\left[\frac{\mathrm{Re}\,\tau}{4ih^2l}\left(\Psi_{i+1,j+1} - \Psi_{i-1,j+1}\right) - \frac{\tau}{l^2}\right] + \Omega_{i,j} \times$$

$$\times\left[\frac{2\tau}{l^2} - 1\right] + \Omega_{i,j-1}\left[\frac{-\mathrm{Re}\,\tau}{4ih^2l}\left(\Psi_{i+1,j-1} - \Psi_{i-1,j-1}\right) - \frac{\tau}{l^2}\right] -$$

$$- \frac{\mathrm{Re}\,\tau}{2i^4h^4l}\left(\Phi^2_{i,j+1} - \Phi^2_{i,j-1}\right);$$

для функции Φ:

$$a_i = \frac{\tau\,\mathrm{Re}}{4ih^2l}\left(\Psi_{i+1,j+1} - \Psi_{i+1,j-1}\right) + \frac{(i-1/2)\tau}{h^2 i};$$

$$b_i = -1 - 2\tau/h^2;$$

$$c_i = -\frac{\tau\,\mathrm{Re}}{4ih^2l}\left(\Psi_{i-1,j+1} - \Psi_{i-1,j-1}\right) + \frac{(i+1/2)\tau}{h^2 i};$$

$$f_i = \Phi_{i,j+1}\left[-\frac{\mathrm{Re}\,\tau}{4ih^2l}\left(\Psi_{i+1,j+1} - \Psi_{i-1,j+1}\right) - \frac{\tau}{l^2}\right] + \Phi_{i,j} \times$$

$$\times\left[\frac{2\tau}{l^2} - 1\right] + \Phi_{i,j-1}\left[\frac{\mathrm{Re}\,\tau}{4ih^2l}\left(\Psi_{i+1,j-1} - \Psi_{i-1,j-1}\right) - \frac{\tau}{l^2}\right];$$

для функции Ψ:

$$a_i = \frac{i\tau}{h^2(i+1/2)};\ b_i = -1 - \frac{2i^2\tau}{h^2(i^2 - 1/4)};$$

$$c_i = \frac{i\tau}{h^2(i-1/2)};$$

$$f_i = \left(\frac{2\tau}{l^2} - 1\right)\Psi_{i,j} - \frac{\tau\Psi_{i,j+1}}{l^2} - \frac{\tau\Psi_{i,j-1}}{l^2} - \tau \cdot i^2 h^2 \Omega_{i,j}.$$

Систему уравнений для трехточечной прогонки по оси *x* строим в виде

$$a_j F_{j+1} + b_j F_j + c_j F_{j-1} = f_j,\ j = 1,2,...,N, \qquad (17)$$

используя условие периодичности $F_{j+N} = F_j$. Тогда решение уравнения (17) ищем в виде

$$F_j = X_{j+1}F_{j+1} + Y_{j+1} + Z_{j+1}F_N, \qquad (18)$$

или

$$F_{j-1} = X_j F_j + Y_j + Z_j F_N, \qquad (19)$$

где X_j, Y_j, Z_j – прогоночные коэффициенты. Подставив (19) в (17), получим рекуррентные формулы для определения прогоночных коэффициентов:

$$X_{j+1}=\frac{-a_j}{b_j+c_jX_j},\ Y_{j+1}=\frac{f_j-c_jY_j}{b_j+c_jX_j},$$

$$Z_{j+1}=\frac{-c_jZ_j}{b_j+c_jX_j},\ j=1,2,...,N-1.$$

При $j=0$ получим

$$X_1=\frac{-a_0}{b_0},\ Y_1=\frac{f_0}{b_0},\ Z_1=\frac{-c_0}{b_0}\ .$$

Обратную прогонку ведем по формуле (18) для j=N, N-1, ..., 1 с условием $F_N=\frac{Y_{N+1}+X_{N+1}\cdot p_1}{1-X_{N+1}\cdot q_1-Z_{N+1}}$, где p_1, q_1 получаем исключением F_{N+1} из (18) при j=N и с учетом последнего уравнения системы (17): $p_1=f_N/a_N;q_1=b_N/a_N$.

В прогонке по оси x коэффициенты a_j, b_j, c_j, f_j имеют вид:

для функции Ω:

$$a_j=-\frac{\tau\,\mathrm{Re}}{4ih^2l}\left(\Psi_{i+1,j+1}-\Psi_{i-1,j+1}\right)+\frac{\tau}{l^2};\ b_j=-1-2\tau/l^2;$$

$$c_j=\frac{\tau\,\mathrm{Re}}{4ih^2l}\left(\Psi_{i+1,j-1}-\Psi_{i-1,j-1}\right)+\frac{\tau}{l^2};$$

$$f_j=\Omega_{i,j}\left[\frac{2i^2\tau}{(i^2-1/4)h^2}-1\right]+\Omega_{i+1,j}\left[\frac{-\mathrm{Re}\,\tau}{4ih^2l}\times\right.$$

$$\left.\times\left(\Psi_{i+1,j+1}-\Psi_{i+1,j-1}\right)-\frac{(i+1)^2\tau}{i(i+1/2)h^2}\right]+\Omega_{i-1,j}\times$$

$$\times\left[\frac{\mathrm{Re}\,\tau}{4ih^2l}\left(\Psi_{i-1,j+1}-\Psi_{i-1,j-1}\right)-\frac{(i-1)^2\tau}{i(i-1/2)h^2}\right];$$

для функции Φ:

$$a_j=-\frac{\tau\,\mathrm{Re}}{4ih^2l}\left(\Psi_{i+1,j+1}-\Psi_{i-1,j+1}\right)+\frac{\tau}{l^2};\ b_j=-1-2\tau/l^2;$$

$$c_j=\frac{\tau\,\mathrm{Re}}{4ih^2l}\left(\Psi_{i+1,j-1}-\Psi_{i-1,j-1}\right)+\frac{\tau}{l^2};$$

$$f_j=\Phi_{i,j}\left[\frac{2\tau}{h^2}-1\right]-\Phi_{i+1,j}\left[\frac{\mathrm{Re}\,\tau}{4ih^2l}\times\right.$$

$$\left.\times\left(\Psi_{i+1,j+1}-\Psi_{i+1,j-1}\right)-\frac{(i-1/2)\tau}{ih^2}\right]+\Phi_{i-1,j}\times$$

$$\times\left[\frac{\mathrm{Re}\,\tau}{4ih^2l}\left(\Psi_{i-1,j+1}-\Psi_{i-1,j-1}\right)-\frac{(i+1/2)\tau}{ih^2}\right];$$

для функции Ψ:

$$a_j=\frac{\tau}{l^2};\ b_j=-1-\frac{2\tau}{l^2};\ c_j=\frac{\tau}{l^2};$$

$$f_j=\Psi_{i,j}\left[\frac{2i^2\tau}{(i^2-1/4)h^2}-1\right]-\Psi_{i+1,j}\frac{i\tau}{(i+1/2)h^2}-$$

$$-\Psi_{i-1,j}\frac{i\tau}{(i-1/2)h^2}-h^2i^2\tau\cdot\Omega_{i,j}.$$

Для решения поставленной задачи по схеме продольно-поперечной прогонки была разработана программа на алгоритмическом языке Турбо Паскаль. По результатам работы программы рассчитаны профили осевой и окружной компонент скорости. Сопоставление профилей выполнено по трем сечениям вниз по потоку.

Рассчитанные профили осевой компоненты скорости u (рис. 3) имеют характерную форму с максимумом вблизи стенки, как и в работе [4]. Вблизи стенки существует возвратное течение, которое будет способствовать вторичному уносу отсепарированных частиц. Как показано в работе [4], при захвате частиц возвратным потоком их поведение в большой мере зависит от их размера. Только самые мелкие частицы, имеющие примерно такую же скорость, что и несущий поток, способны следовать за быстрым расширением и торможением закрученного потока в корпусе циклона. Величина u возвратного течения возрастает с увеличением расстояния от входного сечения x. При увеличении x максимум осевой скорости прямого течения смещается в направлении к стенке, оставаясь по величине практически неизменным. В работе [1] в качестве предельного значения уровня начальной завихренности, при котором возникало возвратное течение, указано K = 0,6. При меньших значениях К обратного течения нет. С увеличением параметра K при одинаковых значениях критерия Re максимальная величина осевой скорости возвратного течения вблизи стенки возрастает. Увеличение числа Re при постоянном значении параметра K приводит к возрастанию осевой скорости прямого течения, но не влияет существенно на профиль u.

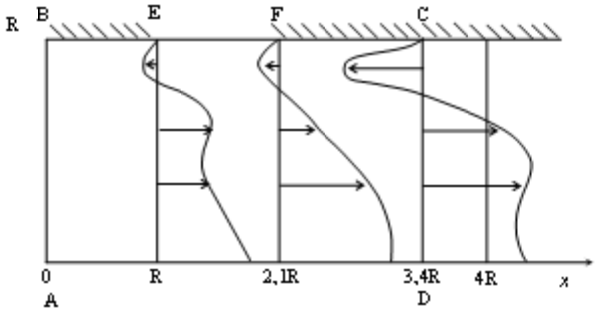


Рис. 3. Профиль осевой скорости при K=1, Re=6, R=0,1м

Изменение значений параметра K и числа Рейнольдса Re приводят к возрастанию скорости u возвратного течения, что, вероятно, может быть объяснено наличием механизма раскрутки потока и влиянием турбулентной вязкости.

Расчет дает качественную картину развития скорости течения жидкости и относительно хорошее количественное согласие результатов с данными, полученными другими исследователями. При x=3,4R наблюдается погашение встречного вихря вблизи стенки, но вблизи оси циклона направление w изменяется на противоположное, что порождает встречный вихрь вблизи оси циклона (рис. 4). Полученные результаты согласуются с экспериментальными наблюдениями других авторов [7, 15]. Уже на начальном этапе применения закрученных потоков были обнаружены их «аномальные» особенности – противоток или рециркуляционная зона, прецессирующее вихревое ядро [15].

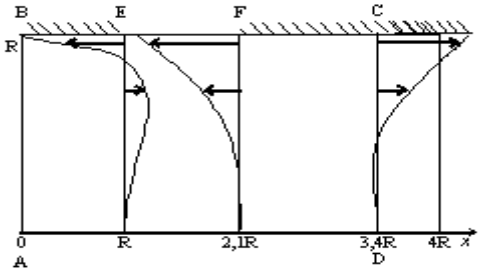


Рис. 4. Профиль окружной скорости при K=1, Re=6, R=0,1 м

Отметим, что профиль окружной скорости w существенно изменяется по радиусу циклона и по оси x, что означает наличие дифференциального вращения, вследствие чего вихревые линии начинаются закручиваться по спирали, как утверждают авторы работы [15] . На рис. 5 представлены линии равного уровня функции тока. Видно, что вблизи стенки циклона образуются вихревые зоны.

Выводы:

- изменяющаяся закрутка потока может вызвать появление вдоль стенок циклона возвратного течения, снижающего эффективность сепарации тонких фракций пыли.
- для погашения встречного вихря на оси циклона целесообразно в нем устанавливать центральную вставку.

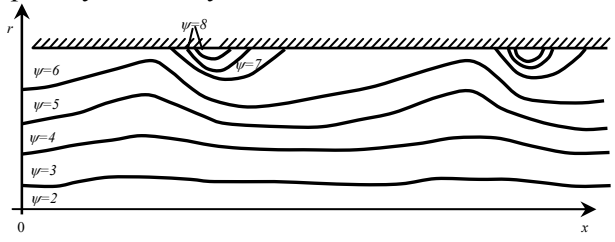


Рис. 5. Линии тока ψ равного уровня при Re=6, K=1

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Турбулентное смешение газовых струй / Г. Н. Абрамович, С. Ю. Крашенинников, А. Н. Секундов, И. П. Смирнова. М. : Наука, 1974. 94 с.
2. Марчук Г. И. Методы расщепления М. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 264 с.
3. Яблонский В. О. Расчет разделения суспензий с неньютоновской дисперсной средой в прямоточном цилиндрическом циклоне // Химическая промышленность. 2005. Т. 82, № 1. С. 40–48.
4. Сийержич М., Ментер Ф. Измельчение расчетной сетки при моделировании закрученного течения // Теплофизика и аэромеханика. 2003. Т. 10, № 2. С. 171–182.
5. Математическое моделирование течений в малогабаритных трубчатых турбулентных аппаратах / Ю. М. Данилов, А. Г. Мухаметзянова, Г. С. Дьяконов, Е. И. Кульментьева // Химическая промышленность. 2004. № 9. С. 451–457.
6. Дейч М. Е. Техническая газодинамика М. : Энергия, 1974. 592 с.
7. Алексеенко С. В., Окулов В. Л. Закрученные потоки в технических приложениях // Теплофизика и аэромеханика. 1996. Т. 3, № 2. С. 101–138.
8. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа М. : Наука, 1973. 736 с.
9. Шец Дж. Турбулентное течение. Процессы вдува и перемешивания. М. : Мир, 1984. 199 с.
10. Барон Ф., Зайчик Л. И., Першуков В. А. Сепарация мелкодисперсной влаги в прямоточных циклонах // Теплофизика и аэромеханика. 1996. Т. 3, № 4. С. 353–360.
11. Годунов С. К., Рябенький В. С., Годунов С. К. Разностные схемы : (введ. в теорию). М. : Наука, 1973. 400 с.
12. Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. В. Теоретическая гидромеханика. М. : Физматгиз, 1963. 728 с.
13. Марчук Г. И., Яненко Н. Н. Решение многомерного кинетического уравнения методом расщепления // Докл. АН СССР. 1966. Т. 157., № 6. С. 1241–1242.
14. Полежаев В. Н., Грязнов В. Л. Метод расчета граничных условий для уравнений Навье-Стокса в переменных «вихрь-функция тока» // Докл. АН СССР. 1974. Т. 219, № 2. С. 301–304.
15. Алексеенко С. В., Куйбин П. А., Окулов В. Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. М.-Ижевск : Ин-т компьютер. исслед., 2005. 504 с.

Ереско С.П., Шатохин С.Н. УДК 621.9.06; 621.822.572.001.04

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ПРОБЛЕМАТИКА ПРИМЕНЕНИЯ АДАПТИВНЫХ ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ ОПОР В ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛАХ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

В современных металлорежущих станках для прецизионной и высокоскоростной обработки, микро-резания, точения сверхтвердым инструментом (алмаз, эльбор, гексанит, минерало-керамика), а также в тяжелых и уникальных станках применяют шпиндельные узлы с бесконтактными гидростатическими опорами скольжения, которые по точностным, нагрузочным, скоростным и динамическим характеристикам значительно превосходят другие опоры. Дальнейшее совершенствование гидростатических и аэростатических шпиндельных опор, расширение их функциональных возможностей является актуальной научно-технической проблемой машиностроения и станкостроения.

Гидростатические шпиндельные опоры имеют высокую надежность и практически неограниченную долговечность. Их можно одновременно использовать как динамометрические преобразователи нагрузки или приводы микроперемещений. Однако они не производятся централизованно и не являются покупными изделиями (как подшипники качения). Станкостроительные предприятия вынуждены самостоятельно решать весь комплекс проблем проектирования, изготовления и эксплуатации.

Наибольшее применение в металлорежущих станках получили гидростатические шпиндельные опоры с постоянным давлением нагнетания и дроссельной компенсацией расхода смазки в несущих карманах (схема «дроссель – карман»). Такие опоры конструктивно просты и хорошо изучены, но имеют сравнительно невысокие нагрузочные характеристики.

Не имеют дроссельной компенсации гидростатические опоры с нагнетанием смазки в несущие карманы от многопоточных объемных насосов или делителей потока (схема «насос – карман»). Считается, что в этом случае затраты мощности снижаются в 1,5÷2 раза и податливость опоры в 2÷2,5 раза в сравнении со схемой «дроссель – карман». Но это справедливо лишь при малом изменении нагрузки и рабочего зазора, что характерно для незамкнутых направляющих тяжелых станков. В замкнутой шпиндельной гидростатической опоре уже при относительном эксцентриситете 0,4 насосные потери мощности возрастают вдвое, а давление смазки в нагруженном кармане в пять раз. Поэтому схема «насос – карман» не находит применения в шпиндельных гидростатических опорах, так как при одинаковых насосных потерях она обеспечивает такие же нагрузочные характеристики, что и схема «дроссель – карман», а при одинаковом допустимом давлении смазки даже уступает ей. Кроме того, схема «насос – карман» значительно дороже, чувствительна к изменению вязкости и нагреву смазки, имеет худшие динамические характеристики из-за большой длины трубопроводов, соединяющих насосы с несущими карманами.

Наиболее перспективны, но недостаточно разработаны и изучены, а поэтому реже применяются гидростатические опоры с нагнетанием смазки по схеме «регулятор – карман». Регуляторы управляют нагнетанием смазки в несущие карманы либо по изменению перемещения подвижной части опоры, либо по изменению давления смазки в карманах, которое пропорционально нагрузке.

На рисунке 1 приведены типовые графики нагрузочных характеристик для замкнутых гидростатических опор с различными схемами нагнетания смазки. Видно, что только регуляторы, управляемые по изменению давления смазки в несущих карманах (график 5), в начальном диапазоне нагрузок обеспечивают характеристику с отрицательной податливостью (перемещение шпинделя происходит навстречу нагрузке). Отрицательный эксцентриситет шпинделя уменьшает влияние уп-

ругих деформаций станка на точность обработки, которая повышается в 1,5-2,5 раза более. Поэтому такие гидростатические опоры называют адаптивными.

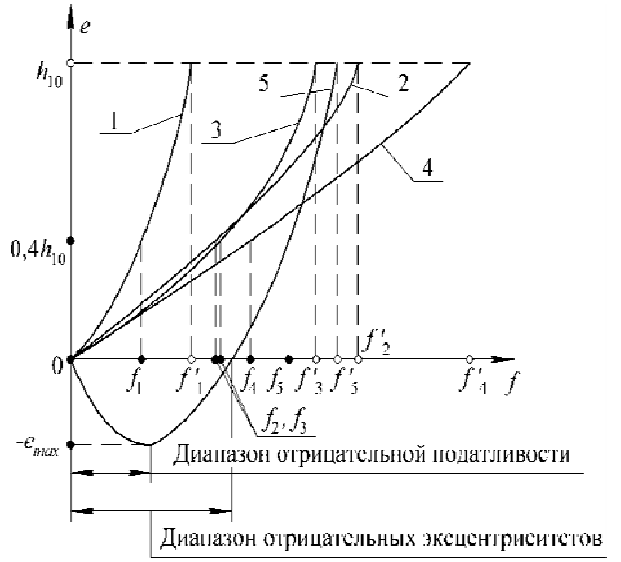


Рис. 1. Нагрузочные характеристики радиальных гидростатических шпиндельных опор с различными схемами нагнетания смазки: 1) самокомпенсация, 2) дроссель-карман, 3) регулятор с управлением по перемещению, 4) насос – карман, 5) регулятор с управлением по нагрузке

Более высокие нагрузочные характеристики адаптивных гидростатических опор позволяют при одинаковой нагрузочной способности уменьшить давление нагнетания смазки, диаметр шпинделя, или рабочий зазор в 1,2÷1,4 раза. Это позволяет сократить потери мощности в 2÷3 раза – до значений, не уступающих высокоскоростным шпиндельным узлам с подшипниками качения [1, 2].

В Сибирском федеральном университете (СФУ)[1] совместно с рядом машиностроительных и станкостроительных предприятий длительное время проводятся научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, в результате которых созданы более совершенные конструкции адаптивных гидростатических шпиндельных опор с встроенными регуляторами нагнетания смазки, в том числе плавающими, которые образуют с несущей частью опоры компактный и технологичный модуль. В результате проведенных исследований разработаны различные конструкции и прикладные методы расчета радиальных, осевых и радиально-осевых адаптивных шпиндельных опор с встроенными плавающими регуляторами [3, 4, 5, 6].

На рисунке 2 показана радиальная адаптивная гидростатическая шпиндельная опора без несущих карманов, с встроенным плавающим кольцевым регулятором, которая имеет следующие достоинства:

– технологичную конструкцию, состоящую из четырех высокоточных деталей простой формы;

– отсутствие несущих карманов, что позволяет уменьшить фрикционные потери мощности при высокой частоте вращения шпинделя;

– авторотацию плавающего кольцевого регулятора от фрикционного момента вращающегося шпинделя, что исключает облитерацию дросселирующих щелевых зазоров и на 25÷30% уменьшает фрикционные потери мощности;

– на 20÷30% превосходит по нагрузочной способности и экономичности адаптивные гидростатические шпиндельные опоры с другими типами регуляторов нагнетания смазки.

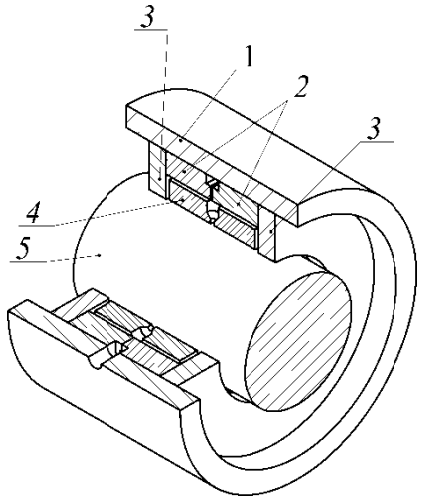


Рис. 2. Радиальная гидростатическая шпиндельная опора с встроенным плавающим кольцевым регулятором: 1 – корпус шпиндельного узла, 2 – неподвижная составная опорная втулка, 3 – неподвижные опорные фланцы, 4 – плавающий кольцевой регулятор, 5 – опорная шейка шпинделя

Проблема создания адаптивных гидростатических опор не сводится лишь к достаточному усилению регулятора. Теоретически и экспериментально установлено, что для устойчивости режима отрицательной податливости необходимы дополнительные конструктивные меры, повышающие собственное демпфирование опоры. Исследование различных способов обеспечения устойчивости адаптивных опор показало, что наиболее простым и эффективным решением является размещение в проточном тракте опоры после управляемых со-

[1] до 2007 г. – Красноярский государственный технический университет (КГТУ),
до 2002 г. – Красноярский политехнической институт (КрПИ)

противлений регулятора дополнительных демпфирующих дросселей, расположенных как можно ближе к несущему слою смазки. Оптимальное сопротивление демпфирующих дросселей составляет 15-20 % от управляемых сопротивлений регулятора, поэтому они незначительно ухудшают статические характеристики опоры [7].

В результате проведенных исследований теоретически и экспериментально показано, что применяемые в инженерной практике расчеты потерь мощности в гидростатических опорах основаны на недопустимом упрощении математических моделей течения смазки. Это приводит к неоптимальным и даже ошибочным решениям при проектировании высокоскоростных шпиндельных опор. Разработана методика расчета потерь мощности в гидростатических опорах, учитывающая нагрев и изменение вязкости смазки, её сжимаемость, циркуляцию и турбулентность в несущих карманах. Эта методика показала полное соответствие экспериментальным данным при скорости скольжения до 60 м/с [8].

При большой окружной скорости в разгруженном несущем кармане гидростатической опоры возможна кавитации смазки, которая снижает точность вращения шпинделя. Показано, что причиной кавитации является циркуляции смазки по глубине кармана. Разработана методика расчета совокупности параметров опоры, при которой кавитация не возникает [9].

Результаты исследования изменяют традиционные представления об оптимальных параметрах скоростных гидростатических опор. В частности, рекомендуется уменьшить относительную величину внешних сопротивлений, значительно увеличить глубину и уменьшить площадь несущих карманов или вообще отказаться от них.

В связи с непрерывным ужесточением требований к точности шпиндельных узлов прецизионных станков проведено теоретическое и экспериментальное изучение статического и динамического влияния периодических погрешностей формы опорных поверхностей и пульсации давления нагнетаемой смазки на точность вращения. Результаты исследования позволили значительно уменьшить влияние этих факторов на биение шпинделя. Разработана методика расчета допустимых значений геометрических погрешностей опорных поверхностей и пульсации давления смазки, обеспечивающих заданную точность опоры на рабочей частоте вращения [10, 11].

Анализ упругих деформаций шпиндельного узла с гидростатическими опорами позволил выявить экстремальное влияние длины опорной части шпинделя и длины опор на нагрузочные характеристики узла. Установлено, что оптимальная длина передней адаптивной гидростатической опоры в зависимости от давления нагнетания смазки составляет 0,5÷0,8 от диаметра опорной шейки шпинделя, то есть существенно меньше обычно рекомендуемых значений. К тому же уменьшение длины гидростатической опоры повышает ее технологичность и снижает фрикционные потери мощности, что особенно существенно для высокооборотных шпинделей [12, 13, 14].

Исследованы функциональные возможности гидростатических шпиндельных опор как бесконтактных динамометрических преобразователей действующей нагрузки. Показано, что в адаптивных опорах динамометрическим аналогом, кроме изменения давления смазки в несущем слое, является перемещение активного элемента регулятора, которое проще поддается измерению. Установлено, что в адаптивных гидростатических опорах полоса пропускания такого преобразователя увеличивается в 1,5÷1,8 раза и достигает при оптимальном выборе параметров 60÷70 Гц. При этом наибольшую линейность динамометрической характеристики обеспечивает плавающий регулятор с гидростатическим подвесом активного элемента [15].

Получаемая от шпиндельных опор динамометрическая информация позволяет осуществлять комплексное двухконтурное адаптивное управление процессом обработки. Первый контур на основе полученной динамометрической информации стабилизирует размер динамической настройки, управляя через СЧПУ станка подачей инструмента или скоростью резания. Второй контур стабилизирует размер статической настройки станка за счет отрицательной податливости адаптивных шпиндельных опор. Установлено, что двухконтурное управление при черновых и получистовых токарных, расточных, фрезерных и шлифовальных операциях повышает точность обработки в 2,5-4,5 раза и производительность на 30-60% .

Результаты проведенных исследований реализованы при разработке для предприятий и организаций руководящих технических материалов, подсистем САПР, опытных конструкций шпиндельных узлов и направляющих с гидростатическими и аэростатическими опорами, в том числе:

– разработан, изготовлен и испытан высокоскоростной шпиндельный узел с адаптивными гидростатическими опорами, которые одновременно используются СЧПУ как динамометрические датчики-преобразователи для многоцелевого двухшпиндельного токарного станка МТД-901; для этого станка разработан также шпиндельный узел с гидростати-

ческими опорами, имеющими пьезоэлектрические регуляторы активного нагнетания смазки в несущие карманы, которые позволяют через СЧПУ реализовать различные алгоритмы управления микроперемещениями шпинделя (НИТИ Минавиапрома, г. Саратов, 1993 г.);

– разработан, изготовлен и испытан высокоскоростной мотор-шпиндель с аэростатическими опорами для специального фрезерного станка с ЧПУ (ФГУП «Красмаш», г. Красноярск, 1990 г.);

– разработана, изготовлена и испытана навесная фрезерно-расточная головка с гидростатическими опорами шпинделя для тяжелого обрабатывающего центра НС421МФ4 (ПО «Тяжстанкогидропресс», г. Новосибирск, 1989 г.);

– разработана, изготовлена и испытана бабка изделия с гидростатическими опорами шпинделя для кругло-шлифовального станка особо высокой точности 3У10А (СПО «Комунарас», г. Вильнюс, 1986 г.);

– разработан, изготовлен и испытан шпиндельный узел с адаптивными гидростатическими опорами для серийной модернизации токарно-винторезных станков 1К62 (ВФ СКБ «Индикатор», г. Выборг, 1980 г.);

– разработан проект шпиндельного узла и задней бабки с гидростатическими опорами шпинделя и пиноли для токарного станка высокой точности ФТ-12 (СКТОС завода им. В.И. Ленина, г. Фрунзе, 1980 г.);

– разработаны, изготовлены и использованы в производственных условиях фрезерные головки с гидростатическими опорами шпинделя для планетарного фрезерования точных пазов немерными концевыми фрезами на тяжелом токарном станке (ПО «Сибтяжмаш», г. Красноярск, 1974 и 1979 г.);

– разработан проект модернизации зубофрезерного станка 5306П, в котором предусмотрено использование гидростатических опор для шпинделей фрезерного суппорта и стола («Станкостроительный завод им. 40 лет Октября», г. Вильнюс, 1977 г.);

– разработаны и испытаны шпиндельные узлы с гидростатическими опорами для желобошлифовального автомата ЛЗ-154 и внутришлифовального полуавтомата ЛЗ-105 (ГПЗ № 14, г. Прокопьевск, 1977 г.).

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Шатохин С.Н., Коднянко В.А., Зайцев В.П. Функциональные возможности радиальной адаптивной гидростатической опоры / Журнал «Машиноведение», 1988, № 4 – С. 85-91.
2. Шатохин С.Н., Зайцев В.П. Ярошенко С.А. Проектирование адаптивных гидростатических подшипников / Журнал «Вестник машиностроения», 1992, № 6-7 – С. 25-28.
3. Шатохин С.Н., Пикалов Я.Ю., Демин В.Г. Адаптивные бесконтактные опоры скольжения с плавающими регуляторами нагнетания смазки для шпиндельных узлов и направляющих металлорежущих станков / Журнал «Технология машиностроения», 2006, №9 – С. 29-33.
4. Демин, В.Г. Пикалов Я.Ю. Проектирование адаптивных гидростатических опор с плавающими регуляторами нагнетания смазки для шпиндельных узлов и направляющих металлорежущих станков. / Журнал «Технология машиностроения», 2008, №9 – С. 27–30.
5. Пикалов Я.Ю., Шатохин С.Н., Демин В.Г. Конструкции и характеристики адаптивных гидростатических шпиндельных опор с плавающим регулятором нагнетания смазки / Журнал СТИН, 2006, №5 – С. 18-22.
6. Пикалов Я.Ю., Шатохин С.Н. Динамические характеристики адаптивной гидростатической шпиндельной опоры с плавающим кольцевым регулятором / Вестник Ассоциации выпускников КГТУ №3. Красноярск: Изд-во СФУ, 2007 – С. 141-148.
7. Шатохин С.Н., Коробейников А.Ф. Апериодическая устойчивость и статические характеристики гидростатических опор с отрицательной податливостью / В кн. «Опоры скольжения с внешним источником давления // Под ред. С.Н. Шатохина. Красноярск: Изд-во КГТУ. 1977 – С. 57-70.
8. Шатохин С.Н. Расчет и минимизация потерь мощности в гидростатических подшипниках / Журнал «Станки и инструмент», 1989, № 9. – С. 16-19.
9. Шатохин С.Н. Ярошенко С.А. Влияние высокой частоты вращения на эксплуатационные характеристики адаптивного гидростатического подшипника / Журнал «Проблемы машиностроения и надежности машин», 1990, № 2 – С. 38-43.
10. Шатохин С.Н., Секацкий В.С. Влияние некруглости опорных поверхностей на точность радиальных гидростатических подшипников шпинделя / Журнал «Известия вузов. Машиностроение», 1988, № 7 – С. 127-131.
11. Шатохин С.Н., Секацкий В.С. Влияние пульсации давления масла в гидростатических шпиндельных опорах на точность станка / Журнал «Станки и инструмент», 1985, № 12 – С. 9-10.
12. Шатохин С.Н. Расчет и оптимизация шпиндельных узлов с гидростатическими подшипниками /

Журнал «Станки и инструмент», 1983, № 7 – С. 15-16.
13. Расчет и оптимизация нагрузочных характеристик шпиндельных узлов с гидростатическими подшипниками / Журнал «Станки и инструмент», 1987, № 3 – С. 13-14.
14. Пикалов Я.Ю., Демин В.Г., Шатохин С.Н. Многопараметрическая оптимизация нагрузочных и энергетических характеристик шпиндельного узла с адаптивными гидростатическими опорами / Вестник Ассоциации выпускников КГТУ, №10. Красноярск: Изд-во КГТУ, 2004 – С. 177–183.
15. Зайцев В.П., Шатохин С.Н., Ярошенко С.А. Исследование и расчет адаптивных гидростатических подшипников-преобразователей / В кн. «Опоры скольжения с внешним источником давления смазки (гидростатические, аэростатические) // Под ред. С.Н. Шатохина. Красноярск: Изд-во КГТУ. 1977 – С. 57-70.

Крюков А.В., Закарюкин В.П., Кобычев Д.С. УДК 621.311:621.331

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЛИЯНИЙ КОНТАКТНОЙ СЕТИ НА СМЕЖНЫЕ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С УЧЕТОМ ВЫСШИХ ГАРМОНИК

Введение. Линии электропередачи напряжением 6-10-35 кВ, проходящие вдоль трасс железных дорог переменного тока, подвержены электрическому и магнитному влияниям контактной сети (КС) [1]. За счет этого возможно появление опасных напряжений на отключенных ЛЭП даже при значительной их удаленности (100 м и более) от КС. Так как наводимое напряжение магнитного влияния пропорционально частоте влияющего тока, возможно существенное возрастание уровня наведенных напряжений на отключенных линиях 6-10-35 кВ из-за наличия в КС высших гармоник (ВГ).

Предварительная оценка этого фактора может быть сделана следующим образом. Напряжение магнитного влияния от гармоники ν с частотой $\nu\omega = 2\pi f \nu$ определяется законом электромагнитной индукции с учетом экранирующего действия рельсов [1]:

$$U_\nu = \nu\omega M I_\nu \ell s_p,$$

где I_ν – ток контактной сети на гармонике ν; $M_\nu = 10^{-4} ln\left(1 + \frac{6\cdot 10^5}{a^2 \sigma f \nu}\right)$, Гн/км – взаимная индуктивность 1 км смежного провода и контактной сети, рассчитанная для частоты гармоники с номером ν; a – ширина сближения, м, σ – удельная проводимость земли, См/м; ℓ – длина смежного провода, км; s_p – коэффициент экранирования рельсами, в первом приближении равный 0.5.

Если аппроксимировать тяговый ток прямоугольными импульсами с амплитудой I_m, то для тока нечетной гармоники с номером ν можно записать [1] следующее соотношение:

$$I_\nu = \frac{4I_m}{\nu\pi}.$$

Эффективное значение напряжения, наводимое высшими гармониками, при этом равно

$$U_{ЭФ}^{(ВГ)} = \sqrt{\sum_{\nu=3}^{n} U_\nu^2} = \frac{4I_m \omega \ell s_p}{\pi} \sqrt{\sum_{\nu=3}^{n} M_\nu^2}.$$

Суммирование проводится только по нечетным гармоникам, а величина n не превосходит 21 из-за необходимости учета на более высоких частотах эффектов распределенности параметров. Из анализа приведенной формулы можно сделать вывод о том, что напряжение $U_{ЭФ}^{(ВГ)}$ сопоставимо с напряжением, наводимым током основной частоты.

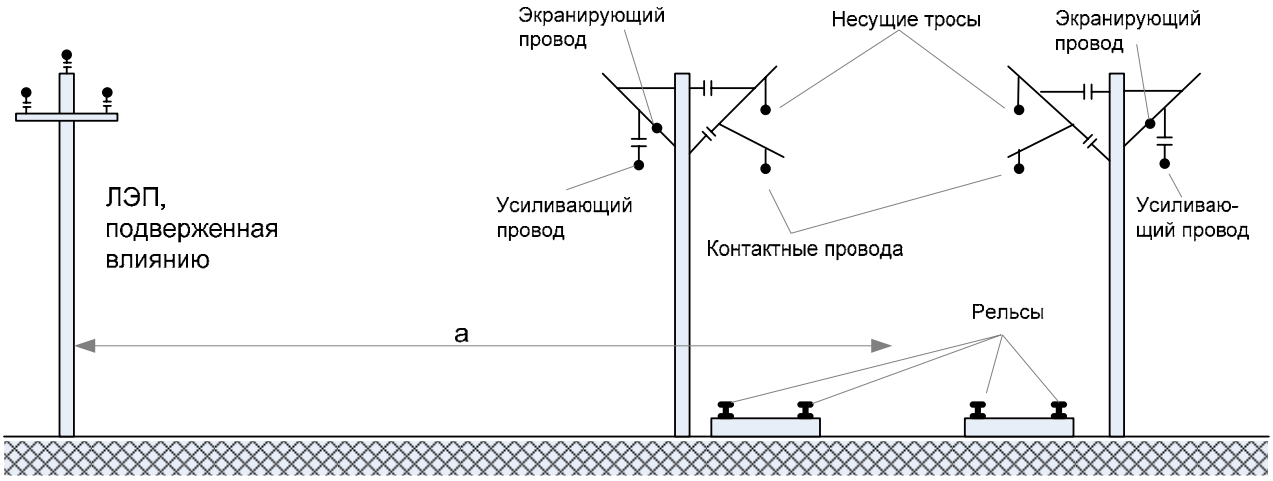


Рис. 1. Поперечное сечение КС и ЛЭП

Методика моделирования. Уточненный анализ влияния КС на уровень наведенных напряжений в смежных линиях можно провести с использованием разработанного в ИрГУПСе программного комплекса Fazonord-Качество [2, 3]. Комплекс позволяет проводить имитационное моделирование режимов систем тягового электроснабжения переменного тока с одновременным расчетом высших гармоник, генерируемых выпрямительными электровозами и другими источниками несинусоидальности. Рассчитываемая электрическая система может включать в свой состав воздушные линии и контактные сети различной конфигурации, однофазные и многофазные трансформаторы с любым приемлемым на практике соединением обмоток, источники тока и ЭДС, балансирующие узлы, нагрузки в узлах сети и между ними. Токи гармоник электровоза [4] при эффективном токе 150 А являются исходными данными при расчетах, которые проводятся с использованием визуальных компонент из набора элементов.

Результаты определения наведенных напряжений в зависимости от ширины сближения и времени моделирования представлены на рис. 2..7. Из рис. 2 видно, что за счет высших гармоник может наводиться напряжение, опасное даже при значительной ширине сближения порядка 300 м. При наличии ЭП максимальные значения $U_{ЭФ}^{(ВГ)}$ снижаются на 35..42 % . Усиливающий провод (УП) не оказывает существенного влияния на максимальные и средние значения $U_{ЭФ}^{(ВГ)}$, однако изменяет степень искажения синусоидальности (рис. 3, 4) и динамику изменения $U_{ЭФ}^{(ВГ)}$ во времени (рис. 5..7).

Характер изменения коэффициента искажения синусоидальности k_U с ростом ширины

Результаты моделирования. Моделирование осуществлялось применительно к двухпутному участку железной дороги длиной 25 км с протяженными подъемами до 15‰ для четного направления, электрифицированному на напряжении 1х25 кВ. Расстояние от отключенной и незаземленной линии электропередачи такой же длины, подверженной влиянию, принималось равным 20, 50, 100, 200 и 300 м. Удельная проводимость земли задавалась равной 0.001 См/м. Поперечное сечение КС и ЛЭП показано на рис. 1. Рассматривалось движение четырех поездов массой 6000 тонн в четном и четырех массой 4000 т в нечетном направлениях с интервалами 11 мин.

При моделировании рассматривались три способа выполнения КС:

1) цепная подвеска с контактным проводом и несущим тросом (ЦП);

2) контактная сеть с экранирующим проводом (ЭП);

3) контактная сеть с экранирующим и усиливающим проводами (ЭУП).

сближения зависит от конструктивных особенностей КС. При отсутствии экранирующего и усиливающего проводов наведенное напряжение, вызванное токами основной частоты, уменьшается быстрее, чем аналогичный параметр, обусловленный токами ВГ [5]. Это приводит к возрастанию коэффициента несинусоидальности (рис. 3, 4). При наличии экранирующего и усиливающего проводов зависимость напряжения высших гармоник от ширины сближения $U_{ЭФ}^{(ВГ)} = f(a)$ приобретает более сложный характер с наличием явно выраженных экстремумов для максимальных значений (рис. 3).

Изменение наведенных напряжений во времени при различных расстояниях до отключенной ЛЭП показано на рис. 5..7. Из этих рисунков

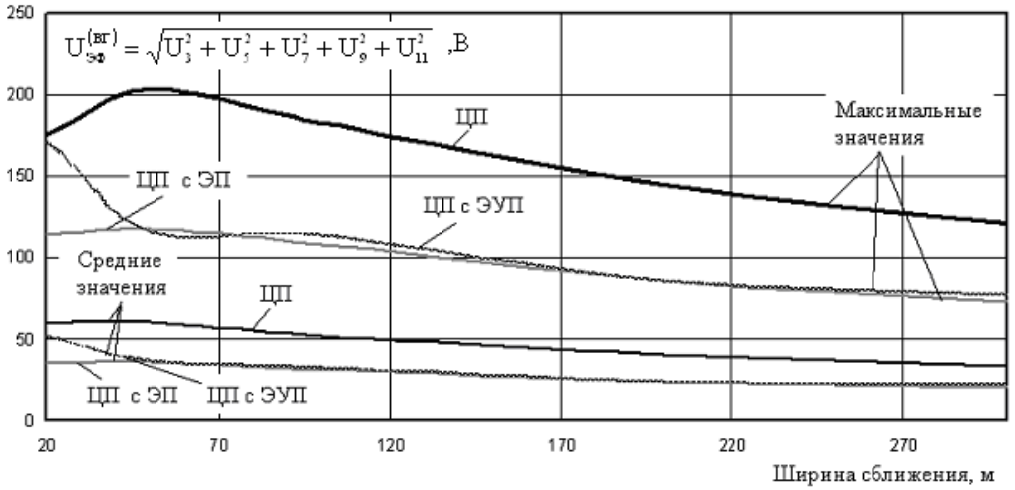


Рис. 2. Суммарное напряжение, наведенное токами 3..11 гармоник

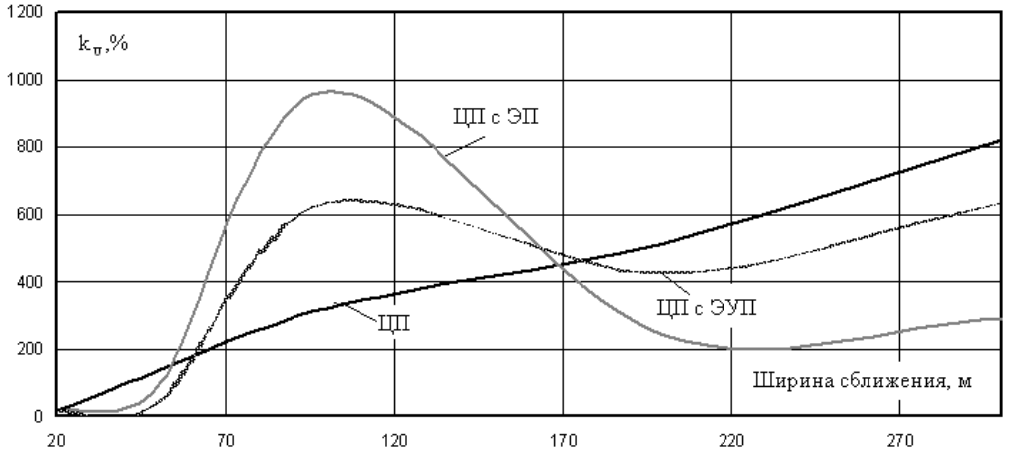


Рис. 3. Максимальные значения коэффициента искажения синусоидальности

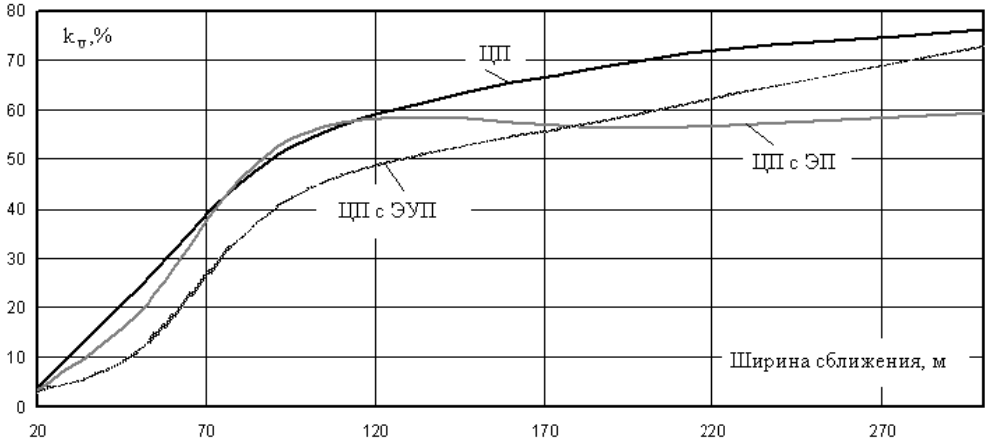


Рис. 4. Средние значения коэффициента искажения синусоидальности наведенного напряжения

видно, что наличие ЭУП изменяет характер временных зависимостей $U_{ЭФ}^{(ВГ)} = \varphi(t)$. При отсутствии ЭП и УП и значительной ширине сближения 300 м величина наведенного напряжения от ВГ более чем 30 минут превышает уровень 100 В. Наличие ЭУП снижает максимальные уровни $U_{ЭФ}^{(ВГ)}$ до 60..70 В.

Возмо можность наведения пряжений величинами до 180 В за счет токов ВГ необходимо учитывать при разработке щих материалов по обеспечению безопасности работ на отключенных ЛЭП, находящихся в зоне электромагнитного влияния контактной сети железных дорог переменного тока. При значительной ширине сближения (100 м и более) и наличии, например, лесного массива, железная дорога может находиться вне зоны прямой видимости и возможно принятие ошибочных решений, связанных с недостаточным объемом работ по обеспечению безопасности.

Заключение. Из анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы.

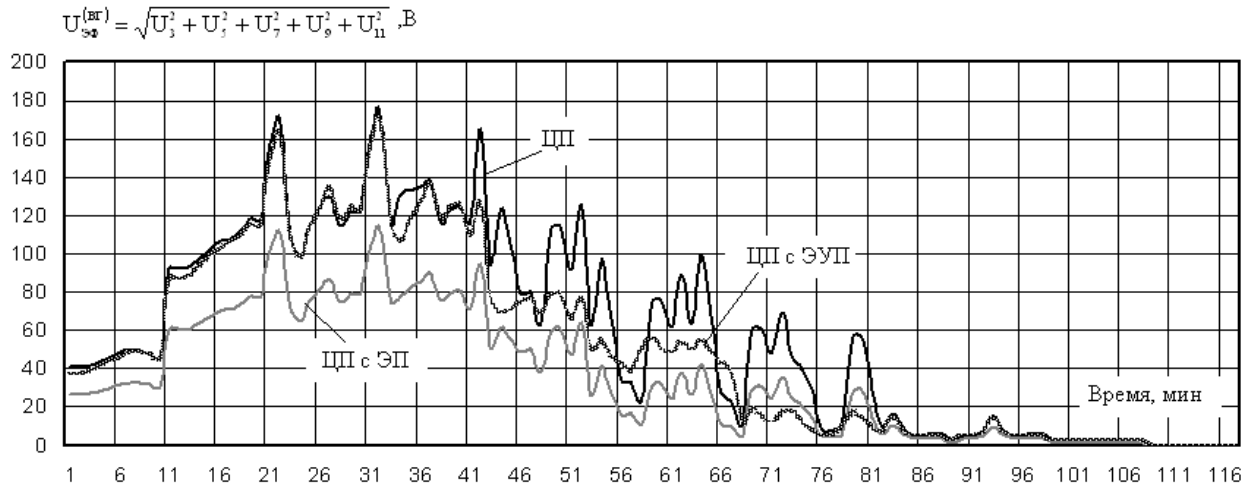


Рис. 5. Динамика изменения наведенных напряжений при ширине сближения 20 м

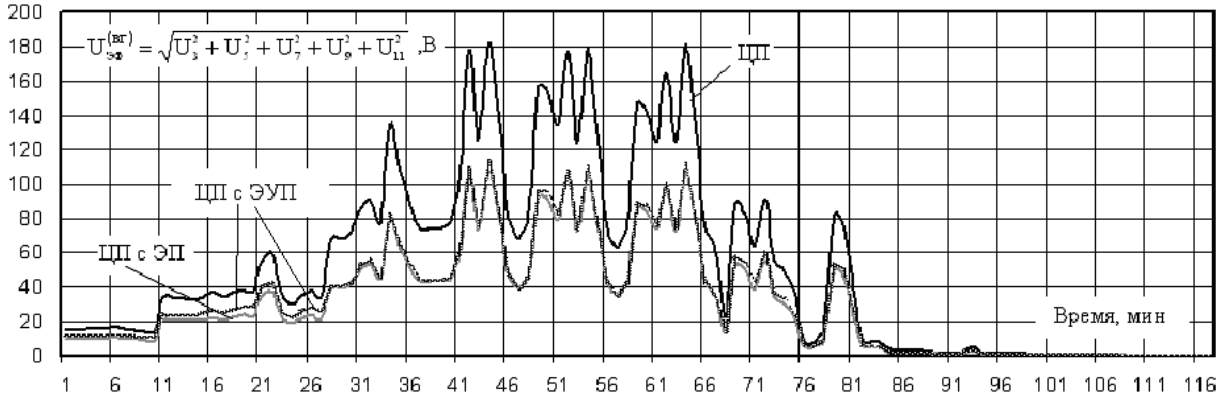


Рис. 6. Динамика изменения наведенных напряжений при ширине сближения 100 м

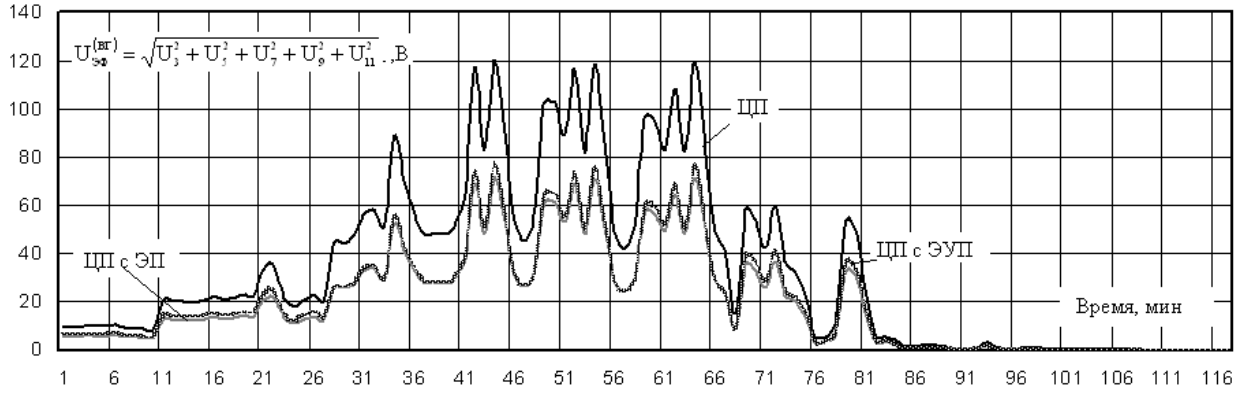


Рис. 7. Динамика изменения наведенных напряжений при ширине сближения 300 м

1. При расположении отключенной ЛЭП на расстоянии 100 м и более от контактной сети наведенное напряжение, вызванное высшими гармониками, может достигать опасных значений величинами до 180 В. Этот фактор необходимо учитывать при разработке руководящих материалов по обеспечению безопасности работ на отключенных ЛЭП, находящихся в зоне электромагнитного влияния контактной сети железных дорог переменного тока. Опасное напряжение, обусловленное влиянием высших гармоник, может наводиться при значительной удаленности отключенной ЛЭП, достигающей 300 и более метров.

2. Наведенное напряжение в смежной линии электропередачи имеет резко несинусоидальный характер; коэффициент несинусоидальности может достигать сотен процентов.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Бадер М.П. Электромагнитная совместимость [Текст]: Учебник для вузов железнодорожного транспорта / М.П. Бадер. – М.: УМК МПС, 2002. – 638 с.
2. Закарюкин, В.П. Сложнонесимметричные режимы электрических систем [Текст]: монография / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков. – Иркутск: Иркут. ун-т. – 2005. – 273 с.
3. 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.
4. Правила защиты устройств проводной связи и проводного вещания от влияния тяговой сети электрифицированных железных дорог переменного тока. – М.: Транспорт, 1989. – 134 с.
5. Крюков, А.В. Моделирование электромагнитных влияний контактной сети железных дорог на смежные линии электропередачи [Текст] / А.В. Крюков, В.П. Закарюкин, Д.С. Кобычев // Электротехнические комплексы и системы управления. – № 1. – 2009. – С. 2-7.

Огар П.М., Тарасов В.А., Турченко А.В. УДК 621.646:621.891

ГЕРМЕТИЗИРУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ СТЫКОВ

При обеспечении герметичности уплотнительных соединений используются методы увеличения их гидравлического сопротивления (методы герметизаций) за счет: прецизионной обработки контактирующих поверхностей с целью уменьшения высотных параметров макро- и микронеровностей; увеличения деформации неровностей путем нагружения контакта сжимающими напряжениями или применения эластичных либо пластичных материалов. Практический интерес представляет второй случай, для которого характерна высокая плотность пятен контакта отдельных неровностей и на контактные характеристики в значительной мере оказывает взаимное влияние неровностей. При контактировании шероховатых поверхностей в стыке образуется множество пересекающихся микроканалов, число которых уменьшается при нагружении контакта сжимающими напряжениями из-за слияния отдельных пятен контакта.

Погонный массовый расход жидкости (расход на единицу длины по периметру уплотнения πd_y) через уплотнительный стык при равномерном распределении контактных напряжений по ширине зоны контакта l определяется выражением [1]

$$G_l = C_u \cdot C_f ,$$

где $C_f = \frac{R_{max}^3 \rho_\Delta p}{l\mu}$; R_{max} - максимальная высота неровностей ρ, μ плотность и вязкость среды;

$_{\Delta}p$ - перепад давлений; C_u - безразмерный коэффициент проницаемости;

$$C_u = \frac{\Lambda^3 K_f}{8\left(1-\eta^2\right)}, \qquad (1)$$

где, ν_i - коэффициент, определяющий долю эффективных микроканалов в уплотнительном стыке; Λ - плотность зазоров в стыке; η - относительная площадь контакта; $K_f = 1 - p_m/{}_{\Delta}p$; p_m - потери на местные сопротивления, для определения которых используется формула Вейсбаха. Параметр C_f содержит параметры, являющиеся исходными при проектировании уплотнений.

Целью настоящей работы является определение контактных характеристик η, Λ и ν_i, входящих в выражение (1), для тяжелонагруженных уплотнительных стыков, т.е. когда в значительной мере проявляется взаимное влияние неровностей.

Рассмотрим контакт жесткой шероховатой поверхности и ее отдельной сферической поверхности радиусом R с вершиной, расположенной на расстоянии uR_{max} от линии вершин шероховатой поверхности, с упругопластическим полупространством в системе цилиндрических координат ρ, φ, z с началом в точке О, принадлежащей недеформированной поверхности полупространства (рис.1). Влияние на характеристики контакта отдельной неровности в пределах круговой области $W_1\left(\rho = \overline{0, a_{ri}}\right)$ напряжений на остальных пятнах контакта будет эквивалентно влиянию равномерно распределенной нагрузки q_c, действующей в кольцевой области, $W_2\left(\rho = \overline{a_{ci}, a_L}\right)$, причем $a_L >> a_{ci}$.

Решение данной осесимметричной задачи приведено в работах [2-5]. Ниже приведем выражения, характеризующие контакт отдельной неровности и шероховатой поверхности с полупространством.

Распределение контактного давления на площадке контакта

$$q_{ri}(\rho) = \frac{4\eta^{0,5}\omega R_{max}}{\pi\theta a_{ci}}\sqrt{1-\frac{\rho_i^2}{a_{ri}^2}} + \frac{q_c}{\pi} arccos\frac{1-\eta_i\left(2-\rho_i^2/a_{ri}^2\right)}{1-\eta_i\rho_i^2/a_{ri}^2},$$

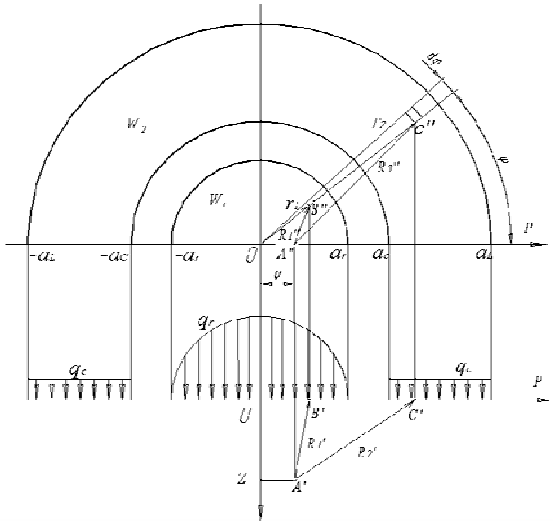


Рис. 1. Схема нагружения полупространства

контурное давление для отдельной неровности

$$q_{ci} = \frac{8\eta_i^{1,5}\omega R_{max}}{3\pi\theta a_{ci}} + q_c\psi_\eta(\eta_i), \qquad (2)$$

где

$$\psi_\eta(\eta_i) = \frac{2}{\pi}\left[arcsin\,\eta_i^{0,5} - \sqrt{\eta_i(1-\eta_i)}\right], \qquad (3)$$

В приведенных выражениях ω, R_{max} a_{ci} – параметры микрогеометрии; $\theta = E/\left(1-\mu^2\right)$- упругая постоянная; $\eta_i = a_{ri}^2/a_{ci}^2$.

Среднее q_{mi} и максимальное давление $q_{ri}(0)$ на пятне контакта

$$q_{mi} = \frac{q_{ci}}{\eta_i} = \frac{8\eta_i\omega R_{max}}{3\pi\theta a_c} + q_c\psi_\eta(\eta_i), \qquad (4)$$

$$q_{ri}(0) = \frac{4\eta_i^{0,5}\omega R}{\pi\theta a_{ci}} + \frac{q_c}{\pi} arccos\left(1-2\eta_i\right).$$

Упругий контакт шероховатой поверхности с полупространством описывается выражениями

$$F_q(\varepsilon) = \frac{\frac{8}{3\pi}\int_0^{min(\varepsilon,\varepsilon_s)}\eta_i^{1,5}\varphi_n'(u)\,du}{1-\int_0^{min(\varepsilon,\varepsilon_s)}\psi_\eta(\eta_i)\varphi_n'(u)\,du}; \qquad (5)$$

$$q_c(\varepsilon) = \int_0^{min(\varepsilon,\varepsilon_s)} q_{ci}\varphi_n'(u)du\ ,\ \eta(\varepsilon) = \int_0^{min(\varepsilon,\varepsilon_s)}\eta_i\varphi_n'(u)du\ ; \qquad (6)$$

где

$$F_q = \frac{\theta q_c a_c}{\omega R_{max}}, \qquad (7)$$

$$\eta_i = \frac{\varepsilon - u}{2\omega} - F_q\left[1 + \frac{F_q}{2}\sqrt{\left(1+\frac{F_q}{2}\right)^2 - \frac{\varepsilon - u}{2\omega}}\right]. \qquad (8)$$

Область применения выражений (2)…(8) ограничена критерием пластичности, определяющего начало пластической деформации [6].

В данном случае для описания опорной кривой поверхности $\eta(u)$ использовано распределение неполной бета-функции [7,8]

$$\eta(u) = \frac{B_u(\alpha,\beta)}{B(\alpha,\beta)},$$

где u - относительный уровень; $B_u(\alpha,\beta), B(\alpha,\beta)$ - неполная и полная бета-функции; α,β - параметры бета-функции, определяемые высотными параметрами шероховатости [2].

Функция и плотность распределения неровностей определяются выражениями:

$$\varphi_n(u) = \frac{u^{\alpha-1}(1-u)^{\beta-1}}{\varepsilon_S^{\alpha-1}(1-\varepsilon)^{\beta-1}}, \quad \text{где} \quad \varepsilon_S = \frac{\alpha-1}{\alpha+\beta-2};$$

$$\varphi_n'(u) = \frac{u^{\alpha-1}(1-u)^{\beta-1}\left[(\alpha-1)(1-u)-(\beta-1)u\right]}{\varepsilon_S^{\alpha-1}(1-\varepsilon)^{\beta-1}}. \qquad (9)$$

Для определения зависимости $\eta(q_c)$ или $\eta(F_q)$ необходимо решить систему трансцендентных уравнений, включающую выражения (2), (3) и (5)…(9).

Объем межконтактного пространства состоит из зазоров, приходящиеся на отдельные контактирующие и неконтактирующие неровности [3]

$$V_з = \begin{cases} V_{ri} = 2\pi\int\limits_{a_{ri}}^{a_c}\left[z_{10}(\rho) - z_{20}(\rho)\right]\rho d\rho; \\ V_{0i} = 2\pi\int\limits_{0}^{a_{ci}}\left[z_{ir}(\rho) - z_{2r}(\rho)\right]\rho d\rho, \end{cases} \qquad (10)$$

где z_{10}, z_{20} - уравнения, описывающие поверхности неконтактирующих неровностей и полупространства; z_{1r}, z_{2r} - уравнения, описывающие поверхности контактирующих неровностей и полупространства.

Тогда общий объем межконтактного пространства в стыке

$$V_з = \sum_{i=1}^{n_r} V_{ri} + \sum_{i=1}^{n_c - n_r} V_{0i},$$

а соответствующая ему плотность зазоров

$$\Lambda(\varepsilon) = \frac{V_з}{A_c R_{\max}} = \frac{1}{A_{ci} R_{\max}} \times \times\left[\int\limits_0^{\min(\varepsilon,\varepsilon_S)} V_{0i}\varphi_n'(u)du + \int\limits_{\min(\varepsilon,\varepsilon_S)}^{\varepsilon_S} V_{0i}\varphi_n'(u)du\right]. \qquad (11)$$

Учитывая, что $V_{ri} = A_{ci} R_{max} \Lambda_{ri}$ и $V_{0i} = A_{ci} R_{max} \Lambda_{0i}$, выражение (2) можно представить в виде

$$\Lambda(\varepsilon) = \int\limits_0^{min(\varepsilon,\varepsilon_S)} \Lambda_{ri}\varphi_n'(u)du + \int\limits_{min(\varepsilon,\varepsilon_S)}^{\varepsilon_S} \Lambda_{0i}\varphi_n'(u)du.$$

Определим уравнения поверхностей, входящие в выражения (10).

С учетом данных [3, разд. 3.3] и того, что $z_{10} = z_1 - U_0$, $r = a_c/(2\omega R_{max})$, получим

$$z_{10} = \omega R_{max}\left[x^2 - \frac{\varepsilon - u}{\omega} - 2F_q(k-1)\right], \qquad (12)$$

где $x = \frac{\rho}{a_c}$; $k = \frac{a_L}{a_c}$.

Уравнение полупространства $z_{20} = U_{Eci}$. С учетом выражения (3.6) из [3] получим

$$z_{20} = -\frac{4}{\pi}\omega R_{max} F_q\left[kE\left(\frac{x}{k}\right) - E(x)\right],$$

или, учитывая, что $E(t) = \frac{\pi}{2}{}_2F_1\left(-\frac{1}{2};\frac{1}{2};1;t^2\right)$, где $E(t)$ - полный эллиптический интеграл второго рода; ${}_2F_1$ - гипергеометрическая функция Гаусса, имеем

$$z_{20} = -2\omega R_{\max} F_q \times \times\left[k\,{}_2F_1\left(-\frac{1}{2};\frac{1}{2};1;\frac{x^2}{k^2}\right) - {}_2F_1\left(-\frac{1}{2};\frac{1}{2};1;x^2\right)\right]. \qquad (13)$$

Для контактирующей неровности

$$z_{1r} = z_{10}; \qquad (14)$$

$$z_{2r}=\begin{cases} z_{1r}, & 0\le x<\eta_i^{0,5};\\ U_{Eri}+U_{Eci}, & \eta_i^{0,5}\le x\le 1. \end{cases} \qquad (15)$$

Для определения U_{Eci} используем выражение (3.15) из [3]

$$U_{Eci}(\rho)=-\frac{2\theta}{\pi}\int_0^{a_r}\int_0^{\pi}\frac{q_{ri}(\rho_1)\rho_1 d\varphi d\rho_1}{\rho\sqrt{1-2(\rho_1/\rho)cos\,\varphi+(\rho_1/\rho)}}.$$

Учитывая, что

$$\int_0^{\pi}\frac{d\varphi}{\sqrt{1-2(\rho_1/\rho)cos\,\varphi+(\rho_1/\rho)^2}}=2K\left(\frac{\rho_1}{\rho}\right),$$ имеем

$$U_{Eci}(\rho)=-\frac{4\theta}{\pi}\int_0^{a_r}q_{ri}(\rho_1)\frac{\rho_1}{\rho}K\left(\frac{\rho_1}{\rho}\right)d\rho_1, \qquad (16)$$

где $K(t)$ - полный эллиптический интеграл первого рода.

Так как для $\eta_i\le 0{,}8$ форма эпюры $q_{ri}(\rho_i)$ незначительно отличается от формы эпюры контактных напряжений в задаче Герца, то

$$q_{ri}(\rho_i)=\frac{3}{2}q_{mi}\sqrt{1-\frac{\rho_i^2}{a_r^2}}, \qquad (17)$$

где q_{mi} определяется выражением (4).

Подставляя выражение (17) в (16), после интегрирования получим

$$U_{Eci}=-\omega R_{max}\frac{F_{qi}}{x}\,{}_2F_1\left(-\frac{1}{2};\frac{1}{2};\frac{5}{2};\frac{\eta_i}{x^2}\right). \qquad (18)$$

С учетом выражений (12) и (13) имеем

$$\Delta z_0=z_{10}-z_{20}=\omega R_{\max}\times$$

$$\times\left[x^2-\frac{\varepsilon-u}{\omega}-2F_q\times\left[(k-1)-k\,{}_2F_1\left(-\frac{1}{2};\frac{1}{2};1;\frac{x^2}{k^2}\right)+{}_2F_1\left(-\frac{1}{2};\frac{1}{2};1;x^2\right)\right]\right]$$

Аналогично, с учетом выражений (13), (14), (15) и (18) получим

.

$$\Delta z_r=z_{1r}-z_{2r}=\omega R_{\max}\times$$

$$\times\left[\begin{array}{l} x^2-\dfrac{\varepsilon-u}{\omega}-2F_q(k-1)+\\ +\dfrac{F_{qi}}{x}\,{}_2F\left(-\dfrac{1}{2};\dfrac{1}{2};\dfrac{5}{2};\dfrac{\eta_i}{x^2}\right)+\\ +2F_q\left[k\,{}_2F_1\left(-\dfrac{1}{2};\dfrac{1}{2};1;\dfrac{x^2}{k^2}\right)-{}_2F_1\left(-\dfrac{1}{2};\dfrac{1}{2};1;x^2\right)\right] \end{array}\right]$$

Учитывая, что $x^2=t$, имеем

$$V_{0i}=\pi a_c^2\int_0^1\Delta z_0(t)dt, \qquad V_{ri}=\pi a_c^2\int_{\eta_i}^1\Delta z_r(t)dt, \qquad (19)$$

Так как $\Lambda_i=\dfrac{V_i}{\pi a_c R_{max}}$, после интегрирования (19) получим

$$\Lambda_{0i}=\omega\left[\begin{array}{l}\dfrac{1}{2}-\dfrac{\omega-u}{\omega}-\\ -2F_q\left[(k-1)-k\,{}_2F_1\left(-\dfrac{1}{2};\dfrac{1}{2};2;\dfrac{1}{k^2}\right)+\dfrac{8}{3\pi}-1\right]\end{array}\right],$$

$$\Lambda_{ri}=\omega\cdot\left\{\begin{array}{l}(1-\eta_i)\left[\dfrac{1+\eta_i}{2}-\dfrac{\varepsilon-u}{\omega}-2F_q(k-1)\right]+\\ +2F_qk\left[{}_2F_1\left(-\dfrac{1}{2};\dfrac{1}{2};2;\dfrac{1}{k^2}\right)-\eta_i\,{}_2F_1\left(-\dfrac{1}{2};\dfrac{1}{2};2;\dfrac{\eta_i}{k^2}\right)\right]-\\ -2F_q\left[\dfrac{8}{3\pi}-\eta_i\,{}_2F_1\left(-\dfrac{1}{2};\dfrac{1}{2};2;\eta_i\right)\right]+\\ +F_{qi}\left[2\,{}_2F_1\left(-\dfrac{1}{2};\dfrac{1}{2};\dfrac{5}{2};\eta_i\right)-\dfrac{9\pi}{16}\eta_i^{0,5}\right]\end{array}\right\}.$$

Подставляя полученные выражения в (11), определяем плотность стыка $\Lambda(\varepsilon)$. Для определения зависимости $\Lambda(F_q)$ необходимо, исключить параметр ε из зависимостей $F_q(\varepsilon)$ и $\Lambda(\varepsilon)$.

На рис. 2 представлены зависимости плотности контакта от комплексного параметра F_q при контактировании двух шероховатых поверхностей, из которого следует, что плотность контакта не зависит от параметров α и β, так как зависимости для значений α и β равных 2,5; 3,5; 4,5, практически слились в одну линию.

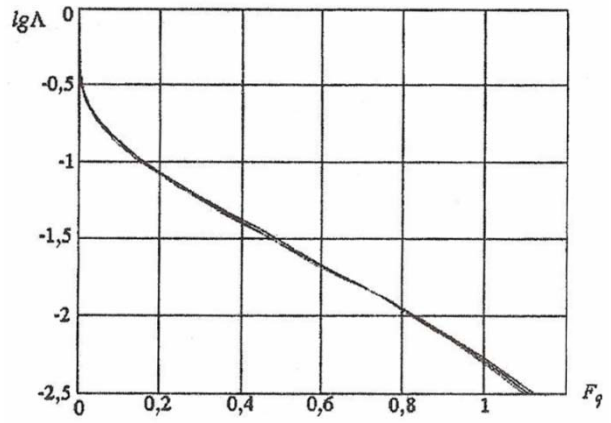


Рис. 2. Зависимость плотности стыка от комплексного параметра F_q

В работе [1] для определения доли эффективных микроканалов, по которым происходит утечка, использована модель шероховатости в виде случайного нормального поля. Полученные результаты справедливы для бесконечной ширины зоны контакта и не могут быть использованы в случаях, когда ширина зоны контакта соизмерима с шаговыми параметрами шероховатости.

Для определения доли эффективных микроканалов ν_i может быть использована вышеприведенная дискретная модель шероховатости. Поверхность единичной неровности согласно [8] описывается уравнением

$$z(x,y) = v + \omega[f(x) + f(y)], \qquad (20)$$

где $f(t) = \begin{cases} 0{,}5 - t^2, & |t| \le 0{,}5; \\ (1-|t|)^2, & 0{,}5 \le |t| \le 1. \end{cases}$, v - относительный уровень определяющий впадину неровности; ω - относительная высота неровности.

Используемая дискретная модель шероховатости позволяет определить долю эффективных микроканалов, если представить стык в виде плоской перколяционной модели [9]. Для этого введем вспомогательную функцию

$$x_i^* = \begin{cases} 1, & \eta_i < \eta_i^*; \\ 0, & \eta_i < \eta_i^*. \end{cases}$$

Тогда

$$x^* = \int_0^{\varepsilon_s} x_i^* \varphi'(u) du, \qquad (21)$$

где η_i^* - критическое значение η_i.

Используя модель единичной неровности, описываемой выражением (20), можно принять $\eta_i^* = 0{,}5..., 0{,}55$, так как при этих значениях η_i происходит перекрытие неровности в пределах своих границ пятном контакта.

Тогда для плоской перколяционной модели вероятность того, что через решетку будет проходить ток (аналог утечки) при приложении к краям решетки напряжения (аналог разности давлений)

$$\nu_i = 1 - 2\left(1 - x^*\right)^2. \qquad (22)$$

На рис. 3 представлены фрагменты некоторых плоских перколяционных моделей. Выражение (22) соответствует модели, представленной на рис. 3, б.

Решая обратную задачу можно определить относительную площадь контакта η^*, при которой $\nu_i = 0$, т. е. все неровности являются перекрытыми.

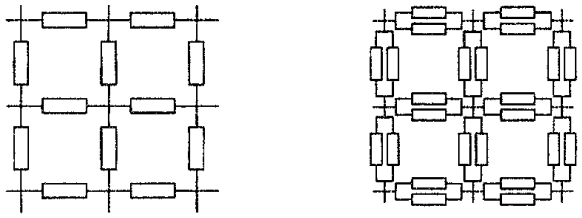


Рис. 3. Фрагменты плоских перколяционных моделей

Это представляет значительный интерес при конструировании уплотнений, так как позволяет определить безразмерный силовой комплексный параметр F_q, а следовательно, контактные напряжения, при которых утечка стремится к нулю. Например, для $\eta_{i1}^* = 0{,}5$ и $\eta_{i2}^* = 0{,}55$, $\nu_i = 0$ при $F_{q1} = 0{,}45$ и $F_{q2} = 0{,}527$ соответственно, при $\eta_1^* = 0{,}549$ и $\eta_2^* = 0{,}59$.

Однако в работе [9] не указаны размеры плоской перколяционной модели, поэтому выражение (22) следует использовать для модели с большой размерностью, т.е. если размер перколяционной модели $l = nS_0$, где S_0 - размер одной неровности, то выражение (22) следует использовать при $l >> S_0$.

Для S_0, соразмерных с l, в технической литературе данные, отсутствуют, поэтому приведем

поясняющие рассуждения. Допустим, что уплотнительный стык жесткой шероховатой поверхности с упругим полупространством шириной S и длиной l (причем $\pi d_c >> l$) при приложении равномерных контактных напряжений в плане представляет собой схему (рис. 4). При этом использована модель единичной неровности, описываемой выражением (20). В целом для стыка доля неровностей, для которых $\eta_i < \eta_i^*$, определяется выражением (21). Считаем, что доли неровностей, в каждой из n строк для которых $\eta_i < \eta_i^*$, также определяются выражением (22).

Рассмотрим стык шириной $l = S_0$, т. е. $n = 1$. Вероятность того, что *i*-я неровность является проводящей (т. е. представляет собой микроканал, через который происходит утечка среды), $v_1 = x^*$.

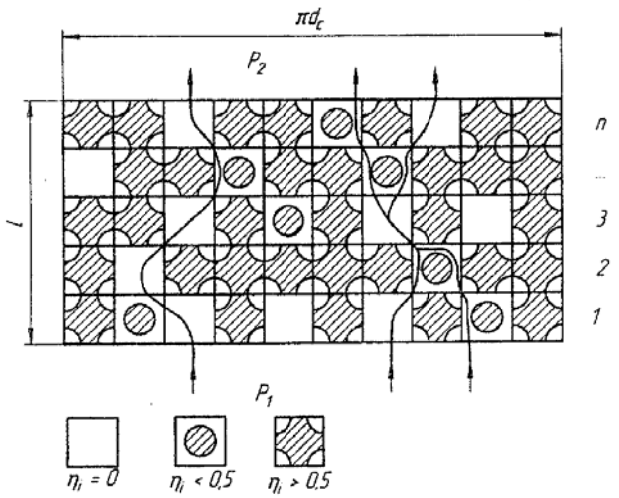


Рис. 4. Схема уплотнительного стыка в плане при равномерном приложении контактных напряжений

Рассмотрим стык шириной $l = 2S_0$, т. е. $n = 2$. Возьмем произвольную неровность, для которой $\eta_i < \eta_i^*$. Она будет являться проводящей, если в первой строке неровность, для которой, будет находиться либо напротив, либо по диагонали слева или справа (см. рис. 4). Тогда вероятность того, что она является проводящей, равна $v_{2i} = {}_{min}(3v_1, 1)$, таким образом, если $v_1 > 1/3$, $v_2 = 1$. Общая вероятность для стыка с $n = 2$

$$v_2 = {}_{min}(3v_1, 1)x^* = {}_{min}(3x^*, 1)x^*, \quad \text{или}$$

$$v_2 = \begin{cases} x^*, & x^* \ge \dfrac{1}{3}; \\ 3x^{*2}, & x^* < \dfrac{1}{3}. \end{cases}$$

Аналогично рассуждая, для $n = 3$ получим

$$v_{3i} = {}_{min}(3v_2, 1),$$

$$v_3 = {}_{min}(3v_2, 1)x^* = \begin{cases} x^*, & x^* \ge \dfrac{1}{3}; \\ 3^2 x^{*3}, & x^* < \dfrac{1}{3}. \end{cases}$$

Тогда для стыка шириной $l = nS_0$ имеем

$$v_n = \begin{cases} x^*, & x^* \ge \dfrac{1}{3}; \\ 3^{n-1} x^{*n}, & x^* < \dfrac{1}{3}. \end{cases}$$

На рис. 5 приведены зависимости $v_n(F_q)$ при $n = 1, 5, 10, 20$ и $v_i(F_q)$, определяемая выражением (22). Как следует из рис.5, имеется достаточно хорошее совпадение результатов v_i и v_n при больших n.

При этом зависимость $v_i(F_q)$ уменьшается более резко, зависимость $v_n(F_q)$, поэтому в дальнейшем предпочтительно использовать выражение (5), что дает некоторый запас герметичности в сравнении с выражением (22) при $F_q > 0{,}36$.

На рис. 6 представлена зависимость параметра C_u от комплексного безразмерного параметра, F_q рассчитанного по выражению (1).

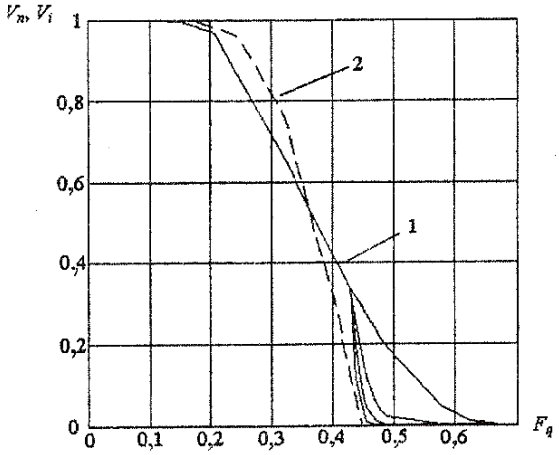


Рис. 5. Зависимость $v_n(F_q)$ при $n = 1, 5, 10, 20$ (семейство кривых 1) и $v_i(F_q)$ (кривая2)

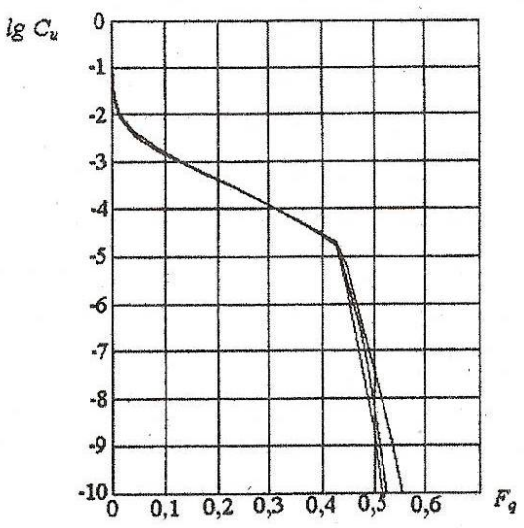


Рис. 6. Зависимость коэффициента проницаемости от комплексного параметра F_q

Как следует из рис. 6, при $F_q > 0{,}427$ наблюдается разветвление кривой, связанное с изменением ν_n при разной ширине контакта. Из приведенной зависимости следует важный вывод, что существуют три зоны герметизации: первая - зона начальной герметизации при $0 < F_q < 0{,}06$, когда значение C_u меняется на один порядок; вторая - зона стабильной герметизации при $0{,}06 < F_q < 0{,}427$, когда C_u меняется на два порядка; третья - зона эффективной герметизации при $F_q > 0{,}427$, когда при незначительном изменении F_q значение C_u может изменяться на несколько порядков.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Огар П. М., Герасимов С. В., Сухов О. Ю., Глинов С. Н. Моделирование массопереноса через стык шероховатых поверхностей. // Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ: Межвуз. темат. сб. тр. /СПбГАСУ. - СПб., 2001. - Вып.7. - С. 108—116.
2. Огар П.М., Корсак И.И. Влияние характеристик стыка шероховатых уплотнительных поверхностей на герметичность. – Братск: БрИИ, 1989. – 110с. Деп. в ВИНИТИ, №6109 – В90.
3. Долотов А.М., Огар П.М., Чегодаев Д.Е. Основы теории и проектирование уплотнений гидропневмоарматуры летательных аппаратов. – М.; Изд-во МАИ, 2000.- 296 с.
4. Огар П.М., Шеремета Р.Н., Лханаг Д. Герметичность металлополимерных стыков шероховатых поверхностей. – Братск: Изд-во БрГУ, 2006. – 159 с.
5. Огар П.М., Сухов О.Ю., Ереско С.П. Моделирование упругого контакта тяжелонагруженых шероховатых поверхностей // Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ: межвуз. темат. сб. тр. – СПб.: СПбГАСУ. – 2002. – 8.- С.305-310.
6. Огар П.М., Дайнеко А.А., Клюс С.С. Критерии пластичности при моделировании контакта тяжелонагруженных шероховатых поверхностей. //Системы. Методы. Технологии. – Братск: БрГУ. - 2009, №1. – С. 14-18.
7. Огар П.М., Корсак И.И Сухов О.Ю. Математическая модель шероховатой поверхности //Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ: Межвуз. темат. сб. тр. Вып.6.-СПб.: СПбГАСУ, 2000. С.49-55.
8. Огар П.М., Корсак И.И., Сухов О.Ю. Связь параметров модели шероховатой поверхности со стандартными параметрами шероховатости// Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ: Межвуз. темат. сб. тр. Вып.7. - СПб.: СПбГАСУ, 2001. С.183-191.
9. Соколов И.М. Размерности и другие геометрические показатели в теории протекания // Успехи физических наук . – 1986. – Т. 150. – № 2. – С. 221 – 256.

Рябов И.М., Чернышов К.В., Пылинская Т.В., Гасанов М.М., Абдулаев М.Ш., Гечекбаев Ш.Д.

УДК 629.118.74

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ПОДВЕСКИ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА С УПРУГОДЕМПФИРУЮЩИМ ПРИВОДОМ РЕГУЛЯТОРА СТАТИЧЕСКОГО ПОЛОЖЕНИЯ

Математическая модель пневматической подвески транспортного средства с упругодемпфирующим приводом регулятора статического положения кузова была разработана для оценки влияния этого регулятора и его привода на динамическое положение кузова (смещение динамической нейтрали относительно статической), которое изменяется из-за несимметричности характеристики амортизаторов. Расчетная схема колебательной системы представлена на рис. 1. Использована трехмассовая колебательная система, которая содержит неподрессоренную массу $m_{нп}$, подрессоренную массу $M_п$ и массу привода регулятора $m_п$. Все массы, связанны между собой упругими (1, 3, 5) и демпфирующими (2, 4, 6) связями.. Неподрессоренная масса опирается на дорогу через шину, которая в модели представлена упругим элементом 3 с жесткостью $C_ш$ и амортизатором 4 с коэффициентом сопротивления $k_ш$, характеризующими радиальную жесткость шины и затухание в ней.

Пневматический упругий элемент 1 через регулятор статического положения кузова 5 связан с ресивером со сжатым воздухом, либо с атмосферой. Регулятор 5 закреплен на подрессоренной массе, а его упругодемпфирующий привод установлен на неподрессоренной массе. Данная система имеет три степени свободы.

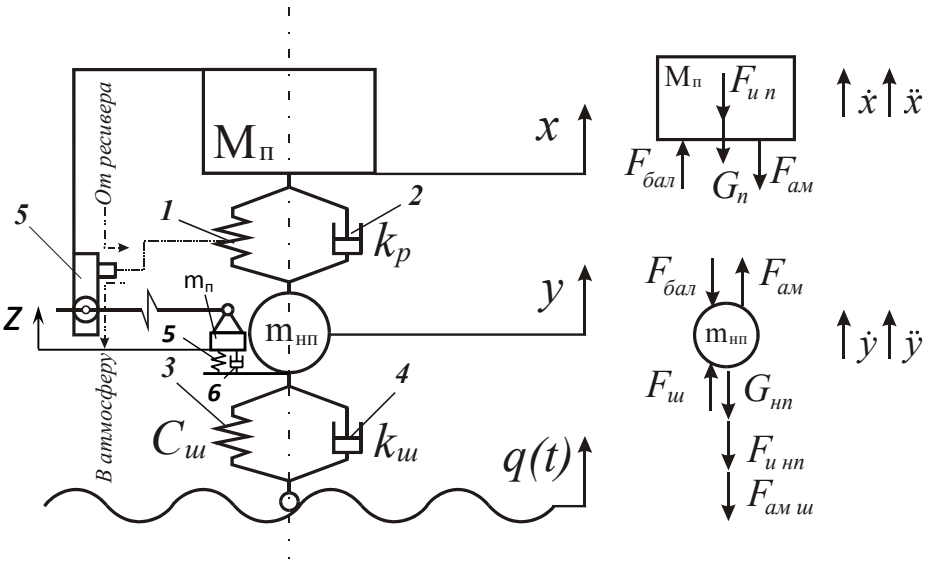


Рис. 1. Расчетная схема пневматической подвески транспортного средства с упругодемпфирующим приводом регулятора уровня пола

Первая степень свободы – вертикальное перемещение подрессоренной массы $M_{\text{п}}$, положение которой определяется обобщенной координатой X.

Вторая степень свободы – вертикальное перемещение неподрессоренной массы $m_{\text{нп}}$, положение которой определяется обобщенной координатой Y.

Третья степень свободы – вертикальное перемещение подрессоренной массы привода регулятора $m_{\text{п}}$, положение которой определяется обобщенной координатой Z.

Движение этой системы будем рассматривать в инерциальной системе координат, связанной с землей. Координату X будем отсчитывать от положения статического равновесия подрессоренной массы $M_{\text{п}}$, а координату Y – от положения статического равновесия неподрессоренной массы $m_{\text{нп}}$.

Система движется под действием кинематического возмущения, обусловленного профилем дороги.

Микропрофиль дороги описывается функцией:

$$q = q(t), \qquad (1)$$

где t - время в с.

Для исследования колебательной системы применим принцип Даламбера.

Уравнения, описывающие движение подрессоренной и неподрессоренной масс, примут вид (см. рис. 1):

$$\begin{cases} -F_{\text{ип}} - G_{\text{п}} + F_{\text{бал}} - F_{\text{ам}} = 0; \\ -F_{\text{инп}} - G_{\text{нп}} - F_{\text{бал}} + F_{\text{ам}} - F_{\text{амш}} + F_{\text{ш}} = 0. \end{cases} \qquad (2)$$

где: $F_{\text{ип}}$ – сила инерции подрессоренной массы; $G_{\text{п}}$ – сила тяжести подрессоренной массы; $F_{\text{бал}}$ – сила, создаваемая упругим элементом; $F_{\text{ам}}$ – сила, создаваемая амортизатором; $F_{\text{инп}}$ – сила инерции неподрессоренной массы; $G_{\text{нп}}$ – сила тяжести неподрессоренной массы; $F_{\text{амш}}$ – сила, имитирующая амортизирующие свойства шины; $F_{\text{ш}}$ – сила, имитирующая упругие свойства шины.

Характеристику амортизатора примем линейной, несимметричной. Тогда сила сопротивления амортизатора определяется по зависимости:

$$F_{\text{ам}}\left(\frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}\right) = \begin{cases} k_{\text{отб}} \cdot \left(\frac{dx}{dt} - \frac{dy}{dt}\right) & \text{при } \frac{dx}{dt} > \frac{dy}{dt}, \\ k_{\text{спс}} \cdot \left(\frac{dx}{dt} - \frac{dy}{dt}\right) & \text{при } \frac{dx}{dt} < \frac{dy}{dt}. \end{cases} \qquad (3)$$

где $k_{\text{отб}}$, $k_{\text{спс}}$ – коэффициент сопротивления амортизатора соответственно при отбое и при сжатии, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$. Коэффициенты определяются методом энергетической линеаризации.

Упругая характеристика шины описывается следующей зависимостью:

$$F_{\text{ш}}(y, q) = \begin{cases} 0 & \text{при } (y-q) > f_{\text{ш}_0}, \\ \text{c}_{\text{ш}} \cdot \left(f_{\text{ш}_0} - (y-q)\right) & \text{при } f_{\text{ш}_{\max}} \le (y-q) \le f_{\text{ш}_0}, \\ \text{c}_{\text{ш}} \cdot \left(f_{\text{ш}_0} - f_{\text{ш}_{\max}}\right) + c_{\text{об}} \cdot \left(f_{\text{ш}_{\max}} - (y-q)\right) & \text{при } (y-q) < f_{\text{ш}_{\max}}, \end{cases} \qquad (4)$$

где $f_{\text{ш}_0}$ – начальная деформация шины; q – высота неровностей дороги, м; $c_{\text{ш}}$ – жесткость шины,

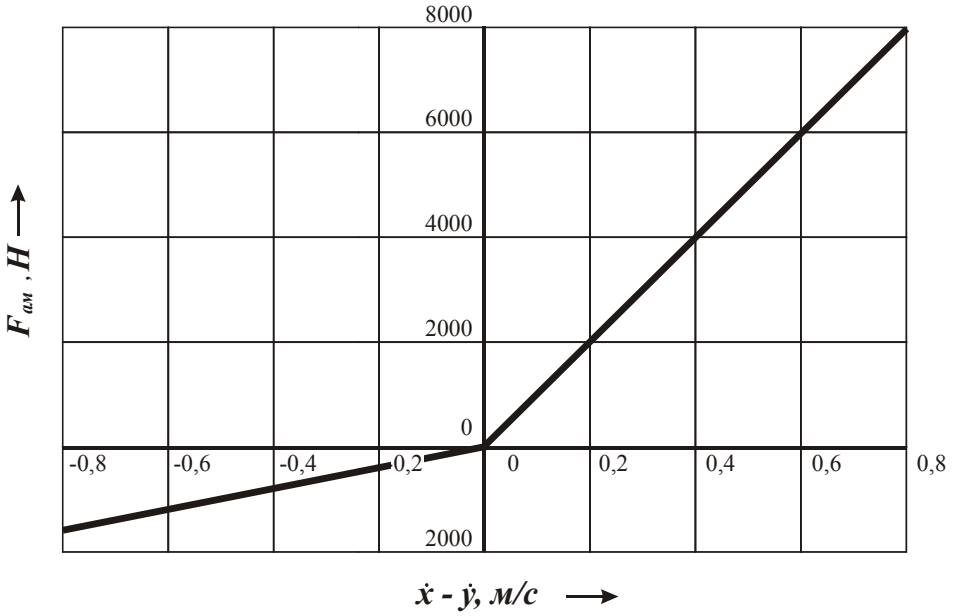


Рис. 2. Характеристика амортизатора

Н/м; $f_{ш_{max}}$ - минимальная высота шины до упора в обод колеса, м; $c_{об}$ - жесткость обода колеса, Н/м.

Следует отметить, что подобное представление упругой характеристики шины позволяет учитывать отрыв колеса от дороги.

Амортизирующие свойства шины имитируются силой, пропорционально зависящей от скорости деформации шины:

$$F_{амш}\left(\frac{dy}{dt}, \frac{dq}{dt}\right) = k_ш \cdot \left(\frac{dy}{dt} - \frac{dq}{dt}\right) \text{ при } (y-q) < f_{ш_0}, \quad (5)$$

где $k_ш$ - коэффициент амортизации шины, кг/с.

Силы тяжести подрессоренной $G_п$ и неподрессоренной $G_{нп}$ масс в Н:

$$G_п = m_п \cdot g \ , \quad (6)$$

$$G_{нп} = m_{нп} \cdot g \ , \quad (7)$$

где $m_{п,}$ $m_п$ – соответственно подрессоренная и неподрессоренная массы, кг.

Силы инерции подрессоренной $F_{ип}$ и неподрессоренной $F_{инп}$ масс в Н :

$$F_{ип} = m_п \cdot \frac{d^2x}{dt^2}, \quad (8)$$

$$F_{инп} = m_{нп} \cdot \frac{d^2y}{dt^2}. \quad (9)$$

После подстановки выражений (3) – (9) в систему уравнений (2) получим:

$$\begin{cases} -m_п \cdot \dfrac{d^2x}{dt^2} - m_п \cdot g + F(x, y, T) - \\ -F_{ам}\left(\dfrac{dx}{dt}, \dfrac{dy}{dt}\right) = 0, \\ -m_{нп} \cdot \dfrac{d^2y}{dt^2} - m_{нп} \cdot g - F(x, y, T) + \\ +F_{ам}\left(\dfrac{dx}{dt}, \dfrac{dy}{dt}\right) + F_ш(y, q(t)) - \\ -F_{амш}\left(\dfrac{dy}{dt}, \dfrac{dq(t)}{dt}\right) = 0, \\ \dfrac{dT}{dt} = \dfrac{1}{G \cdot C_V} \cdot \left(\begin{array}{l} k_t \cdot \dfrac{S}{b} \cdot (T - T_{нар}) - \\ -P \cdot \dfrac{dV}{d(x-y)} \cdot \dfrac{d(x-y)}{dt} \end{array} \right). \end{cases} \quad (10)$$

Решение системы уравнений (10) осуществлялось численным методом Рунге-Кутты второго порядка. Расчет производился для пневматической подвески автобуса ЛАЗ-5259, необходимые параметры которой приведены в таблице 1.

Неровности дороги были заданы синусоидальным профилем:

$$q = q_0 \cdot \sin \frac{2\pi \cdot V_а}{l_в}, \quad (11)$$

где q_0 – амплитуда высоты неровностей, м; $V_а$ –

Таблица 1

Параметры пневматической подвески автобуса ЛАЗ-5259

Наименование	Обозначение	Значение
1. Жесткость резинового буфера сжатия, Н/м	$c_{сж}$	65000
2. Жесткость резинового буфера отбоя, Н/м	$c_{отб}$	20000
3. Давление воздуха в баллоне в положении статического равновесия, МПа	p_0	0,447
4. Объем баллона в положении статического равновесия, м^3	V_0	0,0126
5. Температура воздуха в баллоне в положении статического равновесия, $^\circ$К	T_0	293
6. Универсальная газовая постоянная для воздуха, Дж/кг·К	R	287
7. Масса воздуха, кг	G	0,0599
8. Начало включения буфера сжатия, м	$H_{сж}$	- 0,07
9. Начало включения буфера отбоя, м	$H_{отб}$	0,06
10. Коэффициент сопротивления амортизатора, кг/с:		
при сжатии	$k_{сж}$	2000
при отбое	$k_{отб}$	10000
11. Подрессоренная масса, кг	$m_п$	1745
12. Неподрессоренная масса, кг	$m_{нп}$	400
13. Жесткость шины, Н/м	$c_ш$	$2{,}2 \cdot 10^6$
14. Максимальная деформация шины, м	$f_{шmax}$	-0,03
15. Коэффициент теплопроводности стенок баллона, Вт/м·К	k_t	0,2
16. Толщина стенки баллона, м	b	0,006
17. Площадь теплопередачи, м^2	S	0.05
18. Температура окружающей среды, К	$T_{нар}$	293
19. Теплоемкость воздуха, Дж/кг·К	C_V	1005

скорость движения автомобиля, м/с; $l_в$ – длина неровностей, м.

Частота возмущающего воздействия в $с^{-1}$:

$$\omega_в = \frac{V_а}{l_в}. \qquad (12)$$

На рис. 3 приведен пример решения в виде осциллограммы колебаний. Частота воздействия соответствует высокочастотному резонансу, который наиболее вероятен при движении транспортного средства. На осциллограмме видно, что в начале движения происходит существенное смещение динамической нейтрали (на 5,5 см), а колебания подрессоренной массы обусловлены двумя гармоническими составляющими с собственной частотой колебаний подвески и частотой возмущения от неровностей дороги. По мере затухания низкочастотной гармоники, обусловленной собственной частотой подвески, колебания переходят в режим установившегося движения. При этом подрессоренная масса совершает колебания с частотой возмущающего воздействия.

В ходе расчета движения колебательной системы фиксировались следующие показатели:

1) амплитуда колебаний подрессоренной массы при установившемся движении;

2) амплитуда колебаний скорости и ускорения подрессоренной массы при установившемся движении;

3) минимальное расстояние до буфера отбоя;

4) минимальное расстояние до буфера сжатия;

5) смещение динамической нейтрали относительно статической;

6) показатели стабильности установившегося движения:

- частота колебания подрессоренной массы (должна совпадать с частотой возмущающего воздействия);
- отношение максимальных отклонений в двух смежных периодах колебаний (должно равняться 1);

7) пробой подвески при сжатии в % от всего времени движения;

8) пробой подвески при отбое в % от всего времени движения;

9) отрыв колеса от дороги в % от всего времени движения;

10) пробой подвески при сжатии за один период колебаний при установившемся движении в % от времени периода;

11) пробой подвески при отбое за один период колебаний при установившемся движении в % от времени периода;

12) отрыв колеса от дороги за один период колебаний при установившемся движении в % от времени периода;

13) амплитуда колебаний высоты пневматического баллона.

Пробой подвески определялся по колебаниям высоты пневматического баллона (рис.4).

14) пробой подвески при отбое за один период колебаний при установившемся движении в % от времени периода;

15) отрыв колеса от дороги за один период колебаний при установившемся движении в % от времени периода;

16) амплитуда колебаний высоты пневматического баллона.

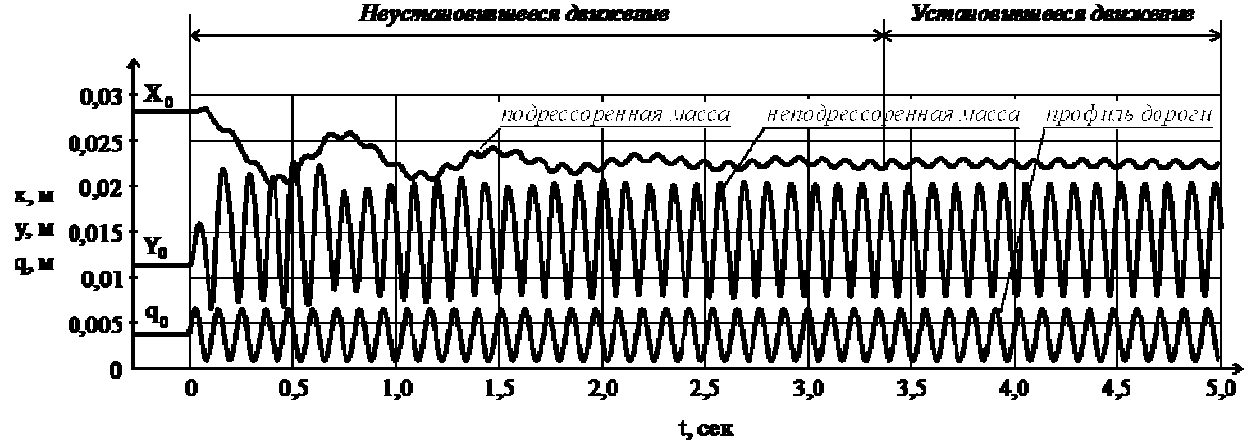


Рис. 3. Осциллограмма колебаний подрессоренной и неподрессоренной масс при движении автомобиля по дороге синусоидального профиля

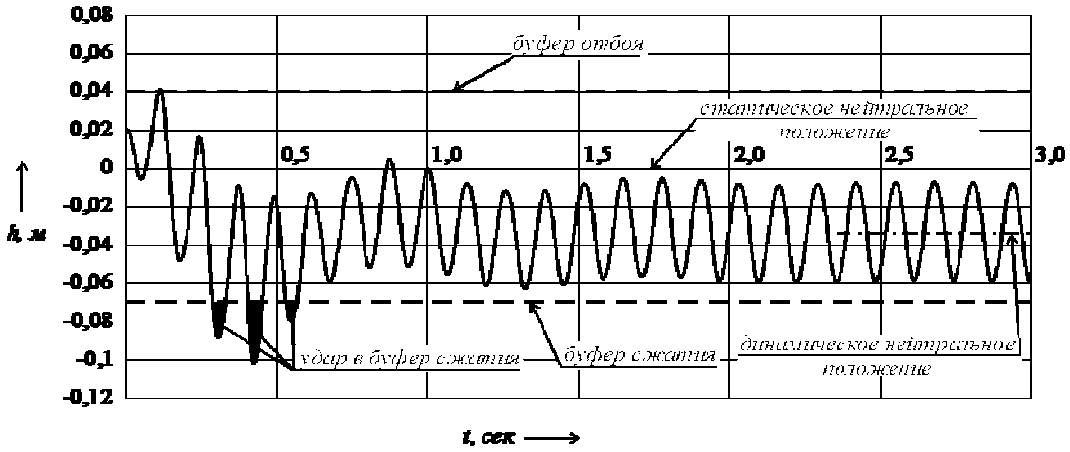


Рис. 4. Колебания высоты пневматического упругого элемента

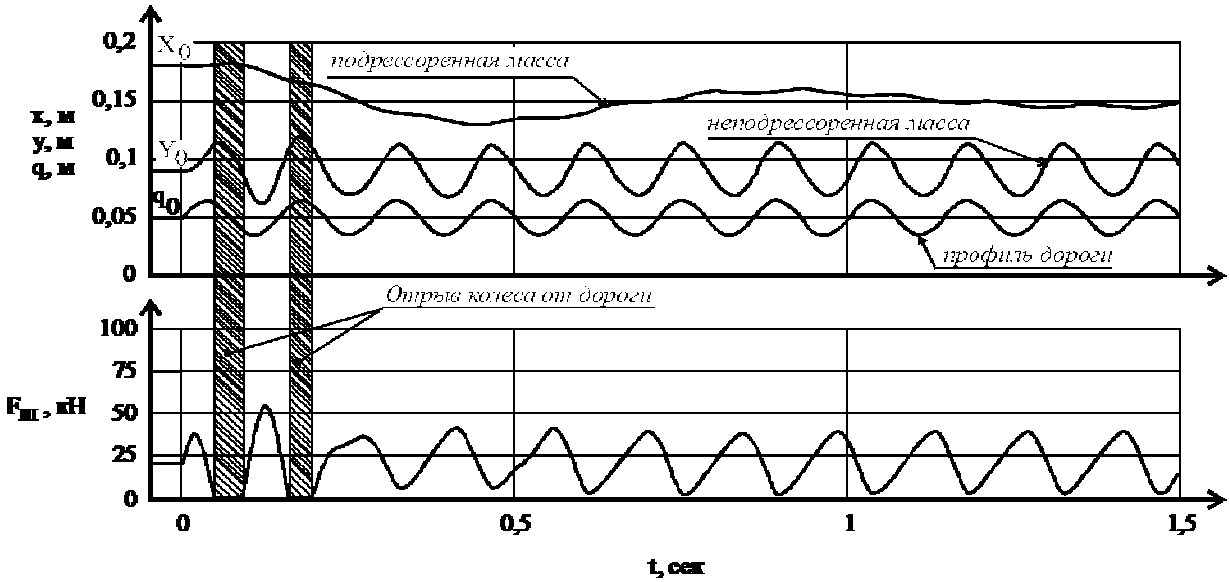


Рис. 5. Движение колебательной системы с отрывом колеса от дороги

Пробой подвески определялся по колебаниям высоты пневматического баллона (рис.4).

Удар в буфер сжатия происходит в момент, когда высота баллона становилась ниже зоны включения буфера сжатия, а удар в буфер отбоя – в момент, когда высота баллона становилась выше зоны включения буфера отбоя.

Отрыв колеса от дороги фиксировался по величине силы сжатия шины $F_ш$. Если значение силы становилось равным нулю, то происходил отрыв колеса от дороги (рис. 5).

Таким образом, проведенное исследование показало, что при движении транспортного средства происходит нежелательное смещение динамической нейтрали относительно статической, которое приводит к пробоям подвески. Снизить смещение динамической нейтрали можно путем подбора характеристик регулятора и его упруго-демпфирующего привода.

Ереско Т.Т., Тубольцев А.А.

УДК 621.8.031.4

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ И РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ГИДРОПНЕВМОУДАРНЫХ АГРЕГАТОВ

Повышение эффективности и снижение вибраций машин ударного действия, в частности гидравлических ударных механизмов, является важной и сложной задачей, трудность решения которой обусловлена противоречивостью практических требований. Уровни и характер вибраций определяются не только принципиальными и конструктивными особенностями гидроударных механизмов и динамическими характеристиками гидропривода базовой машины, но и энергетическими параметрами разрушения обрабатываемых сред. Поэтому перспективные вибробезопасные гидромолоты должны обладать способностью воздействия на обрабатываемую среду различной прочности и физико-механического состояния в режимах максимальной эффективности. В связи с этим целью данной работы является разработка вибробезопасного высокоэффективного гидроударного механизма с рациональным сочетанием рабочих параметров. В настоящее время создание ударных машин и механизмов идет, в основном, на базе электрических, пневматических и гидравлических приводов [l-5]. В соответствии с этим преобразование подводимой энергии в возвратно-поступательное движение бойка в ударных устройствах в зависимости от применяемого типа привода достигается различными способами. Однако, для каждого класса устройств, кроме специфических источников вибрации (как правило, второстепенных), характерны общие признаки динамической неравномерности хода рабочего органа. Поэтому при анализе работы гидравлических ударных механизмов целесообразно использовать общие методы исследования и оценки динамических свойств вибробезопасных систем.

Снижение вибраций машин ударного действия является важной и сложной, но все же второстепенной задачей. Кроме вибробезопасности, они должны обладать высокой производительностью, малым весом и габаритами, высокой энергией удара, надежностью при работе в тяжелых условиях, потреблять минимум энергии, обладать легкостью в управлении и иметь низкую себестоимость изготовления.

Прежде всего, целесообразно рассмотреть причины, порождающие вибрации. Как известно [6-8], источников вибрации несколько. Интенсивность каждого из них зависит от класса ударного механизма, типоразмера, условий его эксплуатации, типа базовой машины и других факторов. К числу наиболее существенных источников вибрации следует отнести следующие:

1. Реакция отдачи бойка ударного механизма, которая действует на его корпус в сторону, противоположную движению ударника и является источником регулярной составляющей вредных нагрузок на оператора или навеску базовой машины.

2. Соударение инструмента с корпусом, обусловленное отскоком инструмента от обрабатываемой среды, которое приводит к возникновению высокочастотных гармоник спектра вибраций.

3. Периодическое перемещение корпуса вслед за инструментом, при заглублении последнего в обрабатываемую среду, приводит к низкочастотным колебаниям элементов конструкции базовой машины или оператора.

4. Резкий провал инструмента, связанный с разрушением обрабатываемой среды, приводит к появлению в металлоконструкции гидроударного механизма значительных пиковых нагрузок.

Низкочастотные колебания (2-2,5 Гц) вызываются реакцией отдачи ударника, периодическим и непериодическим движением масс корпуса гидроударника. Высокочастотные колебания (80-100 кГц) определяются отражением энергии удара от обрабатываемой среды и волновой передачей ее в систему «инструмент-корпус-оператор».

Колебания промежуточных частот занимают основную часть спектра вибраций, природа воз-

никновения их, как правило, сложна и не может однозначно определяться ни одним из вышеперечисленных источников.

Анализ результатов работ [21,22] позволяет сделать предположение, что основными источниками промежуточных вибраций являются: пульсация давления рабочей жидкости в гидроприводе и полостях гидропневмоударного агрегата за период рабочего цикла и процесс взаимодействия элементов ударника и рабочей жидкости в ударный и послеударный периоды цикла.

Однако, определение источников возникновения вибраций не является достаточным условием для разработки вибробезопасных гидроударных механизмов.

Другим важным аспектом является выбор составляющих структуры ударной мощности - энергии удара и частоты воздействия. Необоснованное завышение энергии удара снижает эффективность вибрационной защиты систем и отрицательно сказывается не только на состоянии базовой машины, но и на производительности гидроударного механизма [11].

Способы борьбы с вибрацией принято разделять на пассивные и активные.

К пассивным способам борьбы с вибрациями относят применение средств виброизоляции [12-19]: различного типа амортизаторов, индивидуальных средств виброзащиты, автоподатчиков, пневмоподдержек и других видов устройств манипуляционного типа.

Перечисленные средства виброзащиты эффективны в ударных механизмах малой мощности [20]. Применение их для снижения действия вибрации в гидравлических и гидропневматических молотах, энергия единичного удара которых лежит в пределах от 1500 Дж до 10000 Дж, нецелесообразно, по следующим причинам:

- низкочастотную реакцию отдачи можно компенсировать усилием статического прижима базовой машины;

- для высокочастотных составляющих вибрации виброизоляция (пружины, рессоры, пневматические и гидравлические демпферы) являются своеобразным волноводом с трансформацией колебаний промежуточных частот.

Методы активной виброзащиты ударных механизмов сводятся к следующему [20] :

1. Рациональный выбор параметров ударных механизмов.

2. Совершенствование рабочего цикла.

3. Совершенствование конструкций.

Сущность метода снижения вибрации за счет рационального выбора параметров, заключается в том, что энергия удара и частота воздействия могут быть получены при различных сочетаниях хода, активной площади и массы ударника.

Однако возможности этого способа ограничены ввиду того, что для обеспечения требуемой энергии удара с уменьшением массы ударника необходимо увеличивать его скорость. Это приводит к возрастанию сил сопротивления при рабочем ходе и понижению коэффициента полезного действия машины. Этот метод еще называют [14] методом максимизации скорости соударения ударника и инструмента. Увеличение скорости соударения также ограничено контактной прочностью соударяющихся тел. Известно, что для стальных деталей предельное значение скорости соударения не должно превышать 15 м/с.

Совершенствование рабочего цикла в ударных механизмах может быть осуществлено не только рациональным выбором параметров, но и за счет использования вспомогательной массы, движущейся в противофазе с основной ударной массой. Теоретическое обоснование этого способа, позволяющего в принципе исключить основной источник вибрации - реакцию отдачи выполнено Б.В. Суднишниковым [9] для пневматических машин ударного действия.

Особую группу пневматических, гидравлических и гидропневматических ударных механизмов представляют механизмы, рабочий процесс которых формируется с участием двух поршней, из которых, по меньшей мере, один является ударным. С введением второго поршня несколько усложняется конструкция, появляется проблема устойчивости согласованного движения поршней, но при достаточном запасе устойчивости представляется принципиальная возможность создания динамически уравновешенных ударных механизмов. Кроме того, введение второго поршня при симметричном рабочем цикле может служить средством повышения ударной мощности за счет повышения частоты ударов [23,24].

В результате изучения литературных и патентных материалов выявлено более 50 первоисточников с предложениями по созданию двухпоршневых ударных механизмов (в основном пневматических). Содержащиеся в них данные имеют разную степень проработки - от идеи до конструктивных схем.

Производительность машин ударного действия, в частности гидроударных механизмов, определяется скоростью разрушения обрабатываемой среды, которая зависит от структуры распределения ударной мощности по энергии удара и частоте воздействия. С другой стороны, уровень вибраций,

следовательно, надежность и долговечность конструкции ударного механизма и базовой машины зависит от величины ударного импульса и скорости соударения. При этом недостаток энергии удара приводит к снижению производительности ударного механизма, а избыток - к повышению уровня вибрации. Поэтому, при разработке ударных механизмов структурное распределение мощности по энергии удара и частоте воздействия должно определяться условием обеспечения наиболее эффективного режима работы в средах с определенными физико-механическими свойствами. Результаты работ [21,22] показали, что разрушение обрабатываемых сред высокой прочности необходимо вести с большей энергией удара, а разрушение сред низкой прочности - соответственно с меньшей энергией при повышенной частоте ударов.

В настоящее время автоматические ударные системы с самонастройкой оптимальных рабочих параметров представляют собой новую область ударной техники и работы по их созданию находятся в стадии определения направлений исследования и поиска технических решений. Трудности решения этих задач заключаются не только в сложности конструктивных схем ударных механизмов с самонастройкой рабочих параметров, но и в неопределенности выбора регулировочных характеристик по оптимизации разрушения обрабатываемых сред.

В горной промышленности проблема создания ударных механизмов с регулируемой энергией удара при бурении скважин составными штангами стоит особенно остро. В ИГД им. А.А. Скочинского за последнее десятилетие создано несколько пневмоударников с регулируемыми параметрами. Совершенствование конструкций пневмоударных механизмов буровых машин заключалось в разработке новых способов ручного и комбинированного регулирования энергии удара в процессе бурения [24-26]. При этом регулирование энергии удара с пульта управления производилось двумя способами: изменением давления подачи сжатого воздуха; изменением хода поршня-ударника. Второй способ управления оказался предпочтительнее, так как ударная мощность и КПД механизма на всех режимах работы оставались практически постоянными.

Наиболее совершенны на данном этапе разработки Карагандинским политехническим институтом адаптивного гидропневматического молота, регулирование параметров в котором производится по величине отскока ударника, то есть по величине отраженной энергии удара от разрушаемой среды.

Существенным недостатком этого молота является низкая ударная мощность базовой конструкции ударного механизма, частота которого с гидроприводом от экскаватора ЭО-2621 и с энергией удара - 1500 Дж не превышает 22Гц. Ручной гидропневмоударный молоток, выполненный по этой конструктивной схеме, при производительности 60 л/мин развивает частоту ударов 25 Гц, в сравнении с ним ручной молоток КФ ВНИИстройдормаш при производительности насоса 30 л/мин развивает частоту 33 Гц.

Таким образом, ударные механизмы с низкой ударной мощностью и, следовательно, с низкой частотой ударов сужают область регулирования основных параметров и ставят под сомнение целесообразность разработки на их базе автоматических систем.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что для повышения производительности и эффективности эксплуатации перспективные конструкции гидроударных механизмов должны представлять собой системы с ручной и автоматической настройкой рабочих параметров. При этом, в зависимости от назначения ударных механизмов, выходными регулируемыми рабочими параметрами должны быть: энергия удара, частота ударов, ударная (эффективная) мощность и параметры динамического воздействия на базовую машину или оператора (вибрации), а входными параметрами управления – силовые и конструктивные характеристики гидропривода .

Выбор рациональных сочетаний рабочих параметров гидроударных механизмов на стадии проектирования заключается в определении гидромеханических связей ударной части, напорной и сливной линий гидропривода и распределительного органа в различные периоды рабочего цикла.

Исходя из поставленных задач, наиболее рациональным представляется следующая структурная схема гидромеханических связей за рабочий цикл:

1. Совмещение периодов переключения механизма на "взвод" и "рабочий ход" соответственно с окончаниями периодов рабочего хода и взвода ударника.

2. Исследование энергии потока жидкости в период взвода ударника на перемещение последнего и на аккумулирование энергии в напорной части гидросистемы.

3. Отключение линии слива в период рабочего хода ударника с использованием энергии потока жидкости на разгон последнего или на акку-

мулирование энергии в напорной части гидропривода и ударного механизма.

Реализация вышеперечисленных гидромеханических связей является необходимой предпосылкой в создании высокоэффективных гидроударных механизмов с удовлетворительными вибрационными показателями.

На основании проведенных теоретических исследований была разработана конструкция адаптирующегося самобалансного гидропневмоагрегата для разрушения грунтов и покрытий различной прочности.

Предлагаемое решение относится к гидромолотам, предназначенным для разработки мерзлых грунтов и скальных пород, а также для ремонтных работ в дорожном строительстве.

Известно ударное устройство, включающее цилиндрический корпус с соосными рабочими полостями, соединенными с источником рабочей среды, размещенный в корпусе инструмент, взаимодействующие с ним два ударника, установленные в соответствующих рабочих полостях корпуса коаксиально друг к другу, дополнительную замкнутую полость, заполненную рабочей жидкостью и золотниковый распределитель (Авторское свид. СССР № 905048, кл. В 25 D 9 /00, Е 21 С 3/00, 15.02.1982 г.).

Недостатком данного устройства является невозможность рационального использования энергии удара, в зависимости от прочности разрушаемого материала, так как в данном устройстве энергия сообщается инструменту принудительно при каждом рабочем ходе ударников.

Наиболее близким к предлагаемому относится ударное устройство, включающее цилиндрический корпус, внутри которого коаксиально размещены внутренний и охватывающий бойки, нерабочие торцы которых расположены в камере постоянного объема, заполненной рабочей жидкостью, рабочие камеры, образованные наружной поверхностью внутреннего бойка и внутренней поверхностью охватывающего бойка, рабочий инструмент и управляющий золотник. (Авторское свид. СССР № 922274, кл. Е 21 С3/20, 19.03. 1979 г.).

Недостатком этого устройства так же является невозможность регулирования энергии удара при разрушении материала различной прочности.

Технической задачей является осуществление регулирования энергии удара в зависимости от прочности разрушаемого материала.

Поставленная задача решается тем, что ударное устройство, содержащее цилиндрический корпус, внутри которого коаксиально размещены внутренний и охватывающий бойки, нерабочие торцы которых расположены в камере постоянного объема, заполненной рабочей жидкостью, рабочие камеры, образованные наружной поверхностью внутреннего бойка и внутренней поверхностью охватывающего бойка, управляющий золотник и рабочий инструмент, снабжёно аккумулятором энергии, сообщающимся с камерой постоянного объема посредством двух редукционных клапанов, включённых параллельно и взаимно противоположно относительно их входа и выхода.

На Рис.1 показано ударное устройство, продольный разрез.

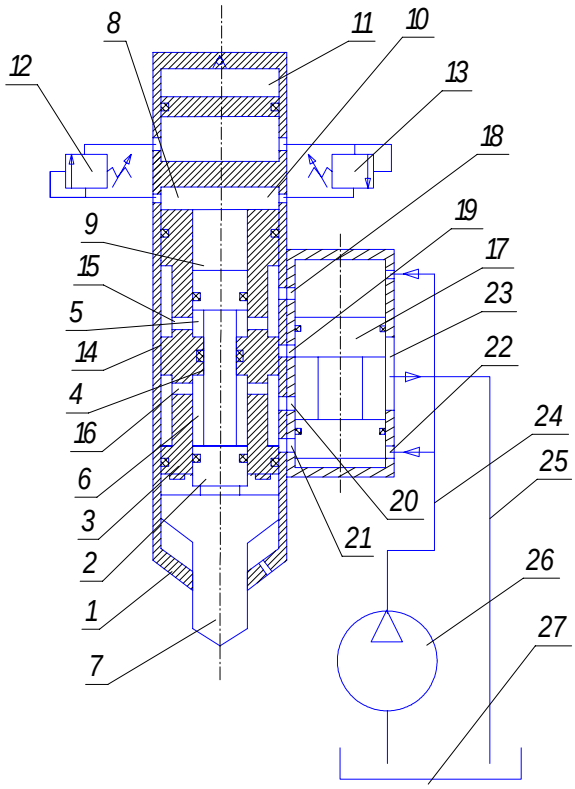


Рис. 1. Ударное устройство

Ударное устройство состоит из цилиндрического корпуса 1, в котором коаксиально установлены внутренний и охватывающий бойки 2, 3, входящие один в другой. Их общая поверхность 4 трения образует рабочие камеры 5 и 6, которые расположены между рабочим инструментом 7 и камерой 8 постоянного объема, заполненной рабочей жидкостью, выполняющей роль гидравлической обратной связи между нерабочим торцом 9 внутреннего бойка 2 и нерабочим торцом 10 охватывающего бойка 3. Камера 8 постоянного объема сообщена с аккумулятором 11 энергии посредством редукционных клапанов 12 и 13, соединенных параллельно и взаимно противоположно от-

носительно их входа и выхода. Наружная поверхность охватывающего бойка 3 имеет две проточки, разделенные пояском 14, относительно которого симметрично расположены отверстия 15 и 16. Управление ударным устройством осуществляется золотником 17, рабочие окна 18-21 которого связанны с соответствующими отверстиями, выполненными в корпусе 1, а управляющие окна 22 и 23 соединены напорной и сливной гидромагистралями 24,25 соответственно с насосом 26 и баком 27.

Работает ударное устройство в двух режимах: при работе с материалом малой прочности без аккумулятора энергии, когда энергии удара хватает для пробоя разрабатываемого материала. При этом ударные бойки 2,3 совершают полные ходы за счет подводимого постоянного объема рабочей жидкости от насоса 26 в соответствующие рабочие камеры 5,6. В начале работы ударного устройства ударный инструмент упирается в грунт и взводит один из бойков, находящихся в данный момент в нижнем положении. При этом объем камеры 8 постоянного объема уменьшается пропорционально величине хода рабочего инструмента.

При работе с материалом различной прочности режим работы ударное устройство выбирает само. При отсутствии пробоя разрабатываемого материала в течение первого цикла работы ударные бойки 2,3 совершают не полные циклы и давление в камере 8 постоянного объема повышается. При превышении настройки редукционного клапана 12 происходит зарядка гидропневмоаккумулятора аккумулятора энергии 11, а при достижении давлением в аккумуляторе 11 давления настройки редукционного клапана 13 запасенная в аккумуляторе рабочая жидкость переливается обратно в камеру 8 постоянного объема, что приводит к увеличению скорости движения бойков 2,3 и возрастанию энергии удара.

В положении, показанном на Рис.1, рабочая камера 5 соединена через окно 18 с напорной гидромагистралью 24. При этом охватывающий боек 3 перемещается в крайнее нижнее положение и наносит удар, а внутренний боек 2 перемещается в верхнее положение. В момент движения бойка 2 вверх, его торец входит в камеру 8 постоянного объема. Это обуславливает движение бойка 3 вниз.

В предударный период, в результате быстрого перекрытия окна 20 пояском 14 в рабочей камере 6 возникает импульс давления, перебрасывающий золотник 17 в верхнее положение. При встречном движении бойков 2 и 3 происходит уравновешивание инерционных сил бойков, поэтому ударные нагрузки на корпус 1 не передаются. Во втором полуцикле, когда золотник 17 находится в верхнем положении, жидкость через окна 19,20 и окно 23 идет на слив. При движении бойка 2 вниз, а бойка 3 вверх поясок 14 перекрывает окно 19. В предударный момент в рабочей камере 5 возникает импульс давления, который перебрасывает золотник 17 в нижнее положение. Боек 2 наносит удар по инструменту 7. Цикл повторяется.

Наличие редукционных клапанов и аккумулятора энергии позволяет рационально использовать энергию за счет уменьшения числа циклов зарядки гидропневмоаккумулятора по потребности, т.е. адаптивно.

Таким образом, ударное устройство работает в двух режимах. Первый режим – работа без включения аккумулятора, когда давление в камере постоянного объема не превышает давления настройки редукционного клапана 12. В этом случае частота ударов увеличена, т.к. не требуется дополнительной энергии на зарядку гидропневмоаккумулятора и энергия удара небольшая.

Второй режим – работа с аккумулятором, когда давление в камере постоянного объема превышает давление настройки редукционного клапана 13, при этом дополнительный расход жидкости из аккумулятора поступает в камеру постоянного объема, тем самым, увеличивая скорость бойка и, соответственно, энергию удара. При этом вследствие постоянства используемой мощности силовой установки несколько снижается частота ударов и гидропневмомолот переходит на оптимальный по критерию прочности разрабатываемого грунта режим работы.

Предлагаемая конструкция, позволяет проектировать самобалансные самонастраиваемые инструменты для ударного разрушения прочных материалов с неоднородными свойствами, какими являются, например, мерзлые грунты неоднородные грунты с каменистыми включениями.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Суднишников, Б.В., Петров А.М., Тупицин К.К. Об улучшении вибрационно-силовых характеристик машин ударного действия. Физтехн. пробл. разраб. полезн. ископ.,1969,№ 4, с.63-66.
2. Суднишников Б.В. К теории отдачи машин ударного действия.- Машины ударного действия.-.Новосибирск: ГГИ ЗСФ АН, 1953, с.-85-97.
3. Есин, Н.Н. Методика исследования и доводки пневматических молотков.-Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1965.- 76с.

4. Суднишников, Б.В.,Есин Н.Н. Новый принцип повышения частоты ударов пневматических молотков. Изв.СО АН СССР,1958, № 7, с.125 - 127.
5. Суднишников, Б.В. Некоторые зависимости, вытекающие из особенностей индикаторных диаграмм пневматических молотков. В кн: Машины ударного действия. Новосибирск ГГИ ЗСФАН,1953.с.98-102.
6. Суднишников, Б.В., Есин Н.Н. Экспериментальное исследование рабочего процесса пневматических молотков. В кн: Машины ударного действия.-Новосибирск: ГГИ ЗСФ АН, 1953, с.-145-160.
7. Есин Н.Н., Семенов Л.И. Новые пневматические молотки. В кн: Ударно-вращательное бурение.-Новосибирск: ГГИ ЗСФ АН, 1956, с.-35-40.
8. Тупицин К.К. Об улучшении вибрационно-силовых характеристик. В кн: Виброзащита человека-оператора и колебания в машинах. М., Наука, 1977, с.-160-167.
9. Суднишников Б.В. Влияние параметров прямого хода на мощность и отдачу пневматического молотка. В кн: Ударно-вращательное бурение.-Новосибирск, 1965.
10. Клушин Н.А. Зависимость между вибрационно-силовыми характеристиками и параметрами пневматического молотка.- Ручные пневматические машины ударного действия с пониженной вибрацией.-Новосибирск, ИГД СО АН СССР,1974.с.36-53.
11. Гаун В.А., Семенов Л.И. и др. Об улучшении рабочего цикла погружных пневмоударников.- Сб. науч. тр.: Машины для бурения шпуров и скважин. Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1971.
12. Быховский И.И., Гольдштейн Б.Г. Основы конструирования вибробезопасных ручных машин. М.:Машиностроение,1982,224с.
13. Николаев И.Б., Гольдштейн Б.Г. и др. Ручные вибробезопасные машины ударного действия. Обзор.М: ЦНИИТЭстроймаш,1981,40с.
14. Суднишников Б.В., Петреев А.М., Тупицин К.К. Об улучшении вибрационно-силовых характеристик машин ударного действия. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых,1969,№ 4, с. 63-66.
16. Гаун В.А. К методике обработки диаграмм рабочего процесса пневматического ударника.- Машины для бурения шпуров и скважин. Новосибирск: Наука,1971, с.47-51.
17. Крейнин Г.В., Пронина М.П. Комбинированное использование методов оптимизации при выборе параметров пневмоударной системы/ Машиноведение,1975. № 2, с.30-37.
18. Алабужев П.М. Применение теории подобия и размерностей к исследованию (моделированию) машин ударного действия.- Изв.Томского политехн.ин-та, 1952,т.73, с.107-152.
19. Алабужев П.М., Алимов О.Д. Определение энергии бойка в машинах ударного действия,- Изв.Томского политехн.ин-та,1954,Т 76, с.176-180.
20. Суднишников Б.В., -Есин Н.Н., Тулицин К.К. Исследования и конструирование пневматических машин ударного действия. Новосибирск: Наука,1985,134с.
21. Ситников Ю.Н., Шадрин А.В. и др. Исследование процесса динамического разрушения мерзлого грунта /Строительные и дорожные машины,1985, № 12.
22. Ситников Ю.Н., Шадрин А.В. и др. Исследование рабочих процессов гидроударных механизмов/ Строительные и дорожные машины, 1986, № 4.
23. Суднишников Б.В., Есин Н.Н., Клушин Н.А. Идеальная вибробезопасная машина ударного действия.- ТПРЖ,1966,№ 3, с.76-78.
24. Липин А.А. Принципиальные схемы двухпоршневых пневмоударных механизмов. В сб: Пневматические буровые машины. Новосибирск, 1984, с.20-28.
25. Абраменков Э.А. Об установлении структуры ударной мощности пневматического ударного механизма.- Сб. тр.: Пневматические буровые машины. Новосибирск: 1984, с.79-85.
26. Белоусов А.В. Регулирование параметров пневмоударных механизмов. - В сб.: Пневматические буровые машины. Новосибирск, ИГД СО АН СССР, 1984, с.41-49.

Бардушко В.Д.

УДК 621.331

ЗАКОН РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КОМПЕНСИРУЮЩЕЙ УСТАНОВКИ НА ПОСТУ СЕКЦИОНИРОВАНИЯ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

На ряде участках электрической железной дороги график движения поездов (ГДП) характеризуется наличием в нем поездов с массами, значения которых достаточно плотно группируются вокруг средней массы всего числа поездов за исключением сдвоенных или тяжелых поездов. Эти поезда составляют общий «энергетический фон», на который накладываются концентрированные мощные нагрузки тяжелых. Представляет интерес анализ этой поездной ситуации с точки зрения повышения эффективности системы тягового электроснабжения (СТЭ). Электрическая нагрузка от поездов в силу достаточно низких энергетических характеристик электровозов переменного тока имеет весьма высокую реактивную составляющую $Q_{\Sigma П}$, приводящую к дополнительным потерям электроэнергии и напряжения. Компенсация реактивной составляющей нагрузки, таким образом, позволит повысить энергетическую эффективность СТЭ, увеличить уровень напряжения на токоприемниках электроподвижного состава (ЭПС).

Решение этой задачи наиболее целесообразно с привлечением компенсирующего устройства на посту секционирования, размещаемого, как правило, примерно в середине межподстанционной зоны $\ell_c = \frac{\ell}{2}$. Показано [1,2], что нерегулируема установка параллельной компенсации (КУ), в этом случае, должна иметь полезную мощность $Q_К$, равную половине суммарной реактивной мощности от всех поездов $Q_{\Sigma П}$.

Естественно, что, принимая в качестве средней наиболее вероятную полезную мощность $Q_К = \frac{Q_{\Sigma П}}{2}$, в отдельные моменты времени будут иметь место перекомпенсация или недокомпенсация реактивной мощности по отношению к оптимальному значению.

Дополнительный эффект от снижения потерь мощности и увеличения уровня напряжения в тяговой сети может быть достигнут, если компенсирующее устройство сделать регулируемым.

При формировании закона регулирования могут быть использованы различные концепции, которые и определят степень его эффективности.

Одной из возможностей формирования закона регулирования может служить концепция, при которой мощность регулируемой компенсирующей установки принимается равной сумме двух слагаемых. Первое слагаемое реактивной мощности является постоянной составляющей и принимается половине средней реактивной мощности от всех поездов, кроме тяжелого поезда. Это можно проиллюстрировать графически, принимая допущение о том, что вся нагрузка «фонового» режима сосредоточена в середине межподстанционной зоны (МПЗ), то есть в точке с координатой $\ell_c = \frac{\ell}{2}$. В этом случае, в соответствии с вышеизложенным токи, растекающиеся от КУ, полностью компенсируют реактивные составляющие токов от всех ЭПС «фонового» режима. В действительности полной компенсации не произойдет, поскольку все поезда, кроме тяжелого, то есть токи всех ЭПС «фонового» режима будут распределены вдоль МПЗ.

Вторая составляющая должна регулироваться в зависимости от места и мощности реактивного электропотребления тяжелым поездом. Причем, закон регулирования должен быть сформирован так, чтобы исключить или уменьшить режимы перекомпенсации или недокомпенсации.

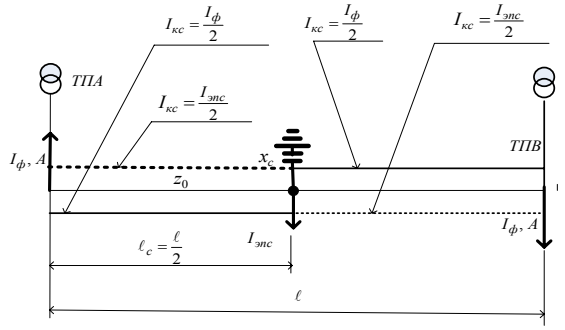


Рис. 1. К вопросу о компенсации реактивной составляющей тока суммарной нагрузки ЭПС

$I_{эпс}$ -ток поездов «фонового» режима

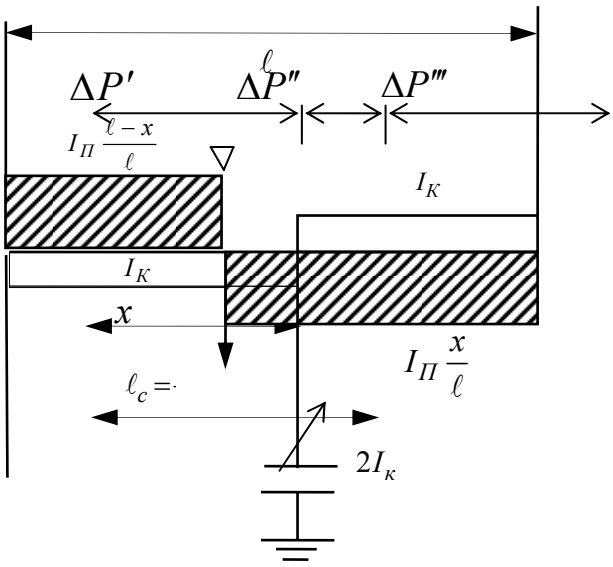


Рис. 2. Эпюра токов в тяговой сети анализируемой межподстанционной для случая $x \le \ell_c$

Рассмотрим порядок формирования закона регулирования для описанной поездной ситуации, характеризующейся наличием одного тяжелого поезда в межподстанционной зоне на фоне ряда поездов заметно меньшей массы.

Это оправдано для многих случаев, поскольку нагрузочная способность систем тягового электроснабжения имеет ограничения и пропуск тяжелых поездов наряду с уже имеющимися на межподстанционной зоне, ограничивается одним поездом.

При наличии в ГДП нескольких тяжелых поездов также может быть сформирован закон регулирования мощности компенсирующего устройства, который будет иметь, в этом случае, более сложный вид. Рассмотрим схему, представленную на рис. 2. Проанализируем потери мощности в тяговой сети от реактивных токов.

При этом отметим, что выражения для них будут отличаться в зависимости от координаты размещения компенсирующего устройства по отношению к координате точки токораздела ∇ (координате поезда) x.

Потери мощности в тяговой сети в расчете на один Ом для случая $x \le \ell_c$.

$$\Delta P = \Delta P' + \Delta P'' + \Delta P''' = \left(I_П \frac{\ell - x}{\ell} - I_k \right)^2 x +$$

$$+ \left(I_П \frac{x}{\ell} + I_k \right)^2 (\ell_c - x) + \left(I_П \frac{x}{\ell} - I_k \right)^2 (\ell - \ell_c).$$

Тогда минимум потерь определится условием

$$\frac{d\Delta P}{dI_k} = -2\left(I_П \frac{\ell - x}{\ell} - I_k \right) x + 2(\ell_c - x) \times$$

$$\times \left(I_П \frac{x}{\ell} + I_k \right) - 2(\ell - \ell_c)\left(I_П \frac{x}{\ell} - I_k \right) = 0.$$

Выполнив простые преобразования, получим

$$2x \cdot I_k + 2(\ell_c - x) I_k + 2(\ell - \ell_c) I_k =$$

$$= 2x \frac{\ell - x}{\ell} I_P - 2(\ell_c - x) \frac{x}{\ell} I_P + 2(\ell - \ell_c) \frac{x}{\ell} I_P$$

$$I_k = \frac{x \cdot I_П \left[\frac{\ell - x}{\ell} - \frac{(\ell_c - x)}{\ell} + \frac{\ell - \ell_c}{\ell} \right]}{x + \ell_c - x + \ell - \ell_c}. \quad (1)$$

Или

$$I_k = I_P \frac{2\ell - 2\ell_c}{\ell \cdot \ell} \cdot x = \frac{2I_P (\ell - \ell_c)}{\ell^2} \cdot x \quad (2)$$

Для случая $x > \ell_c$, отраженного на рис. 3. можно записать

$$\Delta P = \Delta P' + \Delta P''' + \Delta P''' = \left(I_П \frac{\ell - x}{\ell} - I_k \right.$$

$$+ \left(I_П \frac{\ell - x}{\ell} + I_k \right)^2 (x - \ell_c) +$$

$$+ \left(I_П \frac{x}{\ell} - I_k \right)^2 (\ell - x). \quad (3)$$

Минимум потерь электроэнергии определится из условия

$$\frac{d\Delta P}{dI_k} = -2\ell_c\left(I_П\frac{\ell-x}{\ell}-I_k\right)+2(x-\ell_c)\times$$

$$\times\left(I_П\frac{\ell-x}{\ell}+I_k\right)-2(\ell-x)\left(I_П\frac{x}{\ell}-I_k\right)=0$$

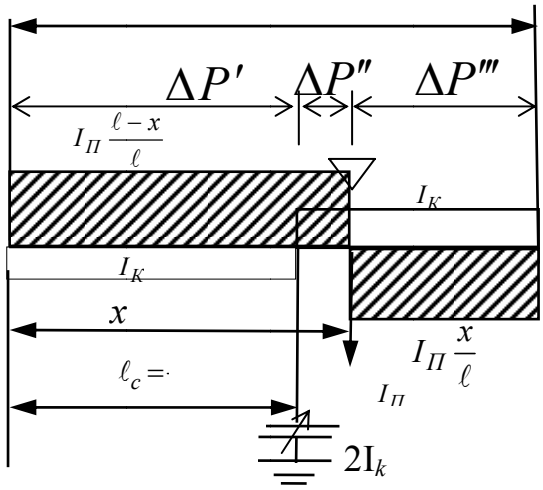


Рис. 3. Эпюра токов в тяговой сети анализируемой межподстанционной для случая $x > \ell_c$

Или, решив последнее уравнение отнолсительно I_k, получим

$$I_k = \frac{2I_P\ell_c(\ell-x)}{\ell^2} \qquad (4)$$

1. Закон регулирования КУ. Таким образом, для общего случая закон регулирования выражается уравнениями

$$\begin{aligned} 2I_k &= \frac{4I_П(\ell-\ell_c)}{\ell^2}\cdot x - \ \textit{для}\quad x\le \\ 2I_k &= \frac{4I_П\ell_c(\ell-x)}{\ell^2} \ - \ \textit{для}\quad x> \end{aligned} \qquad (5)$$

Учитывая, что для частного случая, который здесь рассмотрен, $\ell_c = \frac{\ell}{2}$ и ток всей КУ равен удвоенному значению составляющих, растекающихся от КУ влево и вправо, получим следующий закон регулирования компенсирующей установки

$$\begin{cases} 2I_k = \frac{2I_П}{\ell}\cdot x & \textit{при}\quad x\le\ell_c; \\ 2I_k = \frac{2I_П(\ell-x)}{\ell}\cdot x & \textit{при}\quad x>\ell_c. \end{cases} \qquad (6)$$

Следует помнить о том, что I_P является функцией пути x.

2. Потери мощности на произвольной координате для случая регулируемой КУ. Для сравнительной оценки потерь электроэнергии с КУ подставим полученные результаты (2) и (4) в (1) и (3), для частного случая $\ell_c = \frac{\ell}{2}$ на участке $x \le \frac{\ell}{2}$.

$$\Delta P = \left(I_П\frac{\ell-x}{\ell}-\frac{I_П}{\ell}\cdot x\right)^2 x + \left(I_П\frac{x}{\ell}+\frac{I_П}{\ell}\cdot x\right)^2 \times$$

$$\times\left(\frac{\ell}{2}-x\right)+\left(I_П\frac{x}{\ell}-\frac{I_П}{\ell}\cdot x\right)^2\left(\ell-\frac{\ell}{2}\right).$$

Или, после преобразования

$$\Delta P = I_П^2\left(x-\frac{2x^2}{\ell}\right). \qquad (7)$$

На участке $x > \frac{\ell}{2}$

$$\Delta P = \frac{I_П^2}{\ell}\left(3x-\frac{2x^2}{\ell}-\ell\right). \qquad (8)$$

2.1. Средние потери мощности для случая регулируемой КУ. Оценка энергетической эффективности может быть выполнена, если оперировать потерями мощности средними за время хода поезда по рассматриваемому участку для сравниваемых вариантов. Определим средние потери мощности для этого случая, усредняя по пути.

На участке $x \le \frac{\ell}{2}$.

$$\overline{\Delta P} = \frac{2}{\ell}I_П^2\int_0^{\frac{\ell}{2}}\left(x-\frac{2x^2}{\ell}\right)dx = \frac{I_П^2\ell}{12}$$

Выражение, определяющее средние потери мощности для случая регулируемой КУ и для $x > \frac{\ell}{2}$, получается идентичным.

То есть в целом по всему участку для случая регулируемой КУ имеем

$$\overline{\Delta P} = \frac{\left(\frac{I_П^2\ell}{12}+\frac{I_П^2\ell}{12}\right)}{2}$$

Или

$$\overline{\Delta P} = \frac{I_П^2 \ell}{12} \qquad (9)$$

3. Потери мощности на произвольной координате для случая нерегулируемой КУ. Оптимальным параметром нерегулируемой КУ, как уже упоминалась, является значение емкостного тока (емкостной мощности), равное половине индуктивного тока (индуктивной мощности) электроподвижного состава. Поэтому выражения для потерь мощности на произвольной координате рассматриваемого участка для нерегулируемой КУ определяются на основе уравнений (1) и (3) при $I_k = \frac{I_П}{4}$. В этом выражении учтено то обстоятельство, что ток КУ при его размещении в середине участка распределяется пополам между тяговыми подстанциями

Тогда потери мощности в тяговой сети в расчете на один Ом для случая $x \le \ell_c$.

$$\Delta P = \left(I_П \frac{\ell - x}{\ell} - \frac{I_П}{4} \right)^2 x + \left(I_П \frac{x}{\ell} + \frac{I_П}{4} \right.$$

$$\times \left(\frac{\ell}{2} - x \right) + \left(I_П \frac{x}{\ell} - \frac{I_П}{4} \right)^2 \left(\ell - \frac{\ell}{2} \right).$$

Или

$$\Delta P = \mathrm{I}_П^2 \left(\frac{x}{2} - \frac{x^2}{\ell} + \frac{\ell}{16} \right). \qquad (10)$$

На участке $x > \ell_c$.

$$\Delta P = \left(I_П \frac{\ell - x}{\ell} - \frac{I_П}{4} \right)^2 \frac{\ell}{2} + \left(I_П \frac{x}{\ell} + \frac{I_П}{4} \right)^2 \times$$

$$\times \left(x - \frac{\ell}{2} \right) + \left(I_П \frac{x}{\ell} - \frac{I_П}{4} \right)^2 (\ell - x).$$

Или

$$\Delta P = I_П^2 \left(\frac{3}{2} x - \frac{x^2}{\ell} + \frac{7}{16} \ell \right) \qquad (11)$$

3.1. Средние потери мощности для случая нерегулируемой КУ. Выполняя усреднение, используя те же принципы, которые были приняты и для предыдущего случая, получим результат, показывающий, что выражения для средних потерь для рассматриваемых условий в границах $x \le \frac{\ell}{2}$ и $x > \ell_c$ одинаковы.

То есть для всего участка $0 < x \le \ell_c$.

$$\overline{\Delta P} = \left[\frac{\frac{2}{\ell} I_П^2 \int_0^{\frac{\ell}{2}} \left(\frac{x}{2} - \frac{x^2}{\ell} + \frac{\ell}{16} \right) dx + }{2} \right.$$

$$\left. \frac{+ \frac{2}{\ell} I_П^2 \int_{\frac{\ell}{2}}^{\ell} \left(\frac{3}{2} x - \frac{x^2}{\ell} - \frac{7}{16} \ell \right) dx}{2} \right].$$

Или

$$\overline{\Delta P} = \frac{5}{48} I_П^2 \ell. \qquad (12)$$

4. Потери мощности на произвольной координате для случая отсутствия КУ. Аналогичные выражения для случая отсутствия КУ могут быть получены с привлечением условия ($(I_k = 0)$) на основании формул (1) и (3)

$$\Delta P = \frac{I_П^2}{\ell} x(\ell - x) \qquad \text{для} \qquad x \le \frac{\ell}{2}.$$

Точно такое же выражение получается и для $x > \frac{l}{2}$.

4.1. Средние потери мощности для случая отсутствия КУ. Используя полученное выражения для всего участка $(0 < x \le \ell_c)$, можно записать уравнение для средних потерь мощности

$$\overline{\Delta P} = \frac{I_П^2}{6} \ell. \qquad (13)$$

Привлекая выражения (9), (12) и (13) выполним сравнительную оценку эффективности СТЭ для всех рассмотренных режимов работы для частного случая, характеризующегося тем, что КУ подключено в середине МПЗ и что ток поезда не меняется по координате.

$$\begin{cases} \overline{\Delta P} = \frac{I_П^2}{6} \ell - \text{КУ отсутствует;} \\ \overline{\Delta P} = \frac{5\ell}{48} - \text{нерегулируемая КУ;} \\ \overline{\Delta P} = \frac{I_П^2}{12} \ell - \text{имеется КУ, мощность которой} \\ \text{регулируется по предложенному закону.} \end{cases} \qquad (14)$$

Принимая в качестве базисных потерь потери электроэнергии в тяговой сети от реактивных

токов при отсутствии КУ, получим следующие сравнительные оценки

$$\begin{cases} \overline{\delta\Delta P^{*}_{нКУ}} = \dfrac{\dfrac{\ell}{6} I_{П}^{2}}{\dfrac{5I_{П}^{2}}{48}\ell} = 1.6 \text{ раза}; \\ \overline{\delta\Delta P^{*}_{рКУ}} = \dfrac{\dfrac{I_{П}^{2}}{6}\ell}{\dfrac{I_{П}^{2}}{12}\ell} = 2 \text{ раза}, \end{cases} \quad (15)$$

где $\overline{\delta\Delta P^{*}_{н\ КУ}}; \overline{\delta\Delta P^{*}_{рКУ}}$ сокращение относительных потерь для случая использования нерегулируемой КУ и сокращение относительных потерь для случая использования регулируемой КУ соответственно.

Реальные случаи могут быть рассчитаны с привлечением полученных здесь выражений и на основе конкретных данных о токе поезда как функции пути, места включения КУ и электрических характеристик тяговой сети. В качестве примера, ниже в табл. 2 приведены результаты расчеты сравнительной эффективности регулируемой КУ для одной из межподстанционных зон Восточно – Сибирской железной дороги – Подкаменная – Глубокая – Андриановская. Подстанции расположены в Подкаменной и Андриановской, пост секционирования с КУ – в Глубокой. На рис. 4 приведена схема, параметры МПЗ и графическое представление результатов тягового расчета для тяжелого (расчетного) поезда.

В расчетах принималось, что схема соединения подвесок путей – параллельная. Тогда «фоновый» режим определяет нагрузка всех поездов прямого и обратного направлений кроме расчетного поезда, следующего в четном направлении (в обратном направлении тяжелых поездов нет). В табл. 1 приведены результаты тяговых расчетов для тяжелого поезда, которые использовались как исходные данные для оценки эффективности регулируемой КУ по сформированным выше законам.

В современных условиях при наличии совершенных систем передачи и обработки данных, закон регулирования параметров КУ может быть эффективно реализован в порядке, изложенном ниже. Информация об изменении тока тяжелого поезда участка может быть получена предварительно из тяговых расчетов как функция времени в границах контролируемого участка. Полученная из тяговых расчетов информация должна быть заложена в память вычислительной системы, обслуживающей КУ. Однако, более целесообразным представляется автоматическая регистрация координаты и реактивного тока, зашедшего и следующего по контролируемой зоне поезда, с передачей этой информации современными средствами связи на пост секционирования контактной сети, где по этим данным будет формироваться управляющее по предлагаемым законам воздействие на КУ. При этом, следует помнить о том, что чем меньше шаг дискретизации по времени (Δt), тем точнее будет исполняться закон регулирования. Однако, есть смысл выполнить анализ динамики токопотребления с целью получения оптимального значения Δt.

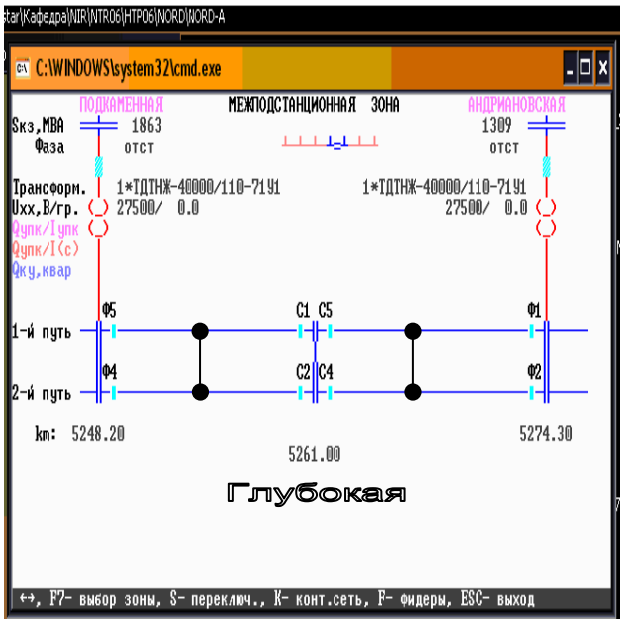


Рис. 4. Характеристика расчетного участка

Таблица 1

Результаты тяговых расчетов для поезда четного направления Подкаменная - Андриановская

Вес поезда - 6384 т

Координата поезда, км	Полный ток, А	Активный ток, А	Коэффициент мощности	Реактивный ток, А	Размещение подстанций и поста секционирования контактной сети
5247,1	125	107	0,86	64,62	
5248,01	130	111	0,85	67,67	Тяговая подстанция Подкаменная
5248,88	338	280	0,83	189,33	
5249,67	682	557	0,82	393,54	
5250,37	639	522	0,82	368,56	
5251,04	638	521	0,82	368,24	
5251,78	719	588	0,82	413,78	
5252,62	729	597	0,82	418,37	
5253,46	743	607	0,82	428,49	
5254,26	734	599	0,82	424,21	
5255,04	724	590	0,81	419,61	
5255,78	662	541	0,82	381,53	
5256,45	617	503	0,82	357,32	
5257,07	592	483	0,82	342,31	
5257,75	688	562	0,82	396,86	
5258,62	288	239	0,83	160,70	
5259,61	36	31	0,86	18,30	
5260,58	36	31	0,86	18,30	
5261,5	36	31	0,86	18,30	Пост секционирования контактной сети Глубокая
5262,37	552	454	0,82	313,99	
5263,28	584	484	0,83	326,80	
5264,26	552	459	0,83	306,63	
5265,27	536	446	0,83	297,29	
5266,3	212	178	0,84	115,15	
5267,34	36	31	0,86	18,30	
5268,36	36	31	0,86	18,30	
5269,3	431	354	0,82	245,86	
5270,16	737	602	0,82	425,16	
5270,97	705	576	0,82	406,51	
5271,85	384	320	0,83	212,26	
5272,85	36	31	0,86	18,30	
5273,9	36	31	0,86	18,30	
5274,99	36	31	0,86	18,30	Тяговая подстанция Андриановская

Примечание. Активное сопротивление 1 км тяговой сети двухпутного участка с параллельным соединением контактных подвесок путей составляет 0.13 Ом/км [3].

Таблица 2

Мгновенные потери мощности ΔP в тяговой сети, соответствующие координате следования расчетного поезда, кВт

1	2	3	4
Координаты подстанц	Без КУ	Нерегулируемая КУ	Регулируемая КУ
	$\Delta P_{\Sigma x}$	$\Delta P_{\Sigma x}$	$\Delta P_{\Sigma x}$
Подстанция Подкаменная	0,00	12,27	0,00
	3,47	13,40	3,36
	29,04	31,56	27,10
	36,93	35,51	33,11
	47,46	41,49	40,68
	72,23	58,88	58,86
	85,33	66,51	65,64
	100,41	75,53	72,29
	107,97	78,21	71,98
	113,90	79,40	69,33
	100,07	65,09	54,59
	92,17	55,76	43,89
	87,88	49,28	35,15
	121,57	69,94	38,39
	20,34	4,74	4,52
	0,27	9,14	0,03
Координата КУ (Глубокая)	0,27	8,91	0,00
	0,27	9,14	0,03
	77,64	35,47	17,25
	82,44	42,09	26,03
	70,52	37,22	28,21
	63,80	35,57	30,38
	9,12	7,13	4,97
	0,22	10,45	0,13
	0,20	10,66	0,13
	33,06	24,01	23,80
	88,12	68,80	67,79
	69,71	56,81	56,80
	15,77	17,53	13,52
	0,09	11,68	0,08
	0,06	11,88	0,06
Подстанция Андриановская	0,03	12,08	0,03

Таблица 3

Энергетическая эффективность регулируемой КУ по отношению к нерегулируемой.

Средние за время хода расчетного поезда по МПЗ потери мощности, кВт	1530	1146	883
Экономия потерь электроэнергии за год по сравнению со случаем отсутствия КУ кВт*ч/год	-	108572	181474
Энергетическая эффективность регулируемой КУ по отношению к нерегулируемой, кВт*ч/год	-	-	72902

Вывод. Современные средства управления на основе силовой электроники, технологий контроля электрических величин, передачи и обработки информации позволяют выйти на новый принципы управления устройствами электроснабжения, с привлечением законов регулирования, сформированных по заданным критериям оптимизации. Это позволит реали-зовать резервы СТЭ по энергоэффективности.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Бородулин Б.М., Герман Л.А., Николаев Г.А. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог переменного тока. М.: Транспорт, 1983. 184 с.
2. Бородулин Б.М., Герман Л.А. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог переменного тока. М.: Транспорт, 1976. 136 с.
3. Справочник по электроснабжению железных дорог. Т. 1/ Под ред. К.Г. Марквардта.- М.: Транспорт, 1980.- 256 с.

Алексеев В.А., Лукьянов А.В.

УДК 620.424.1

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ МАСЛОНАПОЛНЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ПОМОЩЬЮ АППАРАТА НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Система обслуживания по фактическому состоянию. На сегодняшний день применяемая в промышленности планово-предупредительная система обслуживания и ремонта (ППР) является основной и наиболее методически обеспеченной. Она используется на предприятиях, где важные машины, относящиеся к основному оборудованию, не имеют дублирования, и где непредусмотренные остановки производства могут привести к большим потерям. К таким предприятиям, в частности, относятся предприятия связанные с получением, преобразованием и распределением электроэнергии. Цель планово-предупредительной системы обслуживания и ремонта заключается в исключении отказов основного электрооборудования и непредвиденных расходов путём планирования проведения технического обслуживания ранее момента среднестатистического отказа с заданной вероятностью. Однако сложность конструкций современного основного электрооборудования характеризуется разнообразием входящих в них узлов по характеру и степени нагрузок и, как следствие, различными уровнями их надёжности. В реальных условиях эксплуатации не существует функциональной взаимосвязи между наработкой или сроком эксплуатации и техническим состоянием оборудования, если не присутствуют эрозийные формы износа и разрушения деталей оборудования, линейно связанные с наработкой. Поэтому оптимальных сроков выполнения технического обслуживания и ремонта для сложного оборудования в целом практически не существует.

Для групп однотипного оборудования многообразие и стохастический характер воздействия климатических условий, эксплуатационных факторов (режимов и продолжительности работы, ха-

рактеристик рабочей и окружающей среды, продолжительности эксплуатации, качества технического обслуживания и ремонта) приводят к тому, что при одной и той же продолжительности эксплуатации однотипное электрооборудование имеет различное фактическое техническое состояние. Поэтому, можно сделать вывод, что, если система ППР широко применяется для всего парка оборудования предприятия, весьма вероятно, что выполняется значительный объем обслуживания и ремонта бездефектного оборудования, что в свою очередь ведёт к повышению эксплуатационных затрат предприятия. К тому же, надёжность работы электрооборудования после запланированного технического обслуживания временно снижается вследствие потока послеремонтных отказов.

Теоретические исследования и опыт эксплуатации электрооборудования за рубежом показывают, что наиболее эффективной и перспективной является система технического обслуживания и ремонта по фактическому состоянию (ОФС) в сочетании с использованием в ограниченных пределах стратегий технического обслуживания и ремонта по наработке. Основным принципом стратегии обслуживания и ремонта по состоянию можно считать принцип соблюдения плановости выполнения части стандартных регламентных операций по наработке, работ по техническому диагностированию и контролю объектов. Регулировочные, демонтажно-монтажные, восстановительные работы на объектах выполняются только по результатам диагностирования и контроля. Эта стратегия получила название планово-диагностической системы ремонта (ПДР) [1].

Для внедрения новой стратегии при обслуживании и ремонте оборудования подстанций необходима единая, тщательно проработанная методологическая база, которой на данный момент не существует. Так, например, трансформаторное оборудование, как правило, контролируется хроматографией и физико-химическим анализом масла, и если в ходе испытаний проб масла выявляются какие-либо аномалии, техническое руководство служб изоляции и защиты от перенапряжений принимает решение о дополнительных электрических измерениях с целью уточнения места и характера дефекта. Однако в ряде случаев анализ масла не может выявить неисправность до тех пор, пока она не приведёт к значительным повреждениям, что, в свою очередь, может привести к внезапным отказам. Такой подход к диагностированию может дать, с некоторой погрешностью, ответ на вопрос: работоспособен трансформатор или нет, но не может показать, каким остаточным ресурсом он обладает. Не имея же информации об остаточном ресурсе, невозможно говорить о планировании технического обслуживания и ремонта. Исходя из этого, можно сказать, что для перехода к ремонту по фактическому состоянию задачей первостепенной важности является разработка теоретической базы для проведения комплексной оценки технического состояния всей номенклатура электрооборудования.

В данной статье рассматривается возможность использования алгоритмов нечёткого логического вывода для комплексной оценки технического состояния силовых маслонаполненных трансформаторов. Аппарат нечёткой логики позволяет, используя разнородные данные, полученные в ходе различных измерений и испытаний, которые включают в себя хроматографический анализ растворённых в масле газов, физико-химический анализ масла, электрические методы контроля, вибрационный контроль, тепловизионный контроль, получить заключения о техническом состоянии отдельных элементов трансформатора (изоляции, магнитопровода, обмоток, внутренних контактных соединений, трансформаторного масла), правильно оперируя которыми можно установить состояние трансформатора в целом.

Типы диагнозов и параметры состояния силового трансформатора. Степень повреждённости силового трансформатора будем определять исходя из следующих классов технической надёжности:

D_1 – исправное состояние (возможна дальнейшая эксплуатация трансформатора без ограничений)

D_2 – неисправное состояние (дальнейшая эксплуатация трансформатора возможна только с ограничениями по времени или режиму работы)

D_3 – предельное состояние (требуется немедленный вывод трансформатора из эксплуатации)

Перечисленные классы $D_1 \div D_3$ будем считать типами диагнозов, которые подлежат распознаванию. При установлении диагноза для конкретного трансформатора будем принимать во внимание основные параметры состояния [2,3], таблица 1.

Данные параметры сгруппированы по видам измерений и испытаний и имеют следующую структуру:

- Хроматографический анализ растворённых в масле газов: параметры $x_1 \div x_{11}$;
- Физико-химический анализ масла: $x_{12} \div x_{17}$;
- Электрические методы контроля: $x_{18} \div x_{25}$;
- Вибрационный контроль: $x_{26} \div x_{27}$;
- Тепловизионный контроль: x_{28};

Таблица 1

Основные параметры состояния

x_i	Названия основных параметров состояния	x_i	Названия основных параметров состояния
x_1	C_2H_2/ C_2H_4	x_{15}	температура вспышки
x_2	CH_4/H_2	x_{16}	tgd масла при температуре 70^0C
x_3	C_2H_4/ C_2H_6	x_{17}	влагосодержание масла
x_4	CO_2/CO	x_{18}	коэффициент абсорбции
x_5	концентрация H_2	x_{19}	коэффициент поляризации
x_6	концентрация CH_4	x_{20}	тангенс угла диэлектрических потерь изоляции
x_7	концентрация C_2H_2	x_{21}	потери холостого хода
x_8	концентрация C_2H_4	x_{22}	сопротивление короткого замыкания
x_9	концентрация C_2H_6	x_{23}	сопротивление изоляции
x_{10}	концентрация CO	x_{24}	сопротивление обмоток постоянному току
x_{11}	концентрация CO_2	x_{25}	измерение ЧР
x_{12}	пробивное напряжение	x_{26}	коэффициент прессовки обмоток
x_{13}	кислотное число	x_{27}	коэффициент прессовки магнитопровода
x_{14}	водорастворимые кислоты и щелочи	x_{28}	показания тепловизора (оценивается экспертом)

Нечеткая база знаний. Параметры состояния $x_1 \div x_{28}$ будем рассматривать как лингвистические переменные. Для оценки значений лингвистических переменных $x_1 \div x_{28}$ используем единую шкалу качественных термов: Н – низкий, С – средний, В – высокий (для параметров $x_1 \div x_3$ – отношения концентрации пар газов), УД – удовлетворительно, НЕУД – неудовлетворительно (для параметров $x_4 \div x_{28}$). Каждый из этих термов представляет собой нечеткое множество, заданное с помощью соответствующей функции принадлежности. [4]

Введём классы входных переменных состояния трансформатора, также представляющие собой лингвистические переменные:

X_1 – состояние изоляции;

X_2 – состояние магнитопровода;

X_3 – состояние обмоток;

X_4 – состояние внутренних контактных соединений;

X_5 – состояние трансформаторного масла.

Для оценки классов входных переменных состояния $X_1 \div X_5$ будем использовать множество термов:

A_{11} – нормальное старение изоляции (D_1);

A_{12} – ускоренное старение изоляции (электрическое старение) (D_2);

A_{13} – ускоренное старение изоляции (тепловое старение) (D_2);

A_{14} – увлажнение изоляции (D_2);

A_{15} – загрязнение изоляции (D_2);

A_{21} – нормальное состояние магнитопровода (D_1);

A_{22} – перегревы в магнитопроводе (150-300^{0}C) (D_3);

A_{23} – перегревы в магнитопроводе (300-700^{0}C) (D_3);

A_{24} – перегревы в магнитопроводе (>700^{0}C) (D_3);

A_{25} – ослабление прессовки магнитопровода (D_2);

A_{31} – нормальное состояние обмоток (D_1);

A_{32} – витковые замыкания в обмотках (D_3);

A_{33} – деформация обмоток (D_3);

A_{34} – ослабление прессовки обмоток (D_2);

A_{41} – исправные контактные соединения (D_1);

A_{42} – нагрев контактных соединений (<150 ^{0}C) (D_2);

A_{43} – нагрев контактных соединений (150-300 ^{0}C) (D_3);

A_{44} – нагрев контактных соединений (300-700 ^{0}C) (D_3);

A_{45} – нагрев контактных соединений (>700 ^{0}C) (D_3);

A_{51} – нормальное старение масла (D_1);

A_{52} – загрязнение масла (D_1);

A_{53} – ускоренное старение масла (окисление) (D_2);

A_{54} – плохая циркуляция масла (D_2).

Нечёткие логические уравнения. Используя матрицы знаний, пример которых показан в таблице 2, и операции $\bullet$ (И – min) и $\vee$ (ИЛИ – max), запишем систему нечетких логических уравнений.

Таблица 2

Пример матрицы знаний

Параметры состояния																Классы входных переменных
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_{10}	x_{12}	x_{13}	x_{15}	x_{16}	x_{17}	x_{18}	x_{19}	x_{20}	x_{23}	x_{25}	X_1
Н	С	Н	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	A_{11}
С	С	С	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	
В	С	В	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	
Н	В	Н	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	
Н	В	С	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	
Н	В	В	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	
Н	Н	Н	УД	НЕУД	НЕУД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	НЕУД	УД	УД	НЕУД	A_{12}
В	Н	Н	НЕУД	НЕУД	НЕУД	НЕУД	УД	УД	НЕУД	УД	УД	НЕУД	УД	УД	НЕУД	
Н	С	С	НЕУД	УД	НЕУД	НЕУД	НЕУД	НЕУД	НЕУД	УД	УД	НЕУД	УД	УД	НЕУД	A_{13}
Н	Н	Н	УД	НЕУД	УД	УД	УД	УД	УД	НЕУД	НЕУД	УД	НЕУД	НЕУД	НЕУД	A_{14}
В	Н	Н	НЕУД	НЕУД	УД	НЕУД	УД	УД	НЕУД	НЕУД	НЕУД	УД	НЕУД	НЕУД	НЕУД	
Н	Н	Н	УД	НЕУД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	УД	НЕУД	НЕУД	НЕУД	A_{15}
В	Н	Н	НЕУД	НЕУД	УД	НЕУД	УД	УД	НЕУД	УД	УД	УД	НЕУД	НЕУД	НЕУД	

$$\mu^{A12}=\mu^{Н}(x_1)\bullet\mu^{Н}(x_2)\bullet\mu^{Н}(x_3)\bullet\mu^{УД}(x_4)\bullet\mu^{НЕУД}(x_5)\bullet\mu^{УД}(x_7)\bullet\mu^{НЕУД}(x_{10})\bullet\mu^{УД}(x_{12})\bullet\mu^{УД}(x_{13})\bullet\mu^{УД}(x_{15})\bullet\mu^{УД}(x_{16})\bullet\mu^{УД}(x_{17})\bullet\mu^{УД}(x_{18})\bullet\mu^{НЕУД}(x_{19})\bullet\mu^{УД}(x_{20})\bullet\mu^{УД}(x_{23})\bullet\mu^{НЕУД}(x_{25})\bullet\mu^{НЕУД}(x_{29})\vee\mu^{В}(x_1)\bullet\mu^{Н}(x_2)\bullet\mu^{Н}(x_3)\bullet\mu^{НЕУД}(x_4)\bullet\mu^{НЕУД}(x_5)\bullet\mu^{УД}(x_7)\bullet\mu^{НЕУД}(x_{10})\bullet\mu^{НЕУД}(x_{12})\bullet\mu^{УД}(x_{13})\bullet\mu^{УД}(x_{15})\bullet\mu^{НЕУД}(x_{16})\bullet\mu^{УД}(x_{17})\bullet\mu^{УД}(x_{18})\bullet\mu^{НЕУД}(x_{19})\bullet\mu^{УД}(x_{20})\bullet\mu^{УД}(x_{23})\bullet\mu^{НЕУД}(x_{25})$$

В табл. 2 даётся пример матрицы знаний состояния изоляции и нечёткого логического уравнения для случая ускоренного старения изоляции (электрического старения).

Функции принадлежности. Для нахождения функций принадлежности параметров состояния используем единую аналитическую модель.

Для этого приведем интервалы изменения каждой переменной к одному универсальному интервалу [0,1] с помощью следующих соотношений:

$$\mu^{j}(x_i)=\tilde{\mu}^{j}(u), \qquad (1)$$

$$u=\frac{x_i-\underline{x_i}}{\overline{x_i}-\underline{x_i}}, \qquad (2)$$

j = УД, НЕУД,

где $\left[\underline{x_i},\overline{x_i}\right]$ – интервал изменения переменной x_i.

Тогда аналитическая модель функций принадлежности будет иметь следующий вид

$$\tilde{\mu}^{j}(u)=\frac{1}{1+\left(\frac{u-b}{c}\right)^2}. \qquad (3)$$

Параметр c определяет значения функций принадлежности в точке неопределённости (точке на графике функции принадлежности, в которой значение функции принадлежности для разных термов одинаково). Чем больше c, тем выше на графике будет находиться точка неопределённости. Параметр b показывает, какая из двух функция вычисляется в данный момент (снижающаяся от единицы до нуля или возрастающая от нуля до единицы).

Например, определим функции принадлежности для x_{12} = 34 кВ.

Неудовлетворительно:

$$u:=\frac{34-30}{40-30} \qquad b:=0 \qquad c:=0.5$$

$$\mu(u):=\frac{1}{1+\left(\frac{u-b}{c}\right)^2} \qquad u=0.4 \qquad \mu(u)=0.61$$

Удовлетворительно:

$$u:=\frac{34-30}{40-30} \qquad b:=1 \qquad c:=0.5$$

$$\mu(u):=\frac{1}{1+\left(\frac{u-b}{c}\right)^2} \qquad u=0.4 \qquad \mu(u)=0.41$$

Т.е. x_5 принадлежит терму «неудовлетворительно» со степенью принадлежности, равной 0.61, а терму «удовлетворительно» – со степенью, равной 0.41.

На рисунке 1 приведёна графическая иллюстрация функции принадлежности.

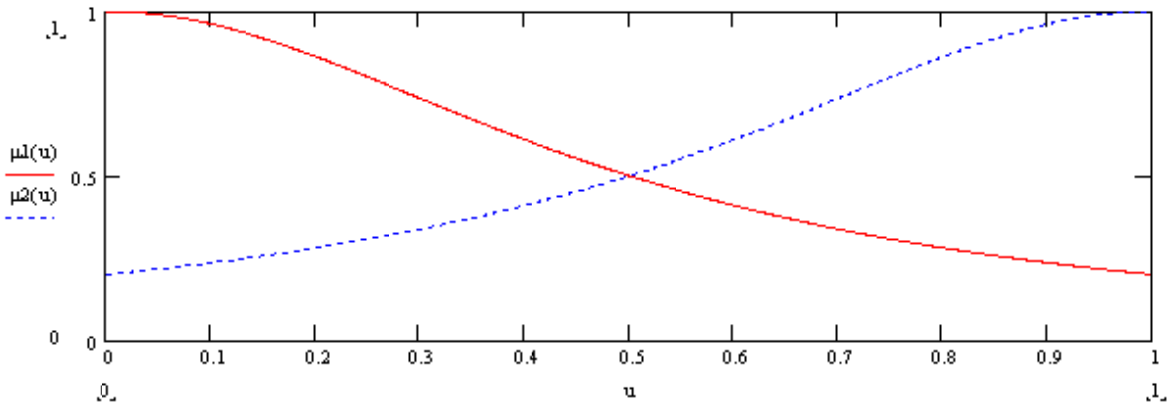


Рис. 1. График функции принадлежности μ(u)

Алгоритм принятия решения. Нечеткие логические уравнения вместе с функциями принадлежности нечетких термов позволяют принимать решение о степени повреждённости силового трансформатора по следующему алгоритму:

1. Зафиксируем значения параметров состояния силового трансформатора $X^* = \left(x_1^*, x_2^*, ..., x_{28}^*\right)$

2. Определим значения функций принадлежности $\mu^j\left(x_i^*\right)$ при фиксированных значениях параметров $x_i^*, i = 1...28$.

3. Используя логические уравнения, вычислим значения функций принадлежности $\mu^{Am,j}\left(x_1^*, x_2^*, ..., x_{28}^*\right)$ при векторе состояния $X^* = \left(x_1^*, x_2^*, ..., x_{28}^*\right)$. При этом, логические операции И ($\bullet$) и ИЛИ ($\vee$) над функциями принадлежности заменяются операциями определения min и max:

$$\mu(a) \bullet \mu(b) = \min\left[\mu(a), \mu(b)\right], \qquad (4)$$
$$\mu(a) \vee \mu(b) = \max\left[\mu(a), \mu(b)\right].$$

4. При степени принадлежности одного или более элементов множества термов $A_{11}…A_{m,j}$ превышающей 0.5, элемент или элементы с такой степенью принадлежности принимаются как установленные неисправности, которым соответствуют свои классы технической надёжности. При этом, если хотя бы один элемент трансформатора имеет степень повреждённости более высокую, чем остальные элементы, то трансформатору присваивается класс надёжности соответствующий классу надёжности наиболее повреждённого элемента [5].

Пример расчёта технического состояния силового маслонаполненного трансформатора напряжением 110 кВ.

Электроустановка: подстанция Октябрьская
Объект: Т-1.
Дата проведения измерений: 17. 02. 2009 г.
Климатические условия: $T_в$= -20˚С, $t_м$= + 36˚С.

1. Фиксируем значения параметров состояния силового трансформатора $X^* = \left(x_1^*, x_2^*, ..., x_{28}^*\right)$ и определяем значения функций принадлежности $\mu^j(x_i^*)$ при фиксированных значениях параметров $x_i^*, i = 1...28$. Заносим данные в таблицы 3 и 4.

Вычислим вычислим значения функций принадлежности для всех $\mu^{Am,j}\left(x_1^*, x_2^*, ..., x_{28}^*\right)$ при векторе состояния $X^* = \left(x_1^*, x_2^*, ..., x_{28}^*\right)$

μ^{A11} = 0,212, μ^{A12} = 0, μ^{A13} = 0,08, μ^{A14} = 0, μ^{A15} = 0, μ^{A21} = 0,08, μ^{A22} = 0, μ^{A23} = 0,08, μ^{A24} = 0,317, μ^{A25} = 0, μ^{A31} = 0,212, μ^{A32} = 0,08, μ^{A33} = 0, μ^{A34} = 0, μ^{A41} = 0,08, μ^{A42} = 0,08, μ^{A43} = 0, μ^{A44} = 0, μ^{A45} = 0,65, μ^{A51} = 0,379, μ^{A52} = 0,236, μ^{A53} = 0,236, μ^{A54} = 0,236.

Таблица 3

Значения функций принадлежности для параметров состояния $x_1 \div x_3$.

x_i*	Значения параметров состояния	Значения функций принадлежности		
		$\mu^H(x_i^*)$	$\mu^C(x_i^*)$	$\mu^B(x_i^*)$
x_1	0,009	1	0,378	0,071
x_2	2,332	0	0,14	1
x_3	5,398	0	0,08	1

Таблица 4

Значения функций принадлежности для параметров состояния $x_4 \div x_{28}$.

x_i*	Значения параметров состояния	Значения функций принадлежности	
		$\mu^{УД}(x_i*)$	$\mu^{НЕУД}(x_i*)$
x_4	8,511	0,985	0,221
x_5	0,0193	0,212	0,995
x_6	0,045	0,047	1
x_7	0,0012	0,41	0,61
x_8	0,122	0	1
x_9	0,0226	0,047	1
x_{10}	0,0356	0,664	0,376
x_{11}	0,303	0,797	0,309
x_{12}	39	0,962	0,236
x_{13}	0,29	0,384	0,65
x_{14}	0,006	0,949	0,58
x_{15}	118	0,379	0,659
x_{16}	6,7	0,69	0,361
x_{17}	0,00143	0,753	0,329
x_{18}	1,67	1	0,167
x_{19}	2,83	0,745	0,333
x_{20}	1,13	0,937	0,248
x_{21}	1,16	0,779	0,317
x_{22}	Испытания	проводились	-
x_{23}	0,81	0,874	0,276
x_{24}	3,7	0	1
x_{25}	Испытания	проводились	-
x_{26}	0,91	0,832	0,294
x_{27}	0,89	0,768	0,322
x_{28}	Удовлетворительно		

Элемент множества A_{45}, – нагрев контактных соединений (>700 ^{0}C), – единственный из множества термов $A_{11}…A_{m,j}$ имел степень принадлежности, превышающую 0.5, $\mu^{A45} = 0,65$. Трансформатору был присвоен 3 класс надёжности (немедленный вывод трансформатора из эксплуатации). Он был отправлен на внеплановый ремонт, в ходе которого было установлено, что вследствие длительного влияния токов, превышающих номинальное значение, произошло обгорание контактных соединений ПБВ (переключающего устройства для регулировки напряжения без возбуждения). Хроматография смогла выявить неисправность только тогда, когда она стала критической, и потребовался немедленный вывод трансформатора из эксплуатации. Если бы состояние трансформатора отслеживалось регулярно и полно, данный дефект удалось бы ликвидировать ещё на ранней стадии развития при запланированной остановке трансформатора.

Таким образом, можно сделать ряд выводов.

1. Техническое состояние силового трансформатора характеризуется большим количеством параметров состояния. При большом числе разнородных параметров, задача оценки технического состояния усложняется. Для её решения возможно использовать аппарат нечёткой логики, который позволяет оперировать разнородными данными. Также нечёткая логика позволяет уйти от высказываний типа “такой-то параметр принадлежит данному множеству”, поскольку необходимо будет указать, с какой степенью конкретный параметр удовлетворяет свойствам данного множества, а это значит, что параметр может принадлежать разным множествам с различной степенью принадлежности. Данное свойство позволяет сделать систему комплексного анализа более гибкой, в сравнении с системами, работающими на других математических аппарата. Также следует отметить, что с помощью обучающей выборки для точной настройки нечеткой модели, она может постоянно совершенствоваться.

2.Разработана простая, не требующая многоходовых расчётов методика для комплексной оценки технического состояния силовых трансформаторов, работа которой была показана на конкретном примере.

3. Переход от системы ППР к системе обслуживания по фактическому состоянию является одной из наиболее важных задач, решение которой необходимо для дальнейшего развития отечественной

энергетики. Разработка методики для комплексной оценки технического состояния всей номенклатуры электрооборудования является первой ступенью в переходе от системы ППР к системе обслуживания по фактическому состоянию.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Лукьянов А.В. Управление техническим состоянием роторных машин (система планово-диагностического ремонта). - Иркутск, Изд. ИрГТУ, 2000. – 230 с.
2. Объём и нормы испытаний электрооборудования. – 6-е изд. перераб. и доп. РД 34.45-51.300-97.М.: Изд. НЦ ЭНАС, 2001.
3. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов по результатам хроматографического анализа газов, растворённых в масле силовых трансформаторов. РД 34.46.302-89. М.: ВНИИЭ, 1989. – 28 с.
4. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применения к принятию приближенных решений. – М: Мир, 1976. – 165 с.
5. Ротштейн А.П. Медицинская диагностика на нечёткой логике. Винница: Континент.

Гоппе Г.Г.

УДК 681.51

ДИНАМИЧЕСКАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОТОКА ЖИДКОСТИ В КОМПЛЕКСЕ ТУРБОМЕХАНИЗМ – ТРУБОПРОВОДНАЯ МАГИСТРАЛЬ ПРИ ДВУХ СПОСОБАХ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ

Общие положения

Потоки жидкостей и газов, транспортируемых по трубопроводным магистралям, представляют большой интерес с точки зрения управления. Известно, что причиной движения потоков является действие сил тяжести или давления, создаваемого насосами, вентиляторами, компрессорами. Транспортируемые продукты в технологических производствах ограничены емкостями, аппаратами, трубопроводами.

Взаимосвязь между действующими силами и характером движения потоков продуктов определяется как свойствами последних, так и геометрической формой, размерами аппаратов и характеристиками установленной арматуры. Обычно причиной движения потоков продукта являются силы давления, а само движение – следствие давления. Однако само движение также может выступать в качестве причины, а давление как следствие. Этим подчёркивается то обстоятельство, что поток и давление неразрывно связаны между собой и регулировать их независимо друг от друга при неизменных параметрах коммуникаций и технологических аппаратов невозможно.

В то же время известно, что трубы, задвижки и другие устройства оказывают сопротивление движению продуктов. Движущиеся жидкость или газ обладают массой, поэтому силам, вызывающим движение, противодействуют силы трения и инерции. Благодаря этому при изменении управляющих воздействий, в качестве которых чаще всего используются такие, как изменение положения затвора регулирующей арматуры (метод дросселирования) или внешнего давления, достигаемого изменением частоты вращения механизма, изменение производительности потока наступает не мгновенно, а оказывается растянутым во времени.

Физика этих явлений достаточно известна. Например, если необходимо повысить производительность, то массе продукта, которая находится в трубопроводе, необходимо обеспечить дополнительную энергию (мощность). И поскольку мощ-

ность известных источников энергии ограничена по величине, то поток не может мгновенно изменять свою скорость. Эти инерционные свойства потоков среды в трубопроводах должны быть учтены в динамических математических моделях потоков транспортируемой среды.

В технологических процессах многих производств производительности (расходы) потоков, транспортируемых по трубопроводным магистралям сред или сами являются объектом управления, или с их помощью управляются некоторые другие переменные, такие как температура, уровень, концентрация, давление и др. Во всяком случае, и в первом и, особенно во втором случае, в соответствии с требованиями производственного процесса производительность потоков может изменяться в достаточно широком диапазоне. Поэтому показатели переходного процесса от одного значения производительности к другой должны соответствовать определённым требованиям по времени, точности обработки управляющего воздействия, величине перерегулирования и другим показателям. Для потоков жидкостей особенно важно обеспечить отсутствие гидроударов, вибраций. Отсюда следует, что для разработки эффективных систем управления потоками среды в трубопроводах необходимо иметь их математическое описание в динамике. В этих моделях должна отражаться взаимосвязь между внешним давлением, свойствами транспортируемой среды, параметрами трубопровода, регулирующей аппаратуры и величиной расхода во времени.

Для этого можно использовать уравнение Бернулли, учитывающего инерционную составляющую потока [1, 2]. Один из вариантов такой модели приведён в [3]. Однако здесь рассмотрен случай ламинарного течения, которое почти не встречается в практике технологических процессов. Другим недостатком этой модели является то, что она составлена в приращениях, предполагающих весьма малое отклонение расхода от некоторого установившегося режима, что опять же противоречит практике, где потоки изменяются в достаточно широком диапазоне.

Другой вариант математической модели для статического режима, учитывающей все особенности трубопровода и транспортируемой среды приведён в [4]. На основе этих моделей в [5] получена динамическая модель потока жидкости в трубопроводе для широкого диапазона его изменения. Данная математическая модель представлена нелинейным дифференциальным уравнением, относящимся к одному из разновидности уравнений Риккати. Для некоторых частных случаев входных управляющих воздействий оно имеет даже аналитические решения [6]. В общем же случае решение может быть получено только численными методами.

Цель настоящей работы состоит в том, чтобы с использованием данной математической модели получить математическую модель потока жидкости в трубопроводе, учитывающую особенности такого источника давления как турбомеханизм. Эти особенности состоят в том, что при управлении производительностью методом дросселирования, помимо изменения гидравлического сопротивления магистрали, одновременно изменяется входное давление трубопровода. Последнее объясняется напорной характеристикой турбомеханизма, зависящей от величины расхода. Вторая особенность объясняется возможностью изменения давления на выходе турбомеханизма при управлении его частотой вращения.

Таким образом, математическая модель динамики потока жидкости в трубопроводе должна учитывать изменения давления и расхода потока в турбомеханизме. Ниже динамическая математическая модель потока рассмотрена для двух способов управления производительностью.

Математическая модель потока жидкости при управлении производительностью методом дросселирования

Динамическая математическая модель непосредственно для потока жидкости в трубопроводе в [5] получена в виде:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{HS_{yc}g}{L\cdot\gamma} - \left[1 + \lambda\frac{L}{D_{yc}} + \sum\xi_c + \xi_{a'}(\bar{y})\right]\cdot\frac{Q^2}{2L\cdot S_{yc}}, \quad (1)$$

где Q – объёмная производительность;

H – давление на входе в трубопровод;

S_{yc} – площадь внутреннего сечения трубопровода;

L – длина трубопровода (напорной части);

λ – удельный коэффициент сопротивления о стенки трубопровода;

D_{yc} – внутренний диаметр трубопровода;

$\Sigma\xi_c$ – суммарный коэффициент сопротивления, вносимый поворотами и местными сужениями в трубопроводе;

$\xi_{a'}(\bar{y})$ – коэффициент сопротивления трубопроводной арматуры (задвижки, клапанов, кранов);

γ – удельный вес перекачиваемой среды;

g – ускорение силы тяжести;

$\bar{y}$ – относительное положение затвора регулирующего органа трубопроводной арматуры ($\bar{y}=1$ – полностью открыт, $\bar{y}=0$ – полностью закрыт).

С точки зрения регулирования производительности методом дросселирования наибольший интерес представляет величина $\xi_{a'}(\bar{y})$. Она изменяется от некоторой наименьшей величины при полностью открытой арматуре и до значения $\xi_{a'}(\bar{y})=\infty$ при полностью закрытой ($\bar{y}=0$). В промежуточных положениях затвора ($0\le\bar{y}\le 1$) величина коэффициента $\min\le\xi_a(\bar{y})\le\infty$. Отсюда следует, что, перемещая затвор регулирующей арматуры, можно управлять производительностью. Зависимость величины коэффициента сопротивления трубопроводной арматуры при её линейной "внутренней" расходной характеристике для воды получена в виде:

$$\xi_{a'}(\bar{y})=\frac{20gS_{yc}^2}{(Q_{yc}\bar{y})^2}, \qquad (2)$$

где Q_{yc} – условная пропускная способность полностью открытой арматуры при падении давления на ней 0,0981МПа.

Второй способ управления производительностью предполагает изменение величины входного давления в трубопровод (H). При этом трубопроводная арматура остаётся полностью открытой.

При управлении по любому из названных каналов для потока наблюдается переходный процесс. Как показано в [5, 7], уравнение (1) имеет аналитическое решение, если управляющее воздействие изменяется по ступенчатому закону во времени. При иных законах изменения управлений решение можно получить только численными методами. Правда представление управлений (давления или перестановки затвора регулирующей арматуры) в виде ступенчатых функций во времени – это тоже некоторая математическая идеализация. Но ведь известно, что с математическими моделями можно проводить самые немыслимые эксперименты. Однако в том случае, когда источником давления (напора) в системе является турбомеханизм, то при изменении производительности методом дросселирования изменяется и давление на входе турбомеханизма. Это следует из математической модели для напорной характеристики турбомеханизма, которая, как показано в [5, 8] может быть представлена в виде:

$$H=H_{0e}-k\cdot Q^2, \qquad (3)$$

где H_{0e} – давление на выходе турбомеханизма при нулевом расходе и работе на естественной напорной характеристике (при номинальной частоте вращения); k – коэффициент для данного турбомеханизма.

Из (3) видно, что, изменяя в (1) величину $\xi_{a'}(\bar{y})$ перестановкой регулирующего органа арматуры одновременно с изменением во времени расхода потока, в соотношении (3) во времени изменяется и давление на входе в трубопровод. Этим исключается возможность аналитического решения для (1), поскольку одно из управлений (по каналу давления) уже не может рассматриваться ступенчатым во времени. Поэтому совместное решение уравнений (1) и (3) может быть выполнено только численными методами. В качестве примера рассмотрим результаты такого решения для трубопровода со следующими параметрами: L=200м; D_y=0,1м; λ=0,02; $\Sigma\xi_c$=0. Регулирующий орган – задвижка: $\xi_{a'}(\bar{y}=1)=0{,}2$; Q_{yc}=885м^3/ч=0,24583м^3/с. Пусть по трубопроводу транспортируется вода (γ=9810Н/м^3). Примем, что номинальный напор турбомеханизма равен $H_н$=1МПа и при данном давлении трубопровод при полностью открытой задвижке обеспечивает производительность, соответствующую номинальной производительности турбомеханизма. Тогда номинальная производительность может быть найдена из уравнения статики для трубопроводной магистрали, которое имеет вид:

$$\frac{dQ}{dt}=\frac{20gS_{yc}^2}{(Q_{yc}\bar{y})^2}\cdot H=\left[1+\lambda\frac{L}{D_{yc}}+\sum\xi_c+\xi_{a}(\bar{y})\right]\cdot\frac{Q^2}{2L\cdot S_{yc}}. \qquad (4)$$

Соотношение (4) может быть получено из (1), если приравнять производную нулю. Из (4) подстановкой принятых значений параметров трубопровода и арматуры получаем, что $Q_н$=0,054472м^3/с=197м^3/ч. С учётом этого результата (3) преобразуется к виду:

$$H=1{,}5\cdot10^6-0{,}5\cdot10^6\frac{Q^2}{Q_н^2}=1{,}5\cdot10^6-166{,}977Q^2, \qquad (5)$$

а соотношение (1) для принятых параметров запишется как

$$\frac{dQ}{dt}=3{,}927\cdot10^{-8}H-\left[41-\frac{0{,}2}{\bar{y}^2}\right]0{,}3183Q^2. \qquad (6)$$

Структурная схема для численного решения уравнений (5) и (6) приведена на рисунке 1. На рисунках 2 и 3 приведены графики изменения производительности при управлении методом дросселирования.

Различие во времени для переходных процессов при одинаковых ступенях нарастания (снижении) производительности объясняется нелинейностью математического описания. Более полный анализ временных характеристик для потоков жидкостей в переходных режимах приведен в [5].

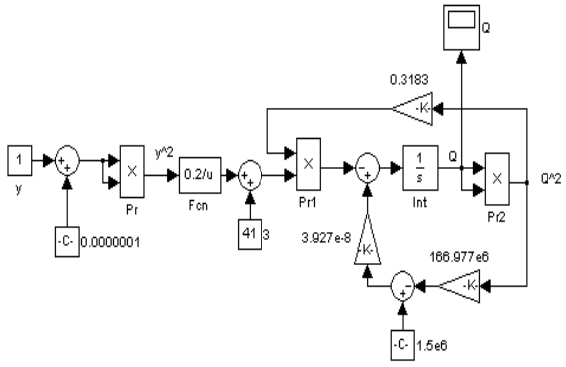


Рис. 1. Структурная схема решения уравнения динамики для потока жидкости при управлении производительностью методом дросселирования

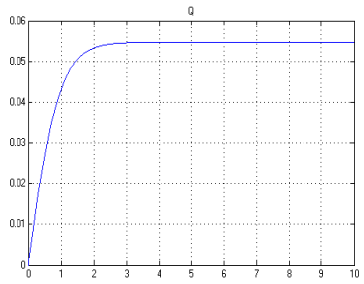


Рис. 2. График переходного процесса производительности потока при мгновенном открытии задвижки ($\bar{y} = 1$)

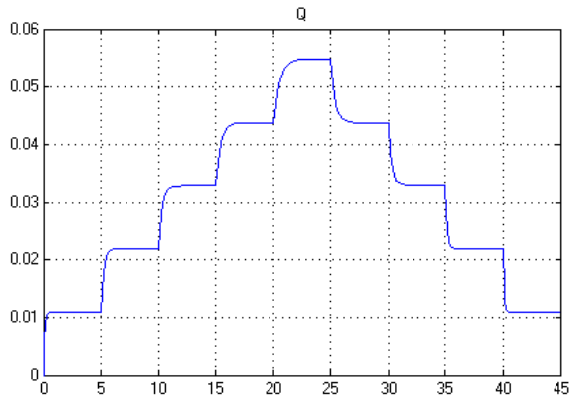


Рис. 3. График переходного процесса при ступенчатом открытии (закрытии) задвижки ($\bar{y}_1 = 0{,}0116$, $\bar{y}_2 = 0{,}0248$, $\bar{y}_3 = 0{,}0426$, $\bar{y}_4 = 0{,}0756$, $\bar{y}_5 = 1$, $\bar{y}_6 = 0{,}0756$, $\bar{y}_7 = 0{,}0426$, $\bar{y}_8 = 0{,}0248$, $\bar{y}_9 = 0{,}0116$)

Математическая модель потока жидкости при управлении частотой вращения турбомеханизма

При этом способе изменения производительности потока управляющим воздействием на входе в трубопровод является давление и поскольку оно создаётся турбомеханизмом регулированием частоты его вращения, то в качестве управления для всей системы будем рассматривать последнюю переменную. Если при методе дросселирования формировались искусственные напорные характеристики магистрали, то в данном случае искусственные напорные характеристики будут у механизма. Что касается напорной характеристики магистрали, то она является неизменной и предполагается естественной – при полностью открытой трубопроводной арматуре.

В работе [6] показано, что для принятой математической модели турбомеханизма в виде (3) переход на искусственные характеристики реализуется в виде следующих уравнений:

$$H = H_{0e}\left(\frac{\omega_i}{\omega_н}\right)^2 - k \cdot Q^2, \qquad (7)$$

где ω_i – скорость вращения турбомеханизма на искусственных напорных характеристиках; $\omega_н$ – номинальная скорость вращения турбомеханизма.

В (7) для частоты вращения можно перейти на относительные единицы. Тогда динамические математические модели для комплекса турбомеханизм-трубопроводная магистраль будут иметь вид:

$$H = H_{0e}\omega_*^2 - k \cdot Q^2;$$

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{HS_{yc}g}{L \cdot \gamma} - \left[1 + \lambda\frac{L}{D_{yc}} + \sum \xi_c + \xi_{a'}(\bar{y})\right] \cdot \frac{Q^2}{2L \cdot S_{yc}}.$$

Из двух приведённых уравнений можно получить:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{H_{0t}\omega^2 \cdot S_{yc}g}{L \cdot \gamma} - \left[\frac{kS_{yc}g}{L \cdot \gamma} + \frac{1 + \lambda\frac{L}{D_{yc}} + \sum \xi_c + \xi_{a'}(\bar{y})}{2L \cdot S_{yc}}\right] \cdot Q^2. \quad (8)$$

Подстановка в (8) параметров трубопровода и турбомеханизма, принятых выше, преобразует его к виду:

$$\frac{dQ}{dt} = 0{,}0589\omega_*^2 - 19{,}61Q^2 \cdot$$

Схема численного решения последнего уравнения приведена на рисунке 4. На рисунке 5 приведён график переходных процессов при сту-

пенчатом увеличении (уменьшении) частоты вращения механизма.

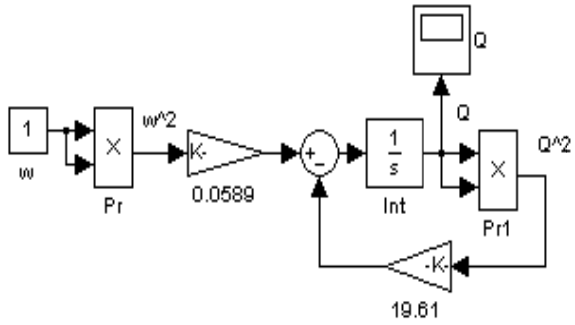


Рис. 4. Структурная схема решения уравнения динамики для потока жидкости при управлении производительностью изменением частоты вращения турбомеханизма

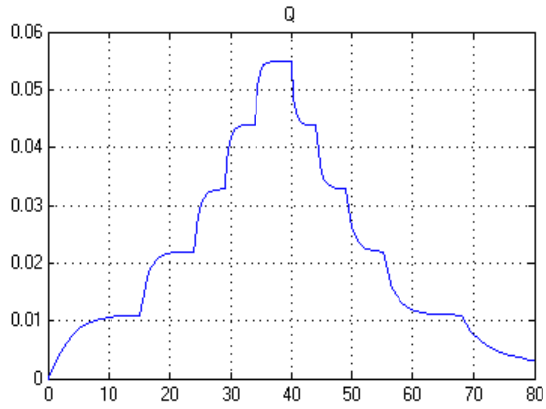


Рис. 5. График переходных процессов при ступенчатом изменении частоты вращения турбомеханизма ($\Delta\omega_*$=0,2)

Переходные процессы при управлении частотой вращения турбомеханизма по сравнению с методом дросселирования получаются более длительными, что уменьшает вероятность возникновения гидроударов.

Выводы:

1. Получены и исследованы численными методами уравнения динамики потоков жидкости для комплекса турбомеханизм-трубопроводная магистраль при изменении производительности потоков двумя способами: дросселированием и изменением частоты вращения механизма.

2. Переходные процессы при управлении частотой вращения турбомеханизмов более "благоприятны", чем при методе дросселирования, облегчают условия работы оборудования и уменьшают вероятность возникновения гидроударов.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика. – М.: Машиностроение, 1987. – 439с.
2. Шерстюк А.Н. Насосы, вентиляторы, компрессоры. – М.: Высшая школа, 1972. – 342с.
3. Кэмпбелл Д.П. Динамика процессов химической технологии. Перевод с английского. – М.: НИИТЭХИМ, 1962. – 280с.
4. Гуревич Д.Ф. Расчёт и конструирование трубопроводной арматуры. – Л.: Машиностроение, 1969. – 887с.
5. Гоппе Г.Г. Математическая модель расхода потоков жидкостей в трубопроводах как звено САР //Автоматизация химических производств. НИИТЭХИМ, 1973 г., №4, стр. 32-43.
6. Гоппе Г.Г. Математические модели систем регулирования жидкостей и газов в трубопроводах при использовании для управления ресурсов электропривода. /Отчёт по гранту Минобразования РФ. Гос. регистр. ВНТИЦ №02.200.108420.2001, 61с.
7. Матвеев Н.М. Методы интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений. – М.: Высшая школа, 1963. – 675с.
8. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.И. Энергосберегающий асинхронный электропривод. М.: ACADEMA, 2004. – 252с.

Мухопад Ю.Ф., Пашков Н.Н., Пунсык-Нажилов Д.Ц. УДК 681.3.01(031)

АДАПТИВНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С ДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРНОЙ ОРГАНИЗАЦИЕЙ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

В задачах управления некоторыми процессами (радионавигация, транспорт, плазмохимия, биотехнологии) способы реализации процессов обработки информации и выработки команд управления могут меняться в зависимости от значений входных переменных (сигналов).

Типичным примером является задача самонаведения – управление подвижным объектом (робот, морское судно, летательный аппарат) с определением угла разворота в зависимости от входных координат цели и собственных углов крена и тангажа [1]. В этой задаче, чем меньше угол разворота, тем большую ошибку можно допустить в его определении. При малых углах крена и тангажа можно существенно упростить алгоритм обработки информации без снижения точности вычислений.

Высокая точность вычислений необходима лишь для больших значений соответствующих параметров (сигналов). Но для каждого из режимов определяющим является быстродействие получения результата и скорость исполнения команд управления. Быстродействие решения опосредовано определяет и фактор повышения точности за счет возможности большого числа накоплений в скользящем окне дискретного фильтра [2].

Ясно, что в системах подобного типа полезный сигнал по каждому из входных каналов есть аддитивная смесь полезного сигнала, низкочастотных и высокочастотных помех. Поэтому блок принятия решений такой системы не может выдать команду управления на основе «разовых» расчетов без извлечения полезного сигнала из смеси. В то же время, фактор реального времени и ограничения в количестве накоплений, за счет возможного устаревания информации и увеличения динамической ошибки, затрудняет применение сложных алгоритмов фильтрации и рекуррентного поиска оптимального баланса между точностью, вычислительными затратами и быстродействием системы, основанных на многочисленных выборках сигналов [3].

Рассмотрим в этих условиях задачу самонаведения. Пусть функция угла поворота объекта задана в виде:

$$\theta = F(f_1(x,y), f_3(\phi,\psi) \pm \xi \cdot f_2(\phi,\psi)), \quad (1)$$

где x,y – координаты цели, φ,ψ – углы крена и тангажа, $z = f_1(x,y)$ – нелинейная функция от x и y, f_2, f_3 – тригонометрические функции ϕ,ψ, ξ – логическая функция знаков x,y,φ,ψ.

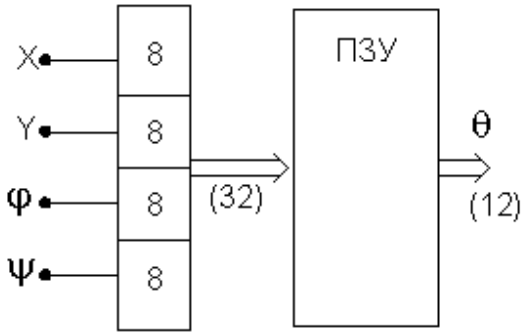


Рис. 1. Вычислительный преобразователь (ВПИ 1)

Определим требования к вычислительному преобразователю информации (ВПИ 1), рассматривая его как модуль «черного ящика» (рис. 1).

В методе прямого считывания конкатенация кодов x,y,φ,ψ задана таблицей связи адреса ПЗУ с ответом θ. Разрядность (n) двоичного позиционного кода (ДПК), представляющего значения x,y, зависит от потенциальной точности датчика информации. Для оптоэлектронных матриц 256×256 величина n = 8. Этой же разрядности достаточно для представления φ,ψ в связи с малым диапазоном изменений.

Для n = 8 выходную разрядность представления θ ограничим m = 12. При развороте на угол $\pm180^\circ$, точность исполнения команд составит $180^\circ / 2048 \approx 0{,}1^\circ$. Тогда объем ПЗУ определится

количеством комбинаций на входе ($4n$) и разрядностью выхода (m), т.е. $V = m \cdot 2^{4n}$. В этом примере необходима емкость ПЗУ $V = (8+4) \cdot 2^{32} = 3 \cdot 2^{34}$ бит.

Проведем более глубокий анализ функции (1). В силу того, что при $\varphi, \psi \to 0$ величина $\theta \to z$, где $z = F(f_1(x, y))$, в зависимости (1) можно выделить линейную и нелинейную части (рис. 2).

Вычисляя поправку $R(z_0, \varphi, \psi)$ получим $\theta = z \pm \xi \cdot R(z_0, \varphi, \psi)$, где z_0 – старшие разряды z, ξ – логическая функция знаков x, y, φ, ψ.

Анализ зависимости R от φ или ψ (рис. 3) показывает существенную, почти экспоненциальную, нелинейность от этих параметров, что дает основание для снижения разрядности φ и ψ с 8 до 4-х за счет неравномерного квантования.

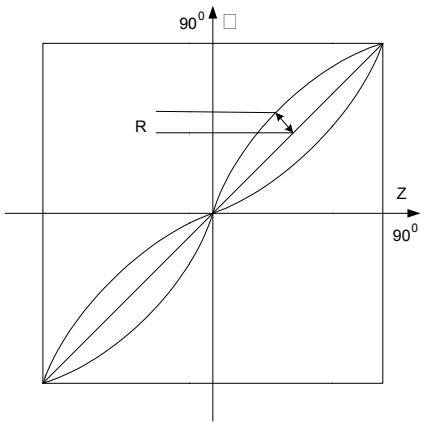


Рис. 2. График функции $\theta = \theta(z, \varphi, \psi)$ для максимальных значений φ, ψ

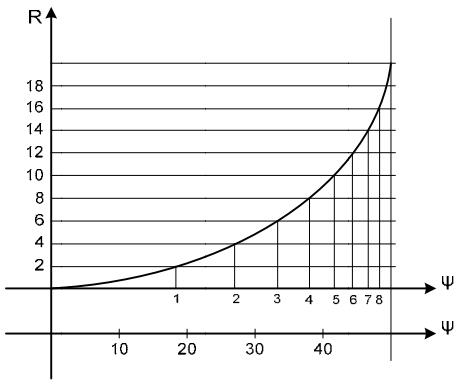


Рис. 3. Зависимость поправки R от ψ при максимальном значении z

Тогда структурная схема ВПИ 2 может быть представлена в виде рис. 4. На рис. 4 обозначено: $\tilde{\varphi}, \tilde{\psi}$ – нелинейные коды φ, ψ, Σ – накапливающий сумматор, (n) – разрядность переменной, ЛБ – логический блок, $Sx, Sy, S\varphi, S\psi$ – знак, соответствующей индексу переменной, МПА – микропрограммный автомат управления вычислениями, РгА – регистр адреса ПЗУ.

Структура ВПИ 2 (рис. 4), содержит функциональную (Ф), информационную (И), логическую (ЛБ), адресную (жесткие информационные связи между блоками) и управляющую (МПА) подсистемы. Структура предлагаемого ВПИ отличается от системной модели Ю.Ф. Мухопада [1, 3, 6] тем, что информационная (РгА 1, 2, 3, 4; Σ) и функциональная (ПЗУ 1, 2, 3, 4; Σ) подсистемы, обе содержат сумматор Σ, который принадлежит функциональной подсистеме и одновременно совмещает функции регистра памяти, являясь накапливающим сумматором. На блок-схеме ВПИ 2 рис. 4 связи МПА со всеми регистрами адреса, ПЗУ, сумматором и логическим блоком показаны упрощенно.

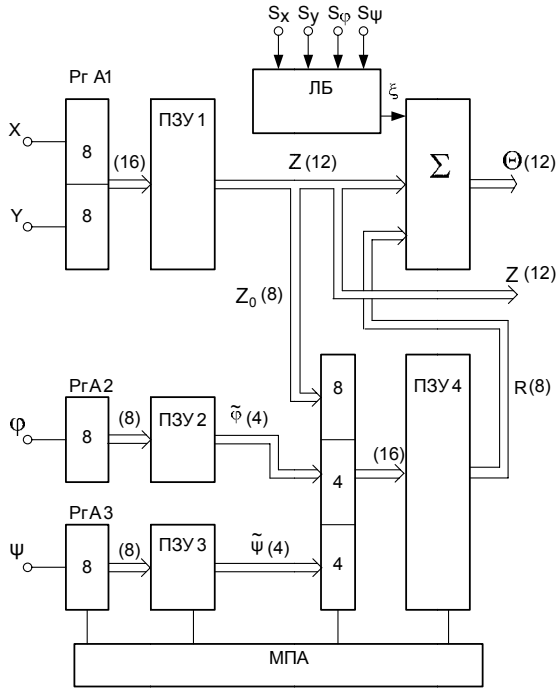


Рис. 4. Вычислительный преобразователь информации ВПИ 2

Сложность ВПИ 2 (без учета Σ и МПА) определится объемом всех ПЗУ, т.е. $V = 12 \cdot 2^{16} + 2(4 \cdot 2^8) + 8 \cdot 2^{16} \approx 5 \cdot 2^{17}$ бит. При более высокой точности представления x, y ($n \geq 10$) в структуре ВПИ 2 резко растет объем не только ПЗУ 1, 4, но и ПЗУ 2, 3 за счет необходимости более точного представления углов крена и тангажа φ, ψ.

В этом случае ВПИ 3 (рис. 5) реализуется типовой структурной организацией микропроцессорной системы со встроенными нелинейными

функциональными преобразователями для выполнения тригонометрических операций и операций умножения и деления.

Микропроцессор в этом случае выполняет функцию арифметико-логического устройства и микропрограммного автомата. Тогда точность вычисления θ может быть определена 16 разрядами ДПК. Отпадает также необходимость в нелинейном кодировании φ и ψ.

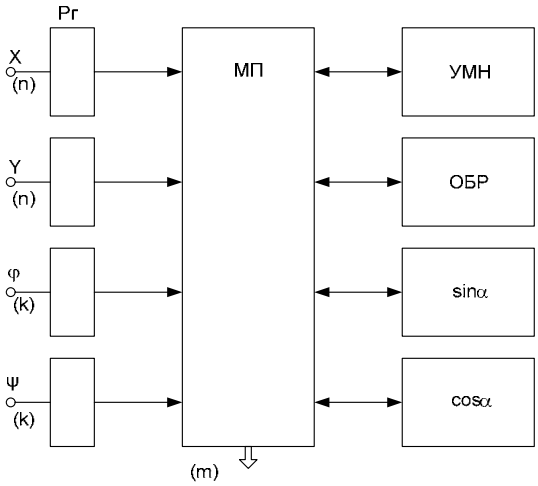


Рис. 5. Микропроцессорный преобразователь информации (ВПИ 3)

Выработка исполнительных команд управления разворотом на угол θ не может осуществляться на основе «разового» расчета, т.к. сигналы датчиков x, y, φ, ψ искажены низкочастотными и высокочастотными помехами. В реальных системах, особенно по координатам x и y, амплитуды помех могут превышать значение полезных сигналов. Однако реальный масштаб времени обработки затрудняет применение сложных статистических процедур фильтрации с большим числом накоплений из-за возможности устаревания информации и роста динамических ошибок.

В структуре рис. 6 предусмотрено гибкое переключение результатов расчета в накопителе простого усреднителя (БФ) и адаптивного фильтра (АФ), предложенного в работе [2]. В этом случае блок принятия решений (БПР) реализует подключение управляющими сигналами c_1, c_2, c_3, c_4, c_5 выходов θ и z преобразователей информации ВПИ 2 и ВПИ 3 к фильтрам БФ или АФ и мультиплексору K в зависимости от уровня сигналов z, φ, ψ, θ.

Вектор W от БПР осуществляет настройку параметров АФ по результатам анализа выходов ВПИ. Алгоритм работы БПР задан рис. 7. Структурная организация вычислений с динамической перестройкой (рис. 6) позволяет в реальном масштабе времени управлять ВПИ 3 с минимизацией динамической ошибки за счет адаптивного выбора параметров настройки фильтров и «точек» считывания результата обработки информации.

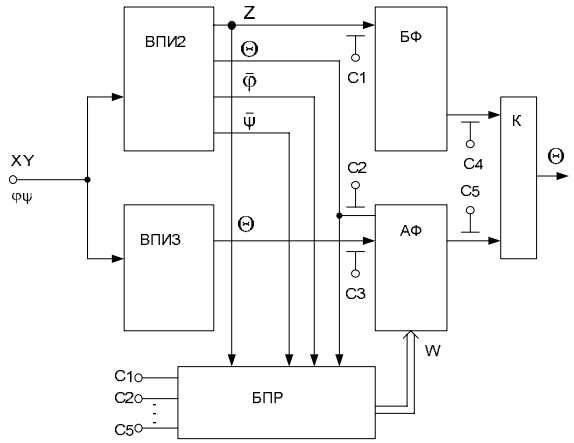


Рис. 6. Структурная организация ВПИ с динамической самонастройкой

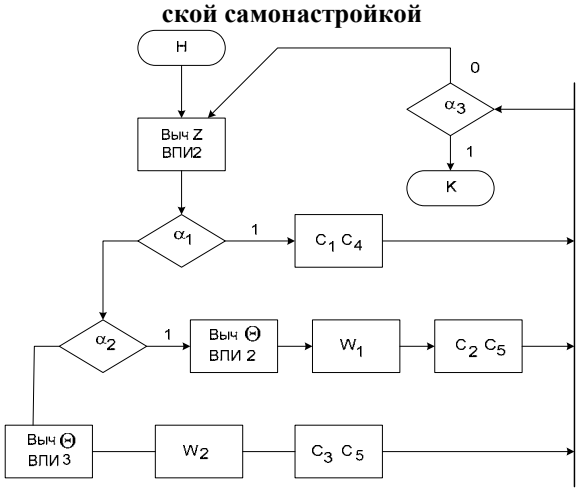


Рис. 7. Блок-схема алгоритма работы БПР: $\alpha_1 = 1$, если $z \le \theta_1$ ($\theta_1 = 15$); $\alpha_2 = 1$, если $\alpha_1 = 0$ и $\varphi, \psi \to 0$; $\alpha_3 = 1$, команда на исполнение разворота

Цель данной статьи заключается, конечно, не в том, чтобы показать возможности реализации ВПИ, относящихся к задачам самонаведения, с конкретной оценкой эффективности предлагаемых решений (по объему ПЗУ $5 \cdot 2^{17}$ вместо $3 \cdot 2^{34}$ бит) за счет снижения разрядности промежуточных преобразователей информации. Пример дан как конкретная иллюстрация методологического приема проектирования систем реального времени.

Структуры подобного типа для задач реального времени могут быть реализованы в технологических системах не только на основе микропроцессорной техники, но и с использованием время-

импульсных преобразователей информации [5], на элементах струйной техники [6] и других технологий [7].

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Мухопад Ю. Ф. Микроэлектронные информационно-управляющие системы. Иркутск : ИрГУПС, 2004. 404 с.
2. А. с. 14408. Адаптивный аналого-цифровой фильтр / Ю. Ф. Мухопад, Е. А. Кучина 1980, Бюл. № 5.
3. Пашков Н. Н. Алгоритмы адаптивно-модального разрывного управления с эталонной моделью и стационарным наблюдателем // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2005. № 6. С. 62–65.
4. Мухопад Ю. Ф. Проектирование специализированных микропроцессорных вычислителей. Новосибирск : Наука, 1984. 193 с.
5. Пунсык-Намжилов Д. Ц. Динамические перестраиваемые аналого-цифровые преобразователи информации для автоматизации технологических процессов : автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук / [Томск. ин-т автоматизир. сист. упр. и радиоэлектроники]. Томск, 1986. 16 с.
6. Пат. 70380. Российская Федерация. МПК^5 . U1 G 058 19/045. Программно-перестраиваемый пневматический оптимизатор / А. З. Комков, Ю. Ф. Мухопад, Н. Н. Пашков ; заявл. 10.09.2007 № 2007133878/22 ; опубл. 20.01.2008, Бюл. № 2. 2 с.
7. Мухопад Ю. Ф. Анализ и синтез информационно-управляющих систем // Информационные технологии и проблемы математического моделирования сложных систем. Иркутск : ИрГУПС, 2004. Вып. 5. С. 33–46.

Кобзов Д.Ю., Усова С.В.

УДК 69.002.51.192:621.225.2

ЭКСПРЕС-ДИАГНОСТИКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ГИДРОЦИЛИНДРОВ МАШИН

Увеличение единичных мощностей машин подразумевает, применительно к гидроцилиндрам привода рабочего оборудования, повышение уровня давления рабочей жидкости гидросистем, увеличение скорости перемещения штока, и его хода, а также размеров гидроцилиндров и, зачастую, интенсивности использования их во времени [1, 2].

Негативным проявлением этого, является резкое увеличение эксплуатационных нагрузок, ухудшение условий и режима функционирования гидроцилиндров, а вслед за этим, неизбежное снижение их надежности – в лучшем случае. В худшем – не исключена вероятность создания заранее неработоспособного гидроцилиндра [1].

В настоящее время в качестве гидродвигателей возвратно-поступательного действия гидрофицированного рабочего оборудования дорожных и строительных машин (ДСМ) широко применяются гидроцилиндры двустороннего действия с односторонним штоком [1]. Их классификация и назначение, устройство и виды исполнения, принцип действия и условия применения, а также схемы кинематического включения и гидравлического подключения достаточно подробно изложены в трудах отечественных [1, 3, 4] и зарубежных ученых [5-8].

Параметры гидроцилиндров оговариваются стандартами ГОСТ 6540-68, ГОСТ 12445-80, ГОСТ 12447-80 и ГОСТ 16516-80. При этом, ГОСТ 6540-68 и ГОСТ 12447-80 соответствуют международным стандартам ISO 3322 и ISO 2944 в части номинальных давлений, ГОСТ 6540-68 – ISO 3320 в части диаметров цилиндров до 400 мм по основному ряду и в части диаметров штоков до 360 мм, ГОСТ 6540-68 – ISO 4393 в части ходов поршня по основному ряду. Основные значения диаметров цилиндров и штоков, а также ходов поршня, выходящие за пределы указанных рядов, следует выбирать в соответствии с требованиями ГОСТ 12445-80 и ГОСТ 6636-69.

В процессе анализа эксплуатационной надёжности гидроцилиндра ДСМ были выявлены следующие повреждения [1]:

- у штока: износ поверхностей штока, образование на ней очагов коррозии, рисок, царапин, задиров и вмятин, искривление штока (Рис. 1), срыв резьбы;

Рис. 1. Изгиб штока гидроцилиндра рукояти экскаватора ЭО-4121А

- у корпуса (гильзы): появление эллипсности и конусности, образование на уплотняемой поверхности рисок, царапин и задиров, трещин и разрыв корпуса;

- у направляющих втулок и поршней: неравномерный по периметру и ширине износ трущихся поверхностей, образование на них царапин и задиров;

- у уплотнителей всех назначений: старение материала, неравномерный по периметру и ширине уплотнителя износ герметизирующих поверхностей, появление на них рисок и царапин, разрыв уплотнителя;

- у подшипников проушин: износ поверхностей скольжения, частичное или полное разрушение составляющих;

- у головки (гайки гильзы) – срыв резьбы;

- у проушины штока – срыв резьбы, обрыв проушин.

В этих условиях становится ясно, что диагностирование гидроцилиндров должно проводится не только по параметрам герметизации [7, 8], но и по параметрам их несущей (нагрузочной) способности [9, 10]. Желательно непосредственно в условиях эксплуатации.

Несущая способность, отображаемая напряженно-деформированным состоянием продольно-поперечно нагруженного гидроцилиндра, аналитически описывается двумя уравнениями [2, 9, 10]:

$$\text{у}_i(x) = \frac{P}{F(x)} + \frac{M_Q(x)}{W(x)} + \frac{M_R(x)}{W(x)} + \frac{P \cdot e(x)}{W(x)} + \frac{P \cdot y_T(x)}{W(x)} \quad (1)$$

$$y_T(x) = y_{\text{б}}(x) + y_{\text{в}}(x) + y_{\text{г}}(x) + y_{\text{д}}(x) + y_R(x) + y_Q(x) + y_P(x) = \\ = y_{TO}(x) + y_{\text{д}}(x) + y_R(x) + y_P(x). \quad (2)$$

В уравнении (1) первое слагаемое дает величину нормального напряжения от действия продольного сжимающего нагрузки P, второе – величину наибольших напряжений сжатия, вызванные действием поперечной нагрузки $M_Q(x)$, третье слагаемое – величину напряжений сжатия, вызванных действием силового поворота элементов в опорах гидроцилиндра, четвертое и пятое – то же, вызванные дополнительным изгибом гидроцилиндра при наличии эксцентриситета $e(x)$ в его опорах и от действия продольного сжимающего усилия P.

В уравнении (2): $y_{\text{б}}(x)$ - прогиб гидроцилиндра вследствие наличия зазоров в уплотняемых сопряжениях; $y_{\text{в}}(x)$ - то же в результате возможного начального искривления его длинномерных элементов; $y_{\text{г}}(x)$ - то же вследствие эксплуатационного искривления его штока; $y_{\text{д}}(x)$ - то же в результате радиальной деформации под давлением его корпуса; $y_Q(x)$ - то же вследствие его поперечного нагружения, от действия веса гидроцилиндра; $y_R(x)$ - то же в результате наличия силового поворота в его опорных элементах; $y_P(x)$ - то же вследствие его продольного нагружения [2, 9, 10].

В процессе эксплуатации вследствие накопления элементами гидроцилиндра повреждений происходит увеличение значений $y_{\text{б}}(x)$, $y_{\text{г}}(x)$, $y_R(x)$ и $y_P(x)$, что приводит к росту величин третьего, четвёртого и пятого слагаемых выражения (1) и собственно напряжений $\text{у}_i(x)$. Изменение последнего должно ограничиваться условием [11]

$$\text{у}_i(x) \le [\text{у}] = \frac{\text{у}_{\text{пч}}}{k_S}. \quad (3)$$

Здесь $\text{у}_{\text{пч}}$ - предел прочности материала штока, а k_S - статистический коэффициент запаса прочности.

Вследствие того, что стохастическая природа нагрузки определяется совокупностью большого числа возмущений, можно принять её распределённой по нормальному закону. Несущая способность, к возмущающим факторам которой от-

носятся физико-механические характеристики металлов и размеры элементов, случайная природа которых обусловлена, прежде всего, неоднородностью свойств металлов, погрешностью производства, допусками и прочее, также может приниматься нормально распределённой. Тогда по аналогии с выражением (4.19) работы [11] для принятой вероятности неразрушения коэффициент k_S определяется по формуле

$$k_S = \left(\frac{1}{1-\text{ш}^2_{\text{у пч}}\text{Л}^2}\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{1-\text{ш}^2_{\text{у пч}}\text{Л}^2}\right)\left[\left(\frac{1}{1-\text{ш}^2_{\text{у пч}}\text{Л}^2}\right) - \left(1-\text{ш}^2_{\text{у}_i(x)}\text{Л}^2\right)\right]}, \quad (4)$$

где: $\text{ш}_{\text{у пч}}$ и $\text{ш}_{\text{у}_i(x)}$ - коэффициенты вариации предела $\text{у}_{\text{пч}}$ прочности и текущих напряжений $\text{у}_i(x)$; Λ - квантиль нормального распределения [11], равный 1,645 для принятой надёжности 0,95.

При определении величины коэффициента k_S не следует забывать, что она не должна превышать значение минимально необходимого запаса прочности, характеризующегося коэффициентом [11]

$$k_{Smin} = \frac{\text{у}_{\text{пч}}}{f\left(\text{у}_{\text{пч}} - \Lambda\text{м}_{\text{у}_{\text{пч}}}\right)}, \quad (5)$$

где $\text{м}_{\text{у пч}}$ - среднее квадратическое отклонение предела $\text{у}_{\text{пч}}$; f – коэффициент безопасности, учитывающий особенности конструкции и условий эксплуатации [11].

Численный анализ выражения (1) показал [9], что возникновение пластической деформации штока стало возможным при напряжениях 240,60 МПа, то есть значительно меньших пределов $\text{у}_{\text{т}}$ текучести и $\text{у}_{\text{у}}$ упругости, за которым оно ожидалось. Очевидно, что в данном случае разрушение (появление пластической деформации) штока произошло в результате постепенного накопления повреждений металла, приведшего к необратимому изменению его физико-химических свойств. Другими словами, вследствие усталостного разрушения. Для проверки этого предположения необходимо рассмотреть цикл нагружения штоков гидроцилиндров рабочего оборудования, например, одноковшовых строительных экскаваторов. Он явно асимметричен. Максимальные отрицательные сжимающие напряжения у_{min}, установленные из выражения (1) как текущие $\text{у}_i(x)$, составляют 240,60 МПа. Ясно, что наименьшие положительные напряжения у_{max} растяжения с учётом конструктивных особенностей, например, гидроцилиндров стрелы экскаваторов IV-ой размерной группы и параметров их цикла экскавации определяются по сумме первых двух слагаемых формулы (1) и составляют для рассматриваемого случая 35,67 МПа. Тогда, средние напряжения у_m цикла составляют 102,14 МПа, являясь отрицательными, а амплитудные напряжения у_a равны 138,14 МПа. Эти напряжения связаны с пределом у_{-1} выносливости материала штока следующим выражением

$$k_S = \frac{\text{у}_{-1}}{\text{о}_{\text{у}}\text{у}_a + k_{\text{у}}\text{у}_m}, \quad (6)$$

где: $\text{о}_{\text{у}}$ - коэффициент снижения предела у_{-1} выносливости, равный для нашего случая 1,399 [12]; $k_{\text{у}}$ - коэффициент чувствительности материала к асимметрии цикла [12].

Принимая во внимание тот факт, что при отрицательных средних напряжениях у_m коэффициент $k_{\text{у}}$ следует полагать равным нулю, преобразуем выражение (6), расписав напряжения у_a в соответствии с [12] и приняв коэффициент k_S равным 1,0

$$\frac{|\text{у}_{max}| + |\text{у}_{min}|}{2} = \frac{\text{у}_{-1}}{\text{о}_{\text{у}}}. \quad (7)$$

Количественный анализ этого уравнения показывает, что значение левой части (138,14 МПа) при напряжении $\text{у}_i(x)$ превышает величину правой (135,80 МПа), характеризуемую минимальным по значению пределом у_{-1} выносливости (190 МПа) [11, 12]. Таким образом, величину последнего параметра выражения (1), необходимую для поиска предельного значения диагностического параметра, следует назначать, используя предел σ_{-1} выносливости. С учётом этого замечания выражение (4) примет вид

$$k_S = \left(\frac{1}{1-\text{ш}^2_{\text{у}_{-1}}\text{Л}^2}\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{1-\text{ш}^2_{\text{у}_{-1}}\text{Л}^2}\right)\left[\left(\frac{1}{1-\text{ш}^2_{\text{у}_{-1}}\text{Л}^2}\right) - \left(1-\text{ш}^2_{\text{у}_a}\text{Л}^2\right)\right]}. \quad (8)$$

Численный анализ основных положений работы [9] позволил установить величину коэффициента $\text{ш}_{\text{у}_a}$ вариации напряжений у_a, которая составила 0,25. Коэффициент $\text{ш}_{\text{у}_{-1}}$ вариации предела у_{-1} определяется из анализа работ [11, 13] и в данном случае принят равным 0,1. После подстановки полученных характеристик разброса в формулу (8) определим требуемый коэффициент

запаса k_S, обеспечивающий условие непревышения с надёжностью 0,95. Численно он равен 1,478, что больше минимального k_{Smin}, составившего 1,197 [9]. После подстановки в формулу (7) всех известных характеристик с учётом параметров критического нагружения гидроцилиндров в точке $x_{\text{у}}$ [9] запишем условие их безопасного состояния в виде

$$\text{у}\left(x_{\text{у}}, z^k, \Theta^k, p^k\right) < \frac{2\text{у}_{-1}}{k_S \text{о}_{\text{у}}} - \text{у}_{max}\left(x_{\text{у}}\right), \quad (9)$$

где: $x_{\text{у}}$ - координата опасного сечения; z^k, Θ^k, p^k - параметры критического нагружения гидроцилиндра [9], а именно: z^k - выдвижение штока; Θ^k - угол наклона гидроцилиндра к горизонту и p^k – давление жидкости в гидросистеме ДСМ.

Из выражения (6) максимальные амплитудные напряжения у_a для гидроцилиндров экскаваторов IV-ой размерной группы составили 116,06 МПа. Тогда в соответствии с выражением (13.2) работы [12] с учетом известных напряжений $\text{у}_{max}(x_{\text{у}})$ определим значение максимального предельного напряжения $\text{у}\left(x_{\text{у}}, z^k, \Theta^k, p^k\right)$ сжатия, которое равно 213,08 МПа. С учётом этой величины предельное значение прогиба $y_T^k\left(x_{\text{у}}, z^k, \Theta^k, p^k\right)$, являющегося диагностическим параметром несущей способности гидроцилиндра [9], согласно выражению

$$y_T^k\left(x_{\text{у}}, z^k, \Theta^k, p^k\right) = \frac{1}{P^k}\begin{Bmatrix} W(x_{\text{у}})\left[\text{у}\left(x_{\text{у}}, z^k, \Theta^k, p^k\right) - \dfrac{P^k}{F(x_{\text{у}})}\right] - \\ - M_Q\left(x_{\text{у}}, z^k, \Theta^k, p^k\right) - P^k e(x_{\text{у}}) \end{Bmatrix}, \quad (10)$$

составило соответственно для гидроцилиндров стрелы, рукояти и ковша экскаватора ЭО-4121А [9] при номинальном их нагружении и горизонтальном расположении с максимально выдвинутым штоком: $2{,}590\cdot10^{-2}$ м, $2{,}390\cdot10^{-2}$ м и $2{,}939\cdot10^{-2}$ м, а с учётом параметров их критического нагружения: $5{,}287\cdot10^{-2}$ м, $1{,}940\cdot10^{-2}$ м и $2{,}596\cdot10^{-2}$ м.

С учётом всего вышеизложенного решающее правило диагностирования гидроцилиндра по несущей способности может быть записано в виде

$$y_i(x_{\text{у}}, z^k, \Theta^k, p^k) \le y_T^k\left(x_{\text{у}}, z^k, \Theta^k, p^k\right), \quad (11)$$

где $y_T^k\left(x_{\text{у}}, z^k, \Theta^k, p^k\right)$ - предельное, а $y_i\left(x_{\text{у}}, z^k, \Theta^k, p^k\right)$ - текущее (контролируемое) значение диагностического параметра.

Характеризуя с позиций диагностики [14-16] технические возможности последнего, отметим следующее. Во-первых, параметр $y_i\left(x_{\text{у}}, z^k, \Theta^k, p^k\right)$ является однозначным, так как ни он сам, ни описываемые им напряжения $\text{у}\left(x_{\text{у}}, z^k, \Theta^k, p^k\right)$ не имеют экстремумов на пути их эволюции от начальных значений до предельных. Во-вторых, он стабилен, то есть может быть неоднократно воспроизведен с минимальным рассеиванием при неизменных условиях измерения. В-третьих, параметр $y_i\left(x_{\text{у}}, z^k, \Theta^k, p^k\right)$ является незатухающим, так как его связь со структурными параметрами и критерием состояния $\text{у}\left(x_{\text{у}}, z^k, \Theta^k, p^k\right)$ не нарушается с течением времени. Далее, названный диагностический параметр удовлетворяет требованию чувствительности с достаточно высоким уровнем [9]. Наконец, он удовлетворяет требованию информативности, так как, оценивая два практически единственных случайных параметра $y_{\text{б}}(x)$ и $y_{\text{г}}(x)$ уравнения (2), характеризующего несущую способность гидроцилиндра, приближает остаточную после диагностирования энтропию к нулю.

К сожалению, диагностирование гидроцилиндров по параметру $y_i\left(x_{\text{у}}, z^k, \Theta^k, p^k\right)$ с позиций безопасности возможно лишь при наличии в машине встроенной диагностической системы, например, аналогичной [17]. В противном случае, диагностирование несущей способности рекомендуется [9] проводить по текущему параметру $y_{TO_i}^k\left(x_{\text{у}}, z^k, \Theta^k, p^k\right)$, связанному с предельным - $y_{TO}^k\left(x_{\text{у}}, z^k, \Theta^k, p^k\right)$, описывающим деформацию гидроцилиндра до приложения продольного сжимающего усилия P и связанным с величиной $y_T^k\left(x_{\text{у}}, z^k, \Theta^k, p^k\right)$ выражением (2). Для определения численных значений величины $y_{TO}^k\left(x_{\text{у}}, z^k, \Theta^k, p^k\right)$ может быть использована, в частности, программа, представленная в работе [9].

Окончательно назначенный диагностический параметр $y_{TO_i}^k\left(x_{\text{у}}, z^k, \Theta^k, p^k\right)$, кроме прочих вышеперечисленных технических возможностей, удовлетворяет требованиям доступности, удобства измерений и технологичности так как даже будучи дискретно контролируемым может быть легко установлен для конкретных гидроцилиндров, доступ к которым, как правило, не затруднен и, что не мало важно, безопасно и без вмешательства в гид-

росистему. Для измерения его на практике могут использоваться устройства, подобные описанным в работах [9, 18, 19].

Однако, более эффективным с позиции достоверности оценки диагностического параметра $y_{TO_i}^k\left(x_y, z^k, \Theta^k, p^k\right)$ можно считать устройство для контроля несущей способности гидроцилиндра, лабораторный вариант которого представлен ниже.

Рис. 2. Излучатель на проушине гильзы

Устройство включает в себя излучатель, в качестве которого может использоваться лазерная указка, и два приёмника: конечный и промежуточный. Все элементы устройства закрепляются на диагностируемом гидроцилиндре с помощью постоянных магнитов и имеют соответствующие формы опорных поверхностей. Излучатель устанавливается на опоре корпуса (гильзы) гидроцилиндра, а именно, на торцевую поверхность крепёжного пальца проушины и фиксируется относительно его центрирующего отверстия (Рис. 2).

Рис. 3. Конечный приёмник на проушине штока

Конечный приёмник устанавливается и аналогично центрируется относительно проушины штока (Рис. 3). Полусферы опор излучателя и конечного приёмника обеспечивают изменение их углового положения относительно друг друга и гидроцилиндра в двух плоскостях.

Промежуточный приёмник, опора которого выполнена в виде «ласточкиного хвоста», что обеспечивает его расположение строго перпендикулярно оси абсцисс, устанавливается на гильзе вблизи крышки (Рис. 4). Луч лазера проецируется на промежуточном приёмнике в виде сетки, по линиям которой последний может быть сориентирован по оси ординат в поперечной плоскости гидроцилиндра. (Рис. 5). При отсутствии такого приспособления промежуточный приёмник может быть выверен по уровням.

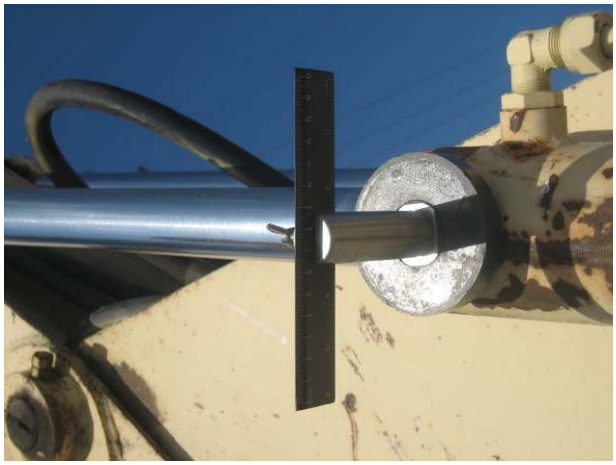


Рис. 4. Промежуточный приёмник на гильзе гидроцилиндра

Экспресс-диагностирование с использованием предлагаемого метода и средства осуществляется в три этапа. На первом этапе необходимо сфокусировать луч лазера в центре шкалы конечного приёмника (Рис. 3), тем самым, «построив» ось абсцисс, являющуюся линией отсчёта параметра $y_{TO_i}^k\left(x_y, z^k, \Theta^k, p^k\right)$. На втором этапе, требуется установить промежуточный приемник на гильзу вблизи крышки, абсцисса которой близка к координате x_y опасного сечения [9] и выверить по сетке (Рис. 5) либо уровням положение приёмника относительно оси ординат. На последнем этапе необходимо произвести замер по шкале диагностического параметра, обработать его с использованием положений математической статистики с целью получения достоверной оценки и по решающему правилу (11) выработать диагноз.

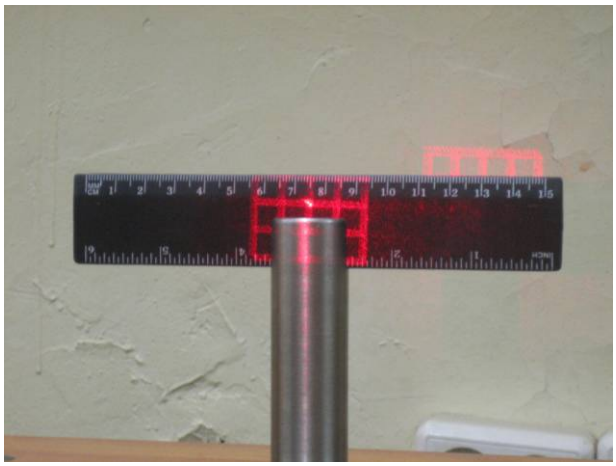


Рис. 5. Проекция луча лазера на промежуточном приёмнике.

Накопленный в процессе диагностирования массив статистической информации даёт возможность прогнозировать в будущем изменение технического состояния конкретного по назначению и параметрам гидроцилиндра и, тем самым, реализовать на практике преимущества внедрения диагностики в процесс технического обслуживания и ремонта машин.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Кобзов Д.Ю. Гидроцилиндры дорожных и строительных машин. Часть 1. Конструкция. Надёжность. Перспективы развития. Деп. В МАШМИР №2. 59 с.
2. Кобзов Д.Ю., Тарасов В.А., Трофимов А.А. Гидроцилиндры дорожных и строительных машин. Часть 2. Условия эксплуатации, рабочий процесс, режим работы и параметры нагружения. Деп. В ВИНИТИ № 3552-1399. 108 с.
3. Гидро- и пневмопривод и его элементы. Рынок продукции: Каталог/Коллектив составителей. – М., Машиностроение, 1992. – 232 с.
4. Элементы гидропривода: Справочник/Е.И. Абрамов, К.А. Колесниченко, В.Т. Маслов. Изд. 2-е, перераб. и доп. – Киев: «Техніка», 1977. – 320 с.
5. Goldoftas T. Cylinders for profit- making design//Hydraulics & Pneumatics, OH, USA, 1976. pp. 1-32. (на англ. яз.)
6. Li Tian Jue. Hydraulic engineering handbook. – Beijing: Mechanics Industry Press, 1990/ - 2230 p. (на кит. яз.)
7. Буренин В.В. Герметизация подвижных соединений гидроцилиндров строительных и дорожных машин//Строительные и дорожные машины, 1993, №6. С. 22-25.
8. Tao J., Timmermann H. – J., Plog J. Untersuchungen über das reibungsverhalten von polyuretannutringen //Ölhydraulik und Pneumatik, Deutchland, 35 (1991), Nr.8 C. 620-625. (на нем. яз.)
9. Кобзов Д.Ю. Диагностирование гидроцилиндров рабочего оборудования одноковшовых строительных экскаваторов: Дисс. … к. т. н. /ЛИСИ, Л., 1987. – 345 с.
10. Кобзов Д.Ю., Плешивцева С.В., Трофимов А.А., Лханаг Д., Жмуров В.В. Аналитическое представление несущей способности гидроцилиндров машин. (Статья). Труды Братского государственного университета. – Том 2. – Братск: ГОУ ВПО «БрГТУ», 2003. С. 47-51 – (Естественные и научные науки – развитию регионов).
11. Сырицын Т.А. Надёжность гидро- и пневмопривода. – М.: Машиностроение, 1981. – 216 с.
12. Любошиц М.И., Ицкович Г.М. Справочник по сопротивлению материалов. – 2-е изд. испр. и доп – Минск: Вышейшая школа, 1969. -464 с.
13. Волков Е.Б., Судаков Р.С., Сырицын Т.А. Основы теории надёжности ракетных двигателей. – М.: Машиностроение, 1974. – 400 с.
14. Калявин В.П., Мозгалевский А.В. Технические средства диагностирования. – Л.: Судостроение, 1984. – 208 с.
15. Макаров Р.А., Соколов А.В. Диагностика строительных машин.- М.: Стройиздат, 1984. – 335 с.
16. Харазов А.М. Техническая диагностика гидроприводов машин. – М.: Машиностроениме, 1979. – 112 с.
17. Кобзов Д.Ю., Хютте В.И., Кобзов А.Ю. Гидросистема. Патент РФ №2100665. Роспатент от 27.12.97.
18. Алексеенко П.Д., Кобзов Д.Ю., Сергеев А.П., Краснов А.Н. Диагностирование гидроцилиндров строительных экскаваторов// Современные направления развития технологии, организации обслуживания и ремонта строительных машин /ЛДНТП.-Л., 1988. – 8 с.
19. Кобзов Д.Ю., Войткевич В.Б. Диагностическое приспособление для контроля нагрузочной способности гидроцилиндров строительных машин. Информ. лист № 980-88 ЛЦНТИ. – Л., 1988. – 4 с.

Шастин В.И.

УДК 621.9.048.6

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕТОД МИКРОАНАЛИЗА ЭРОЗИИОННОЙ СТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Применение ультразвуковых колебаний является одним из важных направлений технического прогресса в различных отраслях промышленности и инновационных методах исследования различных материалов.

К наиболее перспективным областям использования относятся повышение эффективности технологических процессов, создание новых материалов, методы и средства производственного контроля и прогнозирования прочности конструкционных материалов.

Активное воздействие ультразвувой энергии высокой интенсивности (более 0,3 10^4Вт/м^2) вызывает в рабочей среде – жидкостях, газах, твердых материалах ряд эффектов, на которые в последнее время обращается большое внимание. Особый интерес вызывает возможность использование ультразвука в тех областях технологии, в которых требуется ускорить одни процессы, улучшить качество других, решить проблемы, овладение которыми с применением других видов энергии не удается [1]

Известно, что большая часть процессов в жидкостях сопровождается явлением ультразвуковой кавитации и возникновением акустических течений.

Наряду с негативными последствиями кавитационных явлений, связанных в основном с эрозионным износом весьма разнообразно практическое применение положительных эффектов кавитации, таких как диспергирование, гомогенизация, эмульгирование, интенсификация диффузии и ускорение других физико-химических процессов.

В настоящей работе содержатся краткие сведения о новом способе дифференциального определения кавитационной эрозионной стойкости различных слоев и структурных составляющих, а также оценке адгезионных и когезионных характеристик материала, подверженного воздействию кавитации [2].

Изучению акустической кавитации посвящено большое количество работ [3,4,5].Однако многие стороны кавитационного процесса, особенно для кавитационной области, все еще недостаточно изучены.

Кавитация заключается в образовании ряда мелких разрывов или полостей в жидкости под действием растягивающих усилий, создаваемых звуковой волной в фазе разряжения с последующим их захлопыванием в фазе сжатия. Скорость сжатия, вызываемого силами поверхностного натяжения и звуковым давлением, может достигать больших величин, вызывая гидравлическую ударную волну. Мгновенные значения давления в ударной волне доходят до нескольких сотен атмосфер. Таким образом, при расширении и сжатии кавитационной полости происходит своеобразная трансформация мощности, чем и объясняется кавитационное разрушение твердых тел в звуковом поле высокой интенсивности.

Последствия кавитационной эрозии в технике весьма значительны. Так насосы, турбины, гребные судовые венты, а так же такие конструктивные элементы как клапаны, вентили нередко выходят из строя, нарушая при этом нормальную работу жизненно важных систем. Процесс эрозии материала может происходить настолько быстро, что винты корабля после каждого рейса, а рабочее колесо насоса после нескольких недель работы выходит из строя [6]

Воздействию кавитации подвергается многие другие корабельные устройства: подводные крылья, стойки, гондолы винтов, обтекатели гидролокаторов, стабилизаторы и т.п., а также агрегаты гидросистем воздушных судов и автотрак-

торной техники. Проектирование этих узлов и агрегатов на основе теории и модельных (стендовых) испытаний и экспериментов в большинстве случаев позволяет свести к минимуму влияния кавитации. Устойчивость к эрозионному износу во многом определяется подбором материала изделий. При этом весьма эффективным является использование защитных покрытий из мягких и твердых материалов, а также различные виды термической, термо и электрохимической и иных видов обработки поверхностей. При этом не менее важной становится задача обеспечения достаточной адгезионной и когезионной прочности.

Поиск путей решения этой проблемы предусматривает проведение стендовых испытаний опытных образцов, а также модельные из – за трудностей связанных с реализацией первых. При этом определяются характеристики объектов (насосов, турбин, винтов, подводных крыльев, агрегатов гидросистем) для различных значений давления, температуры, вязкости и т.д., во всем диапазоне режимов работы объектов: от без кавитационного обтекания до режима падения характеристик. Для этого применяют достаточно сложные инженерные конструкции, например гидродинамические трубы замкнутого типа. Оценка показателей эрозионной стойкости, как правило осуществляется на макроуровневой основе: весовым методом, анализом линейных размеров, рельефа поверхности, отбора взвеси проб и т.д.

Таким образом, современный уровень развития теории и практики кавитационного износа позволяет во многом прогнозировать влияние физико-механических свойств и условий работы в кавитационной области звукового поля на свойства испытываемых материалов. Несмотря на это, попытки сделать сопоставимыми экспериментальные материалы по наиболее характерным сочетаниям свойств материалов и режимов испытания, позволяет лишь частично решить проблему комплексного исследования, особенно многослойных и композиционных материалов.

Это обусловлено, главным образом отсутствием единых методик, многофакторностью явлений происходящих в кавитационной области и большим разнообразием условий эксплуатации. Так, например при лазерном термоупрочнении и легировании, модифицированной слой может иметь толщину несколько десятков или единиц микрометров, рис. 1.

Традиционные методы не всегда позволяют адекватно оценивать эрозионную стойкость подобных микро, а иногда и наноструктур, а следовательно и их влияние на эксплутационные характеристики изделия в целом. В этом случае представляется весьма актуальной дифференциальная оценка стойкости покрытия и основы материалов, на основе сравнительной оценки эрозионной стойкости при дозированном воздействии внешней среды на исследуемый объект на микроскопическом уровне. В качестве которого предлагается использовать микрошлиф.

В целом, проблематика организации испытаний на эрозионную стойкость разбивается на два аспекта: во-первых, организация дозированного и регулируемого износа (т. е. установки для испытаний), и, во–вторых, достоверное и точное измерение степени износа. Обе задачи в данном способе, в принципе, могут решаться с помощью современных лазерно-оптических бесконтактных измерений в сочетании с компьютерными методами обработки сигналов изображений [6]

Первая обеспечивает контроль ультразвукового поля по корреляционным характеристикам в различных режимах от циркуляции жидкости и кавитационных пузырьков в ультразвуковой волне, до кавитационной эрозии материала.

Вторая позволяет оценить степень эрозии образца по отраженному оптическому сигналу монохроматичного излучения лазера и его анали-

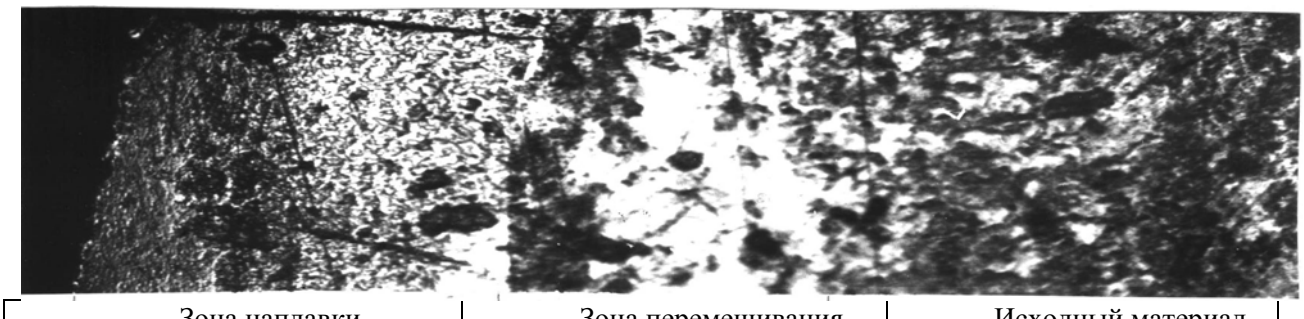


Рис. 1. Микроструктура зоны лазерной наплавки

за после испытания исследуемой поверхности (вейвлет и фрактальный анализ) [7].

Поэтому представляется перспективным использование воздействия кавитации на объект исследования, посредствам возбуждения ультразвуковых колебаний в жидкой среде, например дистиллированной воде.

На рис. 2 показана принципиальная схема экспериментальной установки для испытания на эрозионную стойкость.

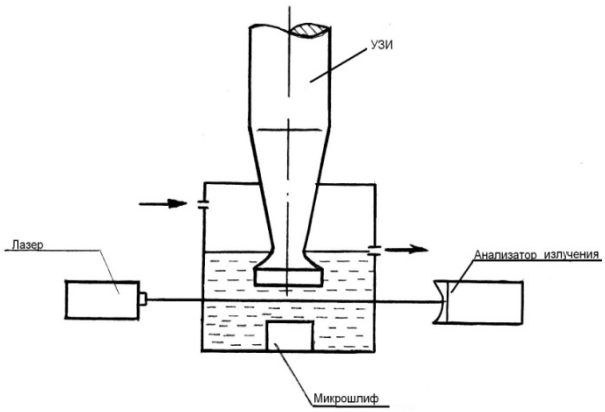


Рис. 2.

Уникальность этого метода состоит в сравнительном микроанализе эрозионной стойкости поверхностных слоев исследуемого образца, включая эталонный (не подвергнутый обработке слой) или основы материала при изучении их покрытий в корреляционной связи со структурными и прочностными характеристиками.

Состояние поверхности объекта подвергнутое такому виду обработки отображает реальному дифференциальную зависимость устойчивости к эрозии всех модифицированных и не подвергнутых обработке (эталонных) слоев исследуемого образца в его поперечном сечении.

Кроме оценки параметров эрозионной стойкости любых металлов и сплавов, а также неметаллических материалов способ позволяет косвенно оценить твердость, адгезионные и прочностные характеристики различных структурных составляющих, тонких покрытий, композитов и т. п., которые трационными способами определить не представляется возможным.

Анализ исследуемых параметров осуществляется путем изучения профиля обработанной поверхности, исходя из сопоставления записанных профилограмм или оптическими методами. Их анализ позволяет дать не только качественную оценку стойкости исследуемых зон, но и количественного оценить прирост или снижение относительных показателей, таких как относительная эрозионная стойкость ε по отношению к эталонному материалу (слою):

$$\varepsilon = \blacktriangle h_э / \blacktriangle h_и,$$

где: $\blacktriangle h_э$ – глубина эрозионного износа, слоя эталонной зоны образца; $\blacktriangle h_и$ – глубина износа исследуемой зоны.

В качестве эталонной зоны можно использовать показатели исходного (подповерхносного) слоя, не подвергнутого какому – либо виду обработки, сопоставляя при этом показатели эрозионной стойкости с микроструктурой исследуемых зон микрошлифа. Предложенный способ позволяет вести обработку в стоячих или близких к стоячим звуковым волнам, обеспечивающих равномерный износ исследуемой поверхности при плотности звуковой мощности до 2…3 10^3 Вт/м^2.

Предварительные лабораторные испытания подтвердили перспективность данного метода. В качестве УЗ – генератора использовался магнитострикционный диспергатор УЗДЛ – 1 с частотой колебаний 22 кГц и мощности излучения 500Вт. В качестве рабочей среды использовалась дистиллированная вода. Обработка полученных данных велась путем анализа записанных профилограмм исследуемой зоны. Полученные таким образом усредненные кривые профиля поверхности микрошлифов, подвергнутых лазерному упрочнению, хорошо согласуется с кривой зависимости показателя микротвердости по глубине зоны термического влияния и исходного материала, а также с микроструктурными преобразованиями модифицированного слоя Рис. 3, где зона А – наплавленный слой (см. рис.1); Б – Зона перемешивания; В – Исходный материал; $\blacktriangle h_э$ – износ эталонного слоя; $\blacktriangle h_и$ – износ испытываемого слоя.

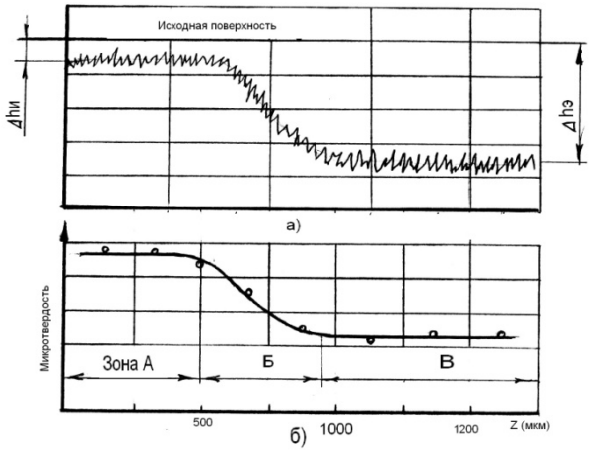


Рис. 3. Профилограмма поверхности микрошлифа (а); Распределение микротвердости по глубине зоны термического влияния (б)

Недостатком этого способа, как, впрочем, и всех других, является отсутствие, возможности адаптации данного механизма изнашивания, к другим многочисленным видам износа. Однако, учитывая, что свойства материалов, определяющие износоустойчивость являются, достаточно общими и имеют определенные взаимосвязанные закономерности, то данный метод может оказаться перспективным благодаря следующим его преимуществам:

- способ применим для исследования практически любых металлов, сплавов, минералов, неметаллических и композиционных материалов, а также покрытий;

- представляется возможным, оценка влияния любых видов упрочнения (лазерная и плазменная закалка и наплавка, термохимическая обработка, наклеп и др.), на показатели эрозионной стойкости и прочностные характеристики по всей глубине упрочненного слоя, имея при этом сравнительный, качественный и количественный характер;

-способ позволяет обеспечить регулируемый износ испытуемого материала (контролируя мощность и длительность УЗ воздействия) в различных режимах - от воздействия акустических течений жидкости до кавитационной эрозии материала при условии согласования формы кюветы и образца с геометрией ультразвукового поля.

- процесс испытания может быть значительно ускорен при избыточном статическом давлении, создаваемом в рабочей зоне обработки;

- удобен при обработке полученной информации, и накоплению статистического материала, благодаря простоте, доступности и достаточно высокой производительности результатов испытаний;

- данная методика позволяет моделировать не только различные виды эрозии в рамках этого способа, но и имитировать в ходе испытания различные дополнительные химические, электрохимические и физико–химические условия испытаний, характерные для реальных условий изнашивания;

- испытания этим способом можно осуществлять в различных жидких, газообразных и комбинированных средах, имитируя при этом условия смазки и воздействие коррозионных и агрессивных сред.

Предварительные результаты по использованию данного метода, а также методики комплексного изучения свойств материалов, могут представить значительный научный и практический интерес.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Абрамов О. В., Хорбенко И. Т., Швегла Ш. Ультразвуковая обработка материалов/ Под ред. О.В. Абрамова – М.: Машиностроение, 1984. – 280с.
2. Пат.2359245 Российская Федерация. Способ определения кавитационной износостойкости. [Текст] / Шастин В. И., Горовой А. М.; заявитель и потентообладатель Иркутское высшее военное авиационное инженерное училище (военный институт) – заявил. 18.09.07.; положительное решение от 12. 02. 09.
3. Агранат Б. А., Кириллов О. Д., Хавский Н.Н. Ультрозвук в гидрометаллургии. М.,; «Металлургия», 1969, 303с.
4. Мощные ультразвуковые поля. Под ред. Розенберга. М., «Наука», 1968. 267с.
5. Poheman R., Werden B. The Ultrasonic Cleanung. Process. – «Vetrusonics», 1972. July, p. 156 – 161.
6. Pearsall O. S., Acustic delection of cavitation, Symp. Vibrations in hybraulic pumps and turbines, Y. Mech. E. Proc., 181, pt. 3A, 1966 – 1967.
7. Иванова В. С., Баланкин А. С., Бунин И. Ж., Оксогоев А.А. Синергетика и фракталы в материаловедении. – Мю: «Наука» 1994.

Резник Ю.Н., Шумилова Л.В. УДК 622.342

ВЛИЯНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРИЧИН ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УПОРНОСТИ ПРИ ИЗВЛЕЧЕНИИ ДИСПЕРСНОГО ЗОЛОТА ИЗ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Развитие минерально-сырьевой базы золотодобывающей промышленности на современном этапе связано, главным образом, с масштабным вовлечением в разработку руд с микроскопической-субмикроскопической формой, а также с рассеянными (дисперсными) формами нахождения золота в кристаллической решетке минералов-носителей.

Частицы тонкодисперсного золота распространены значительно более широко, чем видимые золотины. Они присутствуют во всех рудных месторождениях не только золота, но и многих других металлов, где видимое золото не встречается, а также рассеяны в больших массах гидротермально измененных пород. Вероятно, не будет преувеличением утверждать, что эта форма нахождения самородного золота в эндогенных месторождениях является универсально распространенной. Соответственно велики общие количества дисперсного золота.

Некоторые формы дисперсного золота не только не полностью выявляются при проведении аналитических работ, но и сохраняют прочные связи с минеральной матрицей после проведения различных методов окисления перед выщелачиванием

Наличие в рудах дисперсного золота является одной из главных причин технологической упорности золоторудного сырья. При этом, естественно, имеется в виду, что минералы, являющиеся носителями дисперсного золота, должны обладать плотной механической структурой, абсолютно не проницаемой для цианистых растворов. Именно совокупность двух факторов: плотность структуры минеральных зерен плюс дисперсность заключенного в них золота и обуславливают технологическую упорность золотых руд и концентратов в гидрометаллургическом процессе.

Для эффективной переработки минерального сырья учёные на протяжении более семидесяти лет стремятся создать единую классификацию золотосодержащих руд, которая бы увязывала вещественный состав руд с их технологическими свойствами, в том числе с учетом причин упорности, влияющих на извлечение металла при цианировании и успешно это осуществили (А.М. Глотов, Е.И. Громов, В.И. Зеленов, К.Д. Игнатьева, В.М. Изоитко, Ф.В. Квистон, С.В. Королёв, А.Ф. Ли, В.В. Лодейщиков, В.Я. Мостович, Б.В. Невский, Н.В. Петровская, Г.В. Седельникова, И.К. Скобеев, М.И. Фазлуллин, В.В. Шумейкер и др.).

Однако, в настоящее время вовлекаются в переработку упорные золотосодержащие руды крупных близповерхностных месторождений с низким содержанием металла 0,5-2,0 г/т с присутствием дисперсного золота в сульфидах.

Отрабатываемые золотосодержащие руды в последние два десятилетия методом кучного выщелачивания, часто находятся рядом с карбонатно-глинистыми породами, обогащенными кремнеземом и органическим веществом.

Эти руды содержат дисперсные формы золота с преобладанием золотосульфидной пирит (пирротин) – арсенопиритной рудной ассоциацией (содержание сульфидов не превышает 3-5%, значительное количество глинистых минералов).

В России относительное количество таких месторождений (так называемый карлинский тип) 50%, в других странах 20 % (Россия - Нежданинское, Наталкинское, Советское, Олимпиадинское, Сухой Лог, Майское, Воронцовское, Светлинское, Куранахское, Вершино-Дарасунское; Узбекистан – Мурунтау, Кокпатас, Даугызтау; Северо-Казахстанская рудная провинция; США - Голдстрайк, Джуно, Мазер Лод, Карлин, Голд Кворри, штат Невада, Боттл, Маунтин-Эурека, Гетчелл,

Твин Крикс и др. (всего 114 месторождений); Австралия – Бендиго, Балларат; КНР, Малайзия, Филиппины, Доминиканская Республика, Испания, Греция, бывшая Югославия).

Поэтому месторождения карлинского типа (золотое оруденение в углеродсодержащих сланцево-карбонатных комплексах) с дисперсными формами золота, в настоящее время представляют научный и практический интерес.

Минерально-сырьевые объекты золоторудных месторождений, в которых органическая составляющая в основном представлена углеродистым веществом, включая черные сланцы и руды карлинского типа имеют высокий уровень развития и однотипность: известково-глинистый состав пород; слоистый характер рудных тел; прожилково-вкрапленное оруденение; сульфидный (в основном пирит-арсенопирит) состав руд с тонкодисперсным золотом в сульфидах; наличие низкотемпературной сурьмяно-мышьяково-ртутной минерализации.

В связи с тем, что цены на золото значительно возросли, а запасы богатых легкообогатимых руд истощились, проблема переработки таких типов руд перешла из ранга незначительных в ранг актуальных.

В настоящее время существует ряд проблем анализа руд с дисперсными формами золота, его выщелачивания и сорбции, в том числе руд карлинского типа.

В России 1973 -1979 гг. Иргиредметом (В.В. Лодейщиков, К.Д. Игнатьева) разработали систему технологической типизации золотосодержащих руд, основанную на отношении руд к процессу цианирования. В данной классификации золотых руд по характеру и степени технологической упорности предложено выделить технологический тип упорных (трудноцианируемых) руд: Б – руды с тонковкрапленным золотом и серебром (физическая депрессия золота в цианистом процессе); В – руды, цианирование которых сопровождается химичексой депрессией золота минеральными компонентами – примесями, проявляющими восстановительные или «цианисидные» свойства; Г – руды, характеризующиеся повышенной сорбционной активностью по отношению к растворенным в цианиде благородных металлов.

Предложенная этими учеными классификация золотосодержащих руд и рекомендованная к практическому использованию, была большим прогрессивным шагом вперед в решении проблемы переработки упорного минерального сырья.

В зарубежной практике обогащения руд в 1981 г. W.J. Guay предложен очень простой и информативный метод оценки упорности руд карлинского типа. Характерной особенностью руд карлинского и аналогичных типов является наличие «невидимого» золота. Сущность этого метода заключается в том, что «упорность» руд определяется только показателями извлечения золота по атомно-абсорбционному методу анализа при стандартном цианировании без выделения различных форм дисперсного золота.

В соответствии с этой методикой золотосодержащие руды по технологической упорности делятся на два типа: 1) неупорные (цианируемые) – извлечение металла 80 % и более); 2) упорные – извлечение металла менее 80 %.

При более детальном исследовании месторождений золота в частично метаморфизованных осадочных карбонатно-алюмосиликатных породах с концентрированием его как в сульфидах, так и в углистом веществе с преобладающим размером выделений золота менее 5 мкм, проведенном Hausen, Robinson, Bucknam, Casparini и др., выделено ряд причин низкого извлечения дисперсного золота при цианировании, которые условно разделены на две группы – «физические» и «химические».

Причины химической упорности: 1) руды содержат нерастворимые теллуриды золота; 2) компоненты – минералы и органические соединения, присутствующие в руде (цианопоглотители, поглотители кислорода, осадители золота).

Причины физической упорности: 1) руды содержат золото в виде вкраплений или включений (углерод, пирит, арсенопирит, кремнистая матрица); 2) сплавы золота (Sb и Pb) и природные амальгамы; 3) золото, покрытое пленками (оксидами Fe, хлоридом Ag, соединениями Sb, Mn, Pb); 4) руда содержит сорбционно-активный для золота компонент (глины, углистые соединения).

Классификация причин упорности руд с дисперсным золотом, предложенная американскими геологами, безусловно, является научно обоснованной и практически применимой для руд карлинского типа. В связи с тем, что существует большое разнообразие генетических типов месторождений руд, содержащих дисперсное золото в различных формах, требуется проведение геолого-технологической оценки руд, исходя из конкретных условий.

Вместе с тем необходимо отметить, что есть причины упорности, которые часто не учитываются:

1) в процессе цианирования при кучном выщелачивании идут конкурирующие процессы сорбции кислорода каплями реагента при эмми-

терном (капельном) орошении и его дегазации при фильтрации раствора в материале кучи;

2) наличие покровных плёнок («рубашек», «наклёпок» и т.п., которые сорбируют реагент и останавливают процесс диффузии его в минеральной матрице).

Субмикроскопические частицы золота крупностью ($n \cdot 10^{-7}$ м) и окночастицы ($n \cdot 10^{-8}$ м) надежно выявляются электронной и лазерной микроскопией и при отсутствии рассмотренных выше причин упорности руд не представляют большой проблемы для извлечения металла, так как достаточно частичного окисления мелкодробленой руд (концентрата) в кучном варианте.

Диапазон вкрапленности золота в различных типах сульфидных руд достаточно широк: от атомарного (рассеянного) до нановключений. Поэтому осложняющим фактором при переработке сульфидных руд является то, что золото находится в минеральной матрице в форме наночастиц ($n \cdot 10^{-9}$ м).

Вследствие тесной ассоциации золота с сульфидными минералами руда является высокоупорной и не позволяет добиться удовлетворительного извлечения золота.

Кауэс в 1911 году впервые определил, что потери золота с хвостами цианирования на Вайхи-Паэрола (Новая Зеландия) обусловлены наличием в руде природного углерода (цит. по: Miller J., Wan R., DiazX. //Advances in gold ore processing. / Ed. M. Adams. — Elsevier. Amsterdam, 2005. P. 937). Немного позже было установлено, что природное углеродное вещество может существенно снизить извлечение золота («паразитная» сорбция) при наличие всего 0,1% органического углерода в составе руды.

При переработке сульфидно-углистых, сульфидно-сульфосолевых руд с углистыми органическими включениями наиболее активными естественными сорбентами золота являются углистые сланцы.

Органо-металлические формы дисперсного золота представляют сложность при его извлечении стандартным цианированием и требуют использования процессов окисления матрицы перед или в процессе выщелачивания. Кроме графита (и некоторых других углесодержащих минералов) в качестве сорбентов золота в цианистом процессе могут выступать и другие компоненты руды. К их числу могут быть отнесены: глинистые минералы, например, пирофиллит.

Роль естественных сорбентов золота из цианистых растворов могут также играть некоторые силикаты, алюмосиликаты, тонкоизмельченный кварц и другие рудные компоненты.

На результаты предварительного обогащения руд с дисперсным золотом флотационным методом большое значение оказывают следующие параметры:

1) размер вкрапленности сульфидных и сульфосолевых минералов и их типоморфные признаки;

2) соотношение сульфидных и сульфосолевых минералов;

3) наличие технологически активных жильных минералов, обладающих по отношению к ним абразивными (кварц, турмалины, гранаты) или близкими к ним поверхностно-активными свойствами (минералы глин, гидрослюды).

Особенность флотации как метода извлечения золота – это возможность извлечь в концентрат не только свободное золото, но и золото, находящееся в тесной ассоциации с сульфидами.

Очевидно, что переработка полученного флотационного концентрата с целью извлечения из него золота значительно проще и дешевле, чем аналогичная переработка всей массы руды, так как иногда большая часть золота в полученном концентрате относится к категории упорного и требует специальных дорогостоящих приемов извлечения.

Несмотря на то, что в отдельных случаях флотационное обогащение не позволяет сконцентрировать все золото в золотосодержащем концентрате, но оно позволяет перевести в концентрат наиболее упорную часть золота. Целесообразность данного технологического приема заключается в том, что полученный флотоконцентрат подвергают специальной переработке, что значительно дешевле, чем перерабатывать, таким образом, всю массу руды, как правило, доизвлекают золото из хвостов флотации цианированием.

Во флотационной пульпе нередко присутствуют такие реагенты, как цианид, сернистый натрий, щелочи, медный купорос, которые в большей или меньшей степени подавляют флотацию золота.

Подавляющие действия цианида связано с его способностью растворять ксантогенат золота и сорбироваться на свободной или ранее занятых собирателем участка поверхности золота

Флотируемость золота зависит также от содержания в пульпе таких минералов, как пирит, пирротин, арсенопирит и халькопирит, которые ухудшают флотацию золота. Более всего подавляют флотацию золота соли железа, особенно сернокислая соль закисного железа.

Отрицательное влияние на последующее извлечение золота в процессе сорбционного циани-

рования оказывает повышенное содержание углеродосодержащих сланцев и глинистых минералов в руде, с содержанием в руде углистого вещества. Глинистые минералы проявляют сорбционные свойства, что проявляется в снижении эффективности ионообменной сорбции. Для сульфидных руд прослеживается четкая связь извлечения золота от содержания углерода. Углистые вещества содержат органические компоненты, способные образовывать альтернативные цианидному комплексу с ионами золота, так как наряду с растворением золота наблюдается сорбция золота жидкой фазы углеродсодержащей частью руды («паразитная» сорбция). Это приводит к высокому содержанию золота в твердой фазе в «голове» процесса и смещению растворения в сторону хвостового цианирования.

Анализ результатов, проведенных исследований, сопоставление их с промышленным опытом извлечения золота из руд сложного вещественного состава, практически всех известных в мире разновидностей золоторудного сырья, привели автора к выводу о целесообразности выделения упорных золотосодержащих руд с дисперсными формами золота в отдельную категорию минерального сырья и о необходимости выработки научно-обоснованных критериев для выбора рациональной технологии их переработки.

Классификация золотосодержащих руд с дисперсными формами золота по технологической упорности руд, основанная на отношении этих руд к процессу цианирования, разработанная американскими геологами, авторами дополнена. В предложенной классификации технологические типы выделяются по уровню извлечения золота при использовании стандартных схем сорбционного цианирования.

Руды с физическими причинами упорности, в отличие от классификации упорности карлинских руд вместо четырех разновидностей классифицируются на пять категорий. Дополнительно вводится категория упорных руд, в которых золото находится в минеральной матрице в форме наночастиц и окточастиц ($n \cdot 10^{-9}$т-м 10^{-8}м). Такое разделение необходимо, особенно когда руды месторождения содержат как видимое, так и дисперсное золото. Руды с химическими причинами упорности по аналогии с американской классификацией подразделяются на две категории.

Поэтому возникает необходимость использования нового разделительного признака, определяющего эффективность:

1) флотация при концентрировании сульфидов и сульфосолей, содержащих золото;

2) сорбции растворенного золота.

В классификации золотосодержащих руд с дисперсными формами золота по технологической упорности авторы предлагают выделить в отдельную категорию руды с физико-химическими причинами упорности при цианировании. К такой категории относятся руды, которые содержат флотоактивные и сорбционно-активные компоненты - глинистые минералы или углистые вещества, усложняющие получение флотоконцентрата золотосодержащих минералов и/или поглощающие золото из раствора, быстрее, чем технологические сорбенты (активированный уголь или ионообменные смолы). Кроме того, физико-химическая упорность руд определяется и наличием нано- и окточастиц золота, имеющих химическую связь с органическими элементами, образующими сульфидно-сульфосолевую матрицу.

Эффективным технологическим решением можно считать флотационное отделение углистого вещества, накопление его, активация и последующее использование для сорбции золота из хвостовой пульпы.

Золотосодержащие сульфидные руды, в состав которых входит углерод, целесообразно перерабатывать методом флотации с получением отвальных хвостов по золоту. Флотация графита и других углеродсодержащих минералов в данном случае должна играть роль вспомогательной операции для получения концентрата достаточно высокого качества.

Представляет интерес технологическая схема с последовательной флотацией углерода и сульфидов с тщательным подбором режима флотационного обогащения на каждой стадии отработки руды при условии получения неотвального золотосодержащего угольного концентрата, который может быть объединен с сульфидами для совместной обработки. Назначение угольной флотации в данном случае состоит в уменьшении суммарного выхода концентратов.

В связи с тем, что при отработке различных рудных тел, в пределах одного месторождения и горнодобывающего предприятия, по горизонтали и вертикали в добытом минеральном сырье в широких диапазонах колеблется содержание, уровени и формы дисперсного золота, как в зонах окисления, так и в зонах сульфидизации с параметрами в целом ряде случаев сопоставимыми с крупнейшими геологическими телами, возникла необходимость в разработке геолого-технологической классификации золотосодержащих руд по макро- и микропризнакам для экспрессной технологической оценки типа руды, в том числе с учетом фи-

зико-химических причин упорности, и выбора оптимального варианты переработки по гибкой перестраивающейся технологии.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Лодейщиков В.В. Технология извлечения золота и серебра из упорных руд.– Иркутск: Иргиредмет, 1999. – Т.1. - 120 с.
2. Секисов А.Г. Дисперсное золото. Геологические и технологические аспекты. / А.Г. Секисов. Н.В. Зыков. В.С. Королев. – Чита: ЧитГУ, 2007.-С. 269.
3. Меретуков М.А. Золото и природное углистое вещество. – М: Издательский дом «Руда и Металлы», 2007. – 109 с.

Шумилова Л.В.

УДК 622.342

МЕТОДЫ ЭФФЕКТИВНОЙ ПОДГОТОВКИ К ЦИАНИРОВАНИЮ УПОРНЫХ СУЛЬФИДНЫХ РУД И КОНЦЕНТРАТОВ

Забайкальский край обладает значительными запасами рудного и россыпного золота, природные и техногенные источники которого характеризуются рядом минералого-геохимических особенностей. Последние определяют необходимость использования новых эффективных технологий извлечения металла.

В первую очередь такими особенностями являются комплексный характер и сложный вещественный состав руд, содержащих золото и его преимущественно дисперсная форма нахождения.

В последние годы в России и за рубежом интенсивно развиваются новые перспективные направления в области переработки руд, содержащих дисперсное золото, на основе использования процессов бактериального (био) окисления сульфидных и сульфидно-солевых минералов, окисления высокоактивными кислород- и хлор- содержащими реагентами руд с органическими и битумно-углистыми включениями, а также электрохимическая, электроимпульсная и плазмохимическая активация процессов выщелачивания, активированная сорбция в локальных электрических и магнитных полях.

Перспективной технологией переработки упорных и сульфидно-солевых руд с дисперсными формами золота, по мнению автора, является биотехнология.

Биотехнология требует незначительных капитальных и эксплуатационных затрат, ее достоинства заключаются в простоте технологической схемы, аппаратурного оформления и высокой экономичности. Технология отличается экологической чистотой, так как вынос железа происходит при температуре и давлении окружающей среды, без применения таксичных реагентов и под воздействием микроорганизмов. Технологии, заимствованные у самой природы, наиболее экологически безопасны.

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 (ЦНИГРИ, ИПКОН РАН) и ВУЗов (МИСИС, РГГРУ, ЧитГУ) страны под руководством его учеников.

Изучением причин, вызывающих осаждение золота из цианистых растворов углесодержащими компонентами, занимались многие исследователи. Наиболее значительные работы в этом, направлении проведены (в порядке хронологической последовательности) Филипом, Эдмансом, Фельдтманом, Гроссом и Скоттом, И. Н. Плаксиным и Н. А. Журловым, В.И. Максимовым, С. М. Ясюкевичем, Н. И. Ванеевым и др.

Наиболее успешными из современных работ в этом направлении являются исследования, которые проводятся в ИПКОН РАН совместно с институтом радиоэлектроники. (В.А. Чантурия, И.Ж. Бу-

нин, В.Д. Лунин), ЦНИГРИ (Г.В. Седельникова), МИСИС и одной из внедренческих компаний Санкт - Петербурга (Н.И. Глинин и др.), а также несколькими частными компаниями в США.

На основе разработанных Иргиредметом (с участием ИНМИ РАН и ЦНИГРИ под руководством Г.В. Седельниковой) 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.

Углубленные исследования форм нахождения дисперсного золота, выделенных по типам химических связей с минералообразующими элементами и акцессорными, позволяют считать, что промышленный потенциал природных и техногенных золотосодержащих минеральных образований может быть значительно выше оцениваемого. Развитие в последние годы новых перспективных технологических решений на основе использования процессов бактериального (био)окисления сульфидных и сульфидно-солевых минералов, содержащих дисперсное золото, окисления высокоактивными кислород и хлор содержащими реагентами руд с органическими и углистыми включениями, электрохимическая и плазмохимическая активация процессов выщелачивания, активированной сорбции в локальных электрических и магнитных полях позволяет рассматривать эти особенности как инициацию их творческой реализации для конкретных типов золотосодержащих объектов.

Извлечение дисперсных форм благородных металлов и в частности золота, требует предварительного изменения микроструктуры их минералов-носителей (в первую очередь повышения пористости и формирования сети микротрещин) и микроагрегации атомов элементов-примесей.

Учитывая тенденцию снижения среднего содержания благородных металлов в перерабатываемых рудах, а также вовлечение во вторичную переработку содержащих их техногенных минеральных образований, решение вопроса снижения энергозатрат при электрообработке пульп остается актуальным.

Идеология поиска вариантов сочетания различных процессов активации строится автором работы таким образом, чтобы получить максимальный эффект при извлечении золота.

Биоокисление – передовая технология, она опробирована в производственных условиях, но пока дорогостоящая и процесс идет достаточно экстенсивно, а также при окислении образуется сложный вещественный состав продуктов биоокисления, значительное количество вторичных соединений Fe, As и недоокислившихся сульфидов.

Устранить эти недостатки можно увеличением контактной поверхности, а также за счет формирования элементарной серы, как компонента питательной среды для тионовых бактерий на основе предварительного физико- химического или фотоэлектрохимического окисления.

Наиболее подвержены воздействию микроорганизмов минералы с дефектами в виде различных включений, ослабляющих их внутреннюю структуру. Под влиянием микроорганизмов, выщелачивающих железо в естественных условиях, на месторождениях образуются участки с низким его содержанием.

С целью интенсификации процесса окисления упорных руд, сульфидно-сульфосолевых концентратов и более полного раскрытия минеральной матрицы было предложено осуществлять комбинированное окисление – предварительную фотоэлектрохимическую обработку растворами реагентов и последующее бактериальное окисление минеральной матрицы, а для повышения извлечения золота из окисленного концентрата – двухстадийное сорбционное цианирование с использованием электроактивации пульп и контрольной электросорбции.

Экспериментальная проверка теоретических положений комбинированных методов окисления осуществлялась по технологической схеме, смоделированной на пульпе ГМЗ-3 Новоийского ГМК (г.Учкудук, Узбекистан). Для проведения полупромышленных испытаний двухстадийной схемы электроактивационного выщелачивания дисперсного золота из сульфидных руд была испытана комбинированная (с физико-химическим и бактериальным окислением) технологическая схема.

Для обеспечения эффективного протекания процесса двухстадийного сорбционного выщелачивания из концентратов сульфидных руд, матрица минералов-носителей дисперсного золота должна быть окислена не менее чем на 60-65 %, что достигается за 70-100 часов и далеко не во всех случаях возможно, используя только бактериальное окисление.

В связи с чем, нами было предложено осуществлять комбинированное окисление пирит-арсенопиритовых флотоконцентратов первоначально сернокислотным раствором (3 %), обработанным в электролизере и пробарботированным в течение определенного времени (порядка часа) воздухом, подаваемым через кварцевую колбу,

размещенную в зоне облучения ультрафиолетовой лампой ДРТ-230. Объем реактора 30 л. При этом в растворе наблюдалось образование перекиси водорода (в стабильной и метастабильной форме) и ОН-радикалов. Для снижения концентрации растворенного мышьяка при сохранении остаточного активного кислорода, интенсифицирующего последующее бактериальное окисление, содержание твердого в активированной пульпе доводилась до Ж:Т = 5:1. В твердой фазе пульпы существенно повышалось содержание элементной серы (более чем в 3 раза) и сульфатов (почти на порядок).

Предварительно окисленную фотоэлектрохимическим способом пульпу подвергали второй, основной стадии окисления – биоокислению в лабораторном реакторе. Основу биомассы составили штаммы бактерий Tiobacillus Ferrooxidans и Tiobacillus Tiooxidans. Наличие элементной серы после предварительного окисления повысило интенсивность биоокисления.

Оценка эффективности предложенной технологии проводилась путем сравнения содержания золота, остающегося в хвостах, по схеме двухстадийного комбинированного окисления и контрольной схеме, предусматривающей только биоокисление.

В экспериментальном варианте концентрация золота в хвостах составила 1,7 г/т, в контрольном (только биоокисление) – 5 г/т, прирост извлечения – 23 %.

После комбинированного окисления осуществляют двухстадийное сорбционное выщелачивание по предложенной технологии.

Данная технология была разработана для переработки упорных руд, содержащих дисперсное золото, примеси которого активно реагируют с цианидами, и сорбционно активные минеральные компоненты.

Результаты экспериментальных исследований приведены на Рис.1-4.

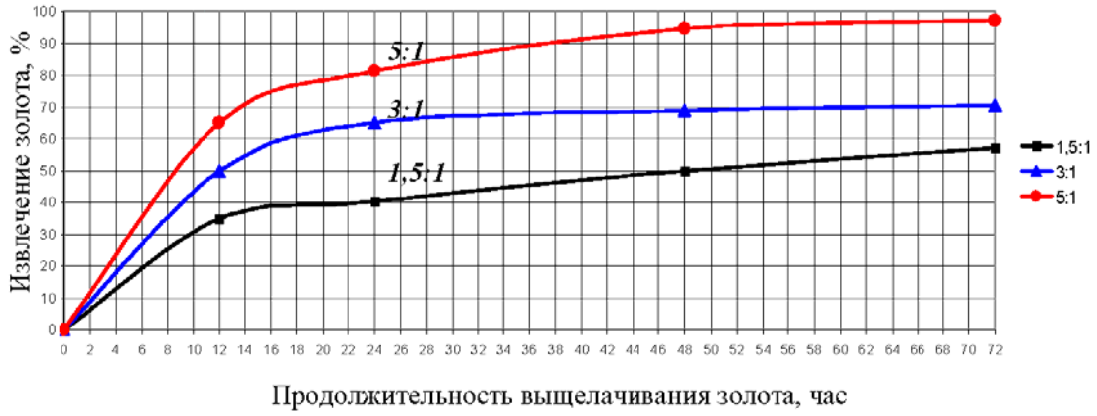


Рис. 1. Зависимость извлечения золота в процессе цианирования от плотности пульпы: 1 – Ж.:Т=1,5:1; 2 – Ж.:Т=3:7; 3 – Ж:Т=5:1

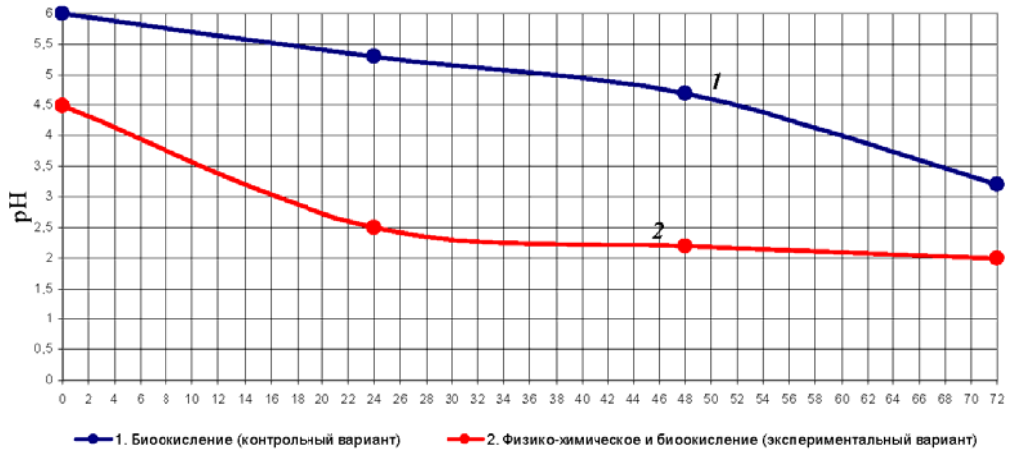


Рис. 2. Влияние физико-химического окисления на интенсивность кислотообразования в системе выщелачивания

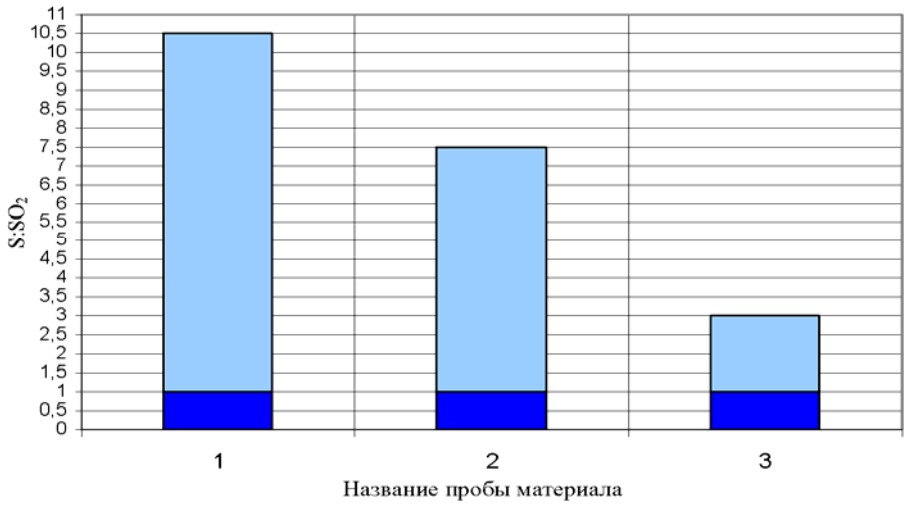


Рис. 3. Соотношение неокисленной и окисленной форм серы ($S:SO_2$): 1 – в исходной руде (9,5:1); 2 – после физико-химического окисления (6,5:1); 3 – после физико-химического и биоокисления (2,0:1).

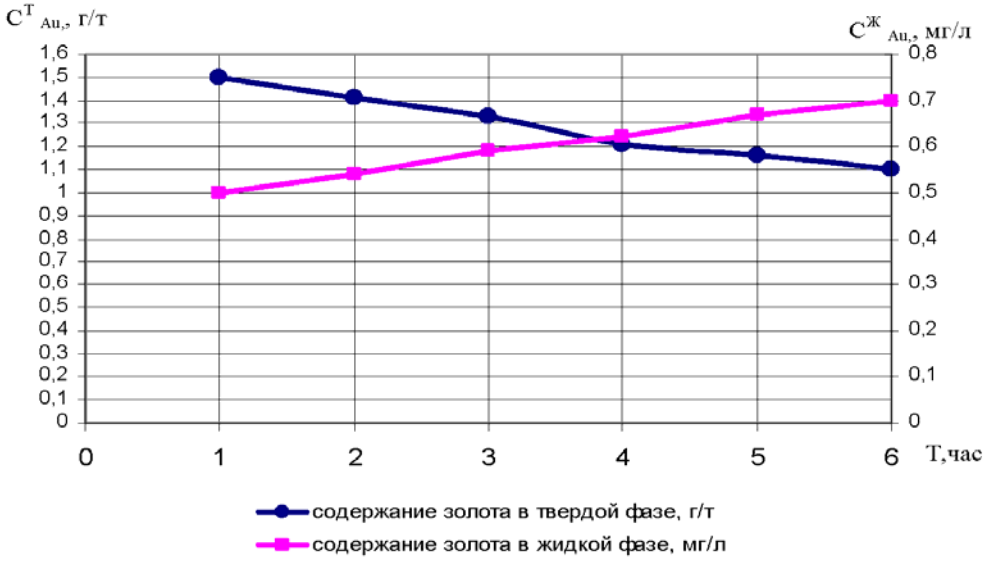


Рис. 4. Зависимость содержания золота в жидкой и твердой фазе от продолжительности предварительного цианирования

В отличие от традиционной технологии «уголь в пульпе», когда сорбент перемещается против хода движения пульпы, т.е. по градиенту содержания растворенного золота, предлагаемая технология двухстадийной сорбции предполагает первоначальный ввод сорбента по ходу движения пульпы (сорбент специально подготовлен и активно участвует в процессе локального цианирования) и последующий ввод основной части сорбента против хода движения смолы.

Лабораторными исследованиями и полупромышленными испытаниями комбинированной схемы окисления сочетающей физико-химическое и бактериальное вскрытие минеральной матрицы и последующего электроактивационного выщелачивания дисперсного золота из сульфидных руд и концентратов показано, что для повышения эффективности извлечения указанного золота, необходимо обеспечить глубину процессов окислительной подготовки пульпы, локального (пленочнофазного) цианирования и двухстадийной сорбции золота.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. П.р. по заявке № 2007145306/02 (049635) от 06.12.2007. Способ подготовки упорных сульфидных руд и концентратов к выщелачиванию.

Секисов А.Г., Резник Ю.Н., Шумилова Л.В., Зыков Н.В., Лавров А.Ю., Королев В.С., Конарева Т.Г.
2. Патент № 2350665 Российской Федерации, МПК C22B 3/18 (2006.01), C22B 11/08 (2006.01), Способ кюветного выщелачивания металлов из минеральной массы. Секисов А.Г., Резник Ю.Н., Зыков Н.В., Шумилова Л.В., Лавров А.Ю., Манзырев Д.В., Климов С.С., Королев В.С., Конарева Т.Г., Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Забайкальский горный колледж, № 2007118333, заяв. 16.05.2007; опубл. 27.03.2009, Бюл. № 9. – 4 с.
3. Секисов А.Г. Дисперсное золото. Геологические и технологические аспекты. / А.Г. Секисов. Н.В. Зыков. В.С. Королев. – Чита: ЧитГУ, 2007.-С. 269.

Логунов А.С. УДК 629.118.74

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ВИБРОЗАЩИТНОЙ СИСТЕМЫ

Забайкальский край обладает значительными запасами рудного и россыпного золота, природные и техногенные источники которого характеризуются рядом минералого-

Введение управляемых пневматических устройств или пневматических приводов в исходную (пассивную) систему изменяет ее свойства и требует построения математических моделей для оценки возможностей, привносимых тем или иным законом управления динамическим состоянием. В общем случае дополнительная связь, реализующая закон управления, представляет собой последовательное соединение звеньев, составляющих цепь. В первую очередь речь идет об измерительных устройствах, преобразователях, усилителях, корректирующих звеньях, исполнительных механизмов. В [1, 2] были рассмотрены новные положения создания пневматической виброзащитной системы (ВЗС) такие как: структурное моделирование пневматических систем, линеаризация математических моделей пневматических виброзащитных систем (ПВЗС), особенности переходных процессов. С целью их практической проверки на базе Иркутского государственного технического университета (ИрГТУ) была собрана экспериментальная ПВЗС, схема работы которой полностью отвечает унифицированной схеме, приведенной на рис. 1.

Объект защиты и источник внешних возмущений связаны между собой посредством пружины и исполнительного механизма активной цепи системы. Исполнительный механизм в экспери-

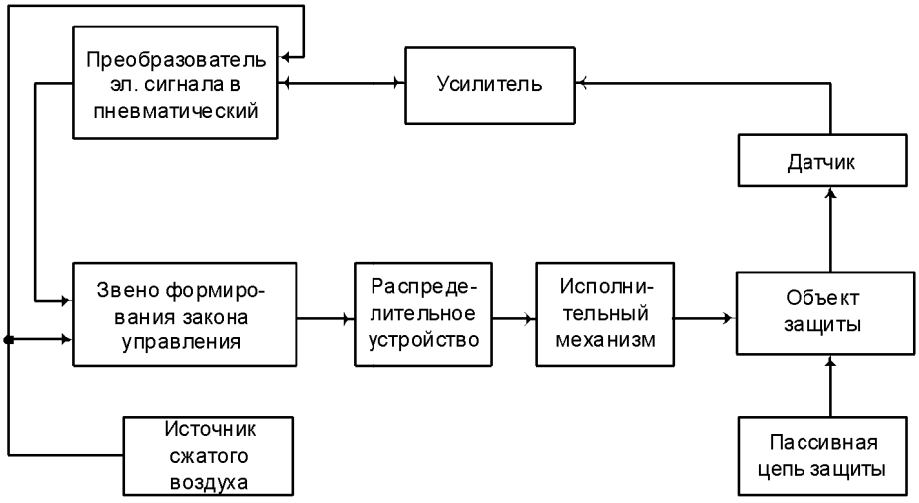


Рис. 1. Унифицированная схема активной пневматической ВЗС

ментальной установке представляет собой бранную камеру с односторонним подводом воздуха. Управление активной цепью системы производится по абсолютному отклонению объекта защиты в соответствии с сигналом, поступающим от тензодатчика. Закон управления пневматической ВЗС формируется в блоках аналоговой ЭВМРеализация рассмотренных в [1] видов закона управления осуществлялась в соответствии со схемами набора решающих усилителей. Обработанный в ЭВМ электрический непрерывный сигнал преобразовывался в пневматический в диапазоне от *19,6-98,1 кПа* в электропневмопреобразователе ЭПП-180. Действие прибора основано на пропорциональном преобразовании тока в усилие при помощи пневматического усилителя. ЭПП-180 включает электромеханический преобразователь, состоящий из совокупности магнитоэлектрического механизма, рычажной системы и пневматического усилителя. Связывающими звеньями блоков является переменный дроссель «сопло-заслонка», задающий определенное давление на входе усилителя в зависимости от положения расчетной системы и сильфон отрицательной обратной связи, компенсирующей усилия, приложенные к рычажной системе и препятствующие ее перемещению (рис. 2).

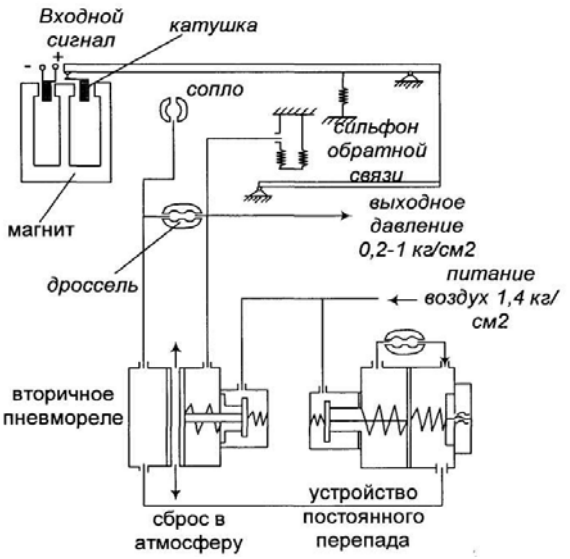


Рис. 2. Принципиальная схема преобразования сигналов

Структурная схема, представленная на рис.3 отражает работу распределительного устройства передаточной функцией

$$W_{рег}(p) = \frac{K_{рег}}{T_{рег}p + 1} \qquad (1)$$

Структурная схема ЭПП-180 может быть приведена в виде, показанном на рис. 4. Передаточная функция магнитоэлектрического привода при учете того, что предельная рабочая частота преобразователя не превышает нескольких герц, с достаточной точностью может быть представлена звеном нулевого порядка. Рычажная система преобразователя описывается передаточной функцией $W_2(p) = k_2$.

Как указано выше, сигнал перед выходом из ЭПП усиливается в пнев-моусилителе, имеющем $W_4(p) = k_4$. В качестве силового элемента обратной связи в ЭПП установлен сильфон, имеющий при небольших перемещениях линейную зависимость выхода в функции входного сигнала $W_5(p) = к_5$.

Непосредственно чувствительным органом в преобразователе является пара «сопло-заслонка», изменение сопротивления в которой в результате внешнего воздействия, обусловливает изменение давления в междроссельной проточной камере. Передаточная функция проточного элемента, регулируемого «сопло - заслонкой» имеет вид [3]

$$W_3(p) = \frac{K_y}{Tp + 1}, \qquad (2)$$

где K_y - коэффициент усиления, $T = \frac{V_n}{R\theta(\alpha_1 + \alpha_2)}$ - постоянная времени, V_n - объем проточной камеры, R - газовая постоянная, θ - абсолютная температура, α_1, α_2 - коэффициенты расхода дросселей.

Таким образом, в выражении (2) коэффициент усиления ЭПП равен

$$K_{рег} = \frac{K_1K_2K_3K_4}{K_2K_3K_y + 1}, \qquad (3)$$

а постоянная времени –

$$T_{рег} = \frac{T}{K_1K_2K_y + 1}. \qquad (4)$$

С помощью ударного и вибрационного стендов, с рабочими частотами - *0,05 ÷ 10* Гц, проводились исследования экспериментальной ПВЗС в установившемся и переходном режимах. Амплитудно-частотные характеристики, представленные на рис. 5, сняты с экрана двухлучевого осциллографа ЭП-8. Переходной процесс записан с помощью шлейфового осциллографа и приведен на рис. 6

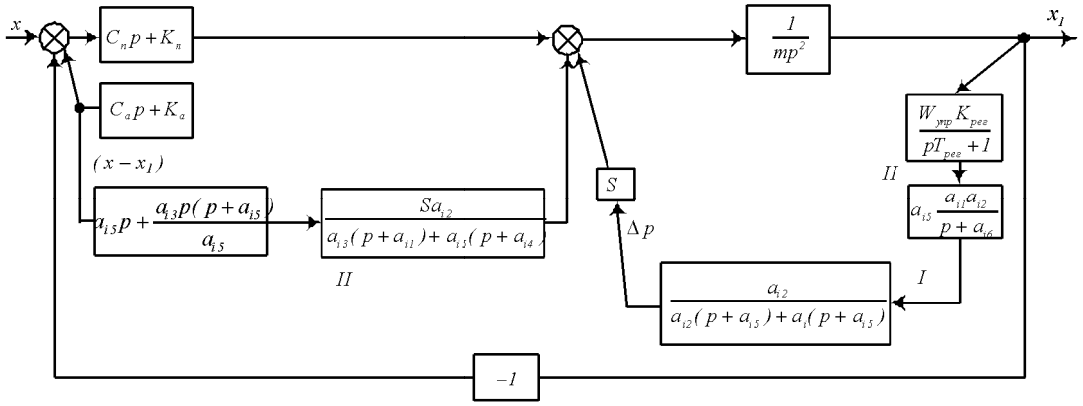


Рис. 3. Структурная схема ПВЗС, соответствующая управлению по относительному (II) и абсолютному (I) отклонениям

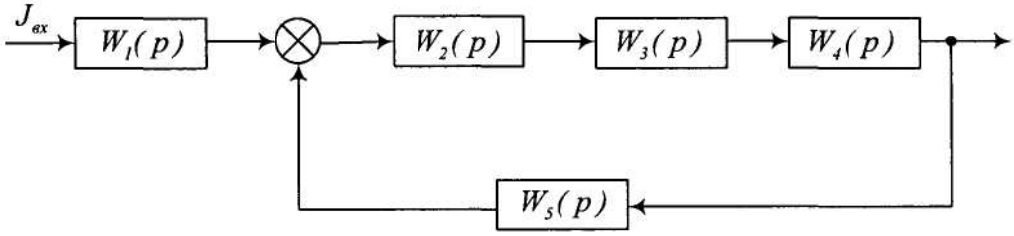


Рис. 4 Структурная схема ЭПП-180

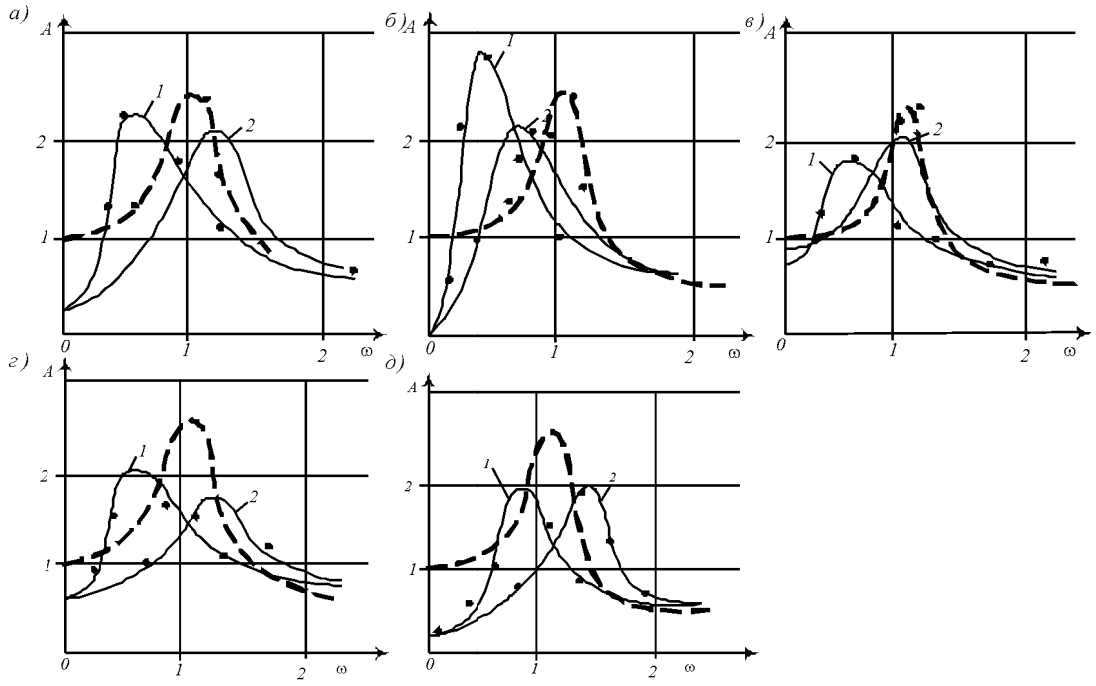


Рис. 5 Амплитудно-частотные характеристики ПВЗС:а) пропорциональное управление – кривая 1 - $K = 1$, **2 -** $K = 10$ **;б) интегральное управление – кривая 1 -** $T = 50$, **2 -** $T = 0,5$ **;в) дифференциальное управление – кривая 1 -** $T = 0,1$, **2 -** $T = 10$ **;г) апериодическое управление – кривая 1 -** $K = 1$, $T = 0,1$, **2 -** $K = 10$, $T = 0,1$ **;д) управление общего вида – кривая 1 -** $K = 1$, $T = 0,5$, **2 -** $K = 10$, $T = 0,5$.

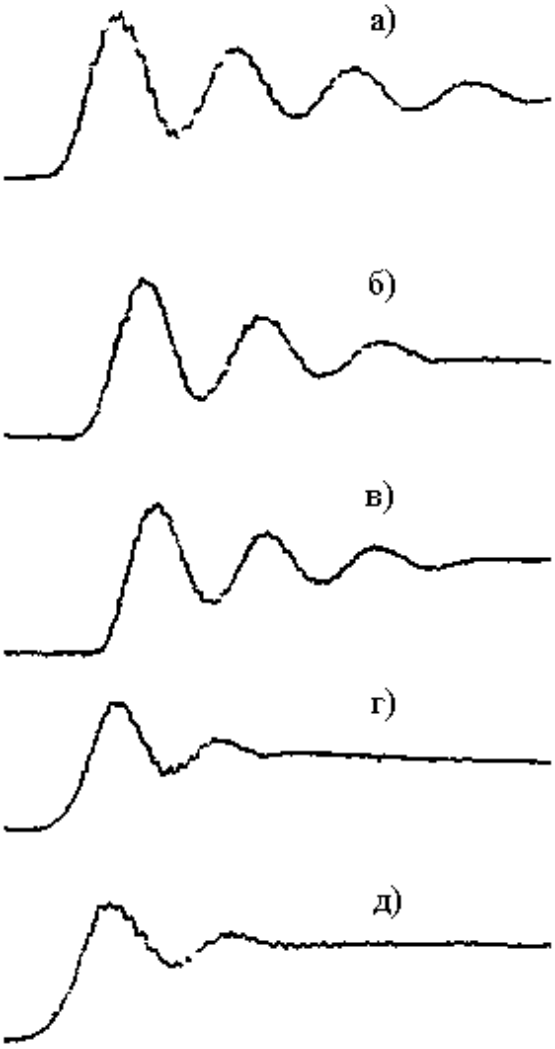


Рис. 6 Экспериментальные кривые переходных процессов: а) пассивная система; б) пропорциональное управление $d_0 = 10$, $e_0 = 1$; в) дифференциальное управление $e_0 = 0,1$, $d_1 = 1$; г) апериодическое управление $d_0 = 10$, $e_1 = 0,5$; д) дифференциальное управление общего вида $d_1 = 10$, $e_1 = 0,5$.

Анализ амплитудно-частотных характеристик и переходных процессов показывает, что данная экспериментальная ПВЗС имеет небольшое быстродействие, определяемое свойствами рабочей среды активной части системы -воздуха, динамикой преобразователя, запаздыванием, обусловленным небольшим диаметром трубопроводов коммуникационной связи, инерционностью мембранного ИМ.

При исследовании системы в установившемся режиме эффективной для ПВЗС области частот оказывается, что

- интегральный закон дает выигрыш по сравнению с пассивной системой в очень узком диапазоне частот - до *0,08 -1* Гц;

- пропорциональный закон обеспечивает преимущество в коэффициенте передачи - до *0,5-0,6*Гц - наблюдается практически полная стабилизация;

- дифференциальное управление не дает ощутимых преимуществ в сравнении с пассивной системой;

- управление апериодическое оказывается более выгодным по сравнению с пассивной системой до частот *0,4-0,7* Гц;

- дифференциальный закон общего вида позволяет получить в области низких частот наилучшие результаты, так до частоты *0,4* Гц возможна полная стабилизация объекта и до частот *0,5-0,9 Гц* АЧХ активной системы имеет меньшие значения, чем в пассивной.

В целом, в указанной области частот экспериментальные исследования подтвердили теоретические выводы относительно влияния законов управления на изменение коэффициента передачи и величину зоны эффективности.

При одиночном импульсном воздействии исследуемая ПВЗС характеризуется переходным процессом, показатели качества которого приведены в таблице 1.

Таблица 1

Показатели качества переходного процесса

Система виброзащиты		Перерегулирование в %	Вр. затухания t	A_{max}	Декр. затухания
пассивная		70	1	1	0,73
активная	Управление				
	Пропорциональное $K = 1$	70	0,7	0,95	0,54
	Дифференциальное $T = 0,1$	55	0,55	0,65	0,54
	Апериодическое $K = 10$, $T = 0,5$	40	0,36	0,62	0,50
	Дифференциальное общего вида $K = 10$, $T = 0,5$	40	0,4	0,6	0,40

АЧХ разомкнутой системы снималось при разорванной обратной связи; внешнее воздейст-

вие вводилось в систему от генератора синусоидальных колебаний.

Собственная частота разомкнутой системы составляет величину порядка 0,2 Гц, а замкнутой при пропорциональном управлении 0,75 Гц.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Логунов, А.С. Структурное моделирование пневматических систем в задачах вибрационной защиты объектов. Обобщенные подходы/ А.С. Логунов// Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2008. – Вып. № 4(20). – С.82-89
2. Елисеев, С.В. Особенности переходных процессов в пневматических виброзащитных системах/ С.В. Елисеев, А.С. Логунов// Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2009. – Вып. № 1(21). – С.8-15
3. Елисеев, С.В. К динамике элементов активной пневматической виброзащитной системы/ С.В. Елисеев, П.А. Лонцих// Вибрационная защита и надежность приборов и механизмов: сб. ст. – Иркутск: ИрГТУ, 1998. – С.42-51

Дамбаев Ж. Г., Егодуров Г. С., Гришко Д. В. УДК 624.042:539.4

К ОПТИМАЛЬНОМУ ПРОЕКТИРОВАНИЮ СИСТЕМ ПОДРЕССОРИВАНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ

Одним из важнейших элементов любой транспортной системы, определяющим её динамические качества, является система подрессоривания - подвеска; от того, как она спроектирована, существенным образом зависят проходимость, устойчивость, надежность работы и скорость транспортной машины, а также сохранность перевозимых грузов и самочувствие находящихся в ней людей. Поэтому вопрос создания рациональной подвески относится к числу важнейших проблем транспортного машиностроения.

Проведенный анализ литературы позволил сделать вывод, что возможности создания надежной системы подрессоривания не исчерпаны. При помощи направленного использования нелинейных эффектов может быть значительно улучшено качество защиты транспортной системы от внешних воздействий. Однако возможности существенно нелинейных систем подрессоривания, процессы, протекающие в таких системах, изучены еще недостаточно детально.

Рассмотрим математическую модель движения гусеничного транспортного средства (рис.1), подверженного внешнему случайному кинематическому воздействию.

На рис.1 обозначены: M - подрессоренная масса; c - приведенные жесткости рессор; μ - коэффициент вязкого сопротивления мортизаторов; $U_к$ – вертикальное перемещение катка относительно корпуса машины; l_i - расстояния от центра колеса до поперечной плоскости, проходящей через ц.т. машины; v - скорость движения .

Для решения задачи примем следующие значения:

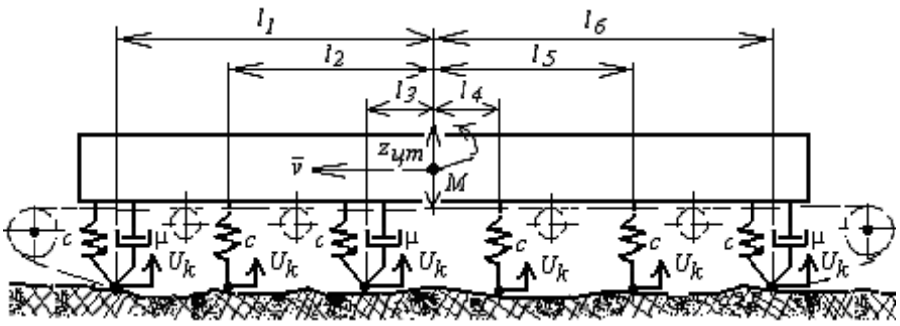


Рис.1. Расчетная колебательная схема транспортного средства

1) корпус машины - жесткое тело, т.е. его деформациями пренебрегаем;
2) проекция скорости движения центра тяжести машины на направление движения – постоянная величина;
3) реакция грунта в продольном и поперечном направлениях отсутствуют;
4) неуравновешенность и гироскопические моменты вращающихся масс трансмиссии и двигателя равны нулю;
5) контакт катка с гусеницей точечный.

Профиль дороги рассматривался как стационарный нормальный случайный эргодический процесс с корреляционной функцией [1]

$$K(\tau) = \sigma_0^2 e^{-\alpha|\tau|}(\cos(\beta\tau) + \frac{\alpha}{\beta}\sin(\beta\,|\,\tau\,|)), \qquad (1)$$

где $\sigma_0^2, \alpha, \beta$ - параметры, зависящие от типа дороги и ее состояния. Реализации процесса под обеими гусеницами считались различными.

По данным приведенным в работе А.А. Силаева, сила упругого сопротивления рессор может быть представлена выражением.

$$P(U) = C(U + \gamma U^m), \qquad (2)$$

где С – жесткость рессоры; U – перемещение катка относительно корпуса машины; $\gamma -$ параметр нелинейности; m – целое число (m=1,2,3), а сила вязкого сопротивления амортизатора – зависимость вида:

$$P(\dot{U}) = \mu \dot{U}^i, \qquad (3)$$

где μ - коэффициент вязкого сопротивления; $\dot{U}$ - относительная скорость перемещения катка; i-целое число (i = 1,3).

При помощи уравнения Лагранжа 2-го рода

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j}\right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} = Q_j, \qquad (4)$$

получим систему дифференциальных уравнений движения транспортной машины. При этом кинетическая энергия системы

$$T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4, \qquad (5)$$

где T_1 - кинетическая энергия корпуса машины; T_2 - кинетическая энергия гусениц; T_3 - кинетическая энергия деталей двигателя; T_4 - кинетическая энергия катков.

После преобразований система уравнений движения приводится к виду [1,2]:

$$\left.\begin{aligned}
\ddot{Z} &= \sum_{j=1}^{2n}\left[b_{11j}\left(U_j + U_j^m \cdot \gamma\right) + b_{12j}\dot{U}_j^i\right] - b_{13}P_{в.к.},\\
\ddot{\phi} &= \sum_{j=1}^{2n}\left[b_{21j}\left(U_j + \gamma \cdot U_j^m\right) + b_{22j}\dot{U}_j^i\right] - b_{23}P_{в.к.},\\
\ddot{\upsilon} &= \sum_{j=1}^{2n}\left[b_{31j}\left(U_j + \gamma \cdot U_j^m\right) + b_{32j}\dot{U}_j^i\right] - b_{23}P_{в.к.},
\end{aligned}\right\} \qquad (6)$$

где $b_{13}, b_{23}, b_{23}, b_{kj}$ - коэффициенты; n - число катков одного борта; $P_{в.к.}$ - сила тяги на ведущем колесе.

На основании (6) с использованием методов статистического моделирования составлена программа, позволяющая моделировать движение гусеничного транспортного средства по дороге со случайным профилем. Результаты, полученные с помощью натурного эксперимента и путем численного моделирования, приведены на рис.2. Натурные испытания проводились на полигонной трассе с известными спектральными характеристиками. Характеристики исследуемой машины

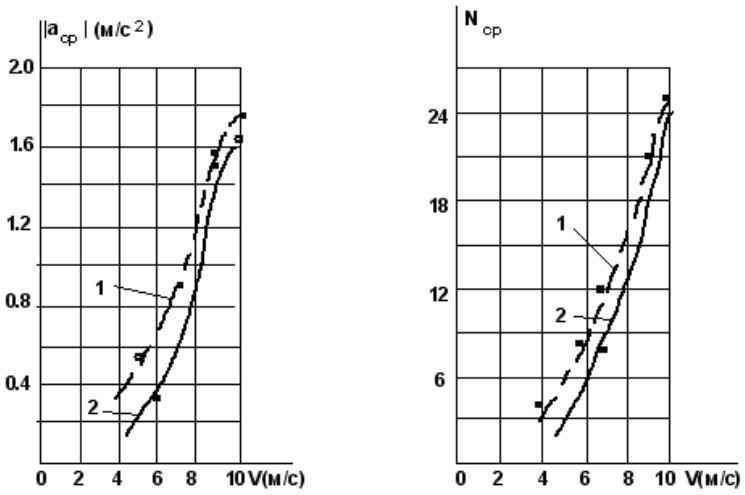


Рис. 2. Зависимость среднего ускорения на месте водителя (а) и среднего числа выбросов (б) от скорости движения машины: 1 - моделирование; 2 - эксперимент

имели следующие значения:

$$G_0 = 42 \cdot 10^4\, H; J_{ou} = 1,6 \cdot 10^5\, Нмс^2;$$
$$J_{ox} = 9 \cdot 10^4\, Нмс^2; n = 6; C = 24 \cdot 10^4\, H/м;$$
$$\mu = 36 \cdot 10^4\, Нс^3/м^3; m = 1; i = 3,$$

где G_0 - вес машины; J_{ou}, J_{ox} - моменты инерции корпуса.

Транспортная машина считалась симметричной. Амортизаторы расположены вдоль борта на 1, 3, 6 катках.

На рис.2,а представлены зависимости среднего ускорения на месте водителя от скорости движения машин, а на рис.1,б- зависимости среднего числа выбросов (выход параметров качества системы за допустимые границы) от скорости движения.

Определим оптимальные параметры системы подрессоривания гусеничного транспортного средства в зависимости от скорости движения и от дорожных условий [1]. Оптимизация параметров проведена по критерию максимума надежности, согласно которому за заданное время функционирования вероятность безотказной работы системы должна быть максимальной:

$$R(T^*) \to \max, \qquad (7)$$

где $R(t)$ - функция надёжности; T^* - заданное время функционирования системы.

Предположим далее, что процессы на выходе системы близки к нормальным, т.е. воспользуемся гипотезой квазинормальности сформулированной М,Д. Миллионщиковым. Будем также считать, что для правильно спроектированной системы подрессоривания выброс параметров качества из допустимой области пространства качества – явление достаточно редкое. В этом случае, поскольку выходной процесс близок к нормальному и стационарен, критерий максимума надежности может быть заменен критерием минимума числа выбросов из допустимой области в единицу времени

$$V \to \min, \qquad (8)$$

где V – интенсивность отказов.

Для систем гауссовского типа в случае отказа n - мерного качества формула для нахождения верхней границы интенсивности отказов имеет вид:

$$v \le \sum_{k=1}^{n} \frac{\omega_k}{2\pi} \left\{ \exp\left[-\frac{(\upsilon_k^* - a_k)^2}{2\sigma_k^2} \right] + \exp\left[-\frac{(\upsilon_k^{**} - a_k)^2}{2\sigma_k^2} \right] \right\}, \qquad (9)$$

где ω_k - эффективные частоты векторного процесса $\vec{\upsilon}(t)$; a_k - математические ожидания компонент процесса $\vec{\upsilon}(t)$; σ_k^2 - дисперсии компонент процесса $\vec{\upsilon}(t)$; $\upsilon_k^*, \upsilon_k^{**}$ - ограничения сверху и снизу, наложенные на компоненты процессы $\upsilon(t)$.

При этом случае, когда выбросы – редкие события, оценка сверху близка к истинной.

Таким образом, имеем классическую задачу многопараметрической оптимизации, в которой в качестве целевой функции, которая должна соответствовать минимуму, выступает интенсивность отказов V. Для решения этой задачи использовались численные методы, основанные на соответствующих алгоритмах отыскания минимума функции многих переменных. При этом значения a_k, σ_k, ω_k находятся непосредственно в процессе решения задачи оптимизации из системы уравнений (6) при помощи спектральных методов.

Результаты решения задачи оптимизации конструктивных параметров системы подрессоривания гусеничной транспортной машины с характеристиками, приведенными ранее, показаны на рис.3.

В рассматриваемом случае введены безразмерные переменные:

$$H^* = \frac{H_{cm}}{H_{cm.on.}}; N^* = \frac{N_{cp}}{N_{cp.on.}}; a^* = \frac{a_{cp.}}{a_{cp.on.}};$$
$$C^* = \frac{c}{c_{on.}}; \mu^* = \frac{\mu_{cp.}}{\mu_{cp.on.}}.$$

При этом значения найденных оптимальных конструктивных параметров системы подрессоривания и соответствующих им параметров качества равны [1]:

$$C_{on} = 6,8 \cdot 10^5\, H/м; \mu_{cp.on.} = 6,12 Нс^3/м^3;$$
$$a_{cp.on.} = 1,69 м/с^2; N_{cp.on.} = 16; H_{cm.on.} = 0,06 м.$$

где $H_{cm.}$ - статический ход катка; a_{cp} - среднее ускорение на месте водителя; c - средний коэффициент жесткости рессор; μ_{cp} - средний коэффициент демпфирования амортизаторов; N_{cp} - среднее число выбросов из пространства качества за время испытания.

Исследуем стохастическую устойчивость стационарного решения, соответствующего найденным конструктивным параметрам системы подрессоривания, относительно совокупности мо-

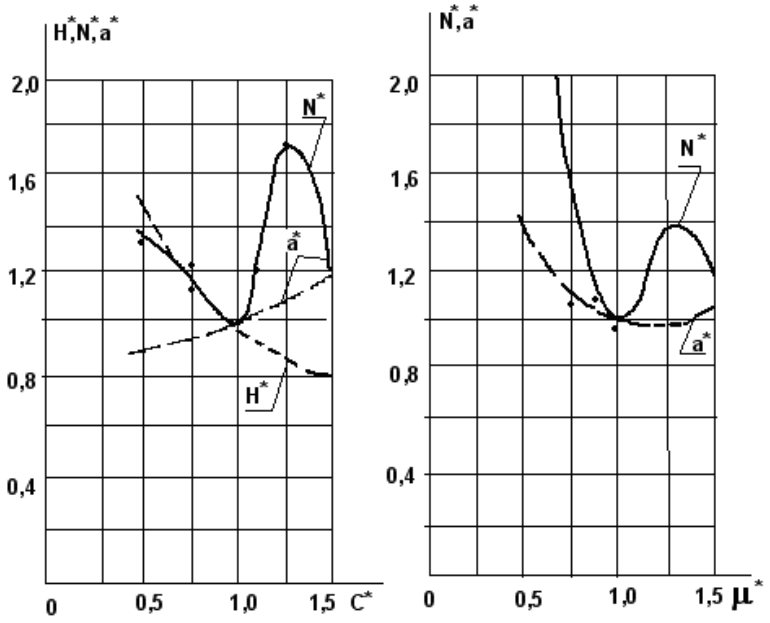


Рис. 3. Результаты решения задачи оптимизации

ментных функций. Это необходимо из-за возможности появления неустойчивых решений, поскольку исследуемая система является нелинейной [1, 2].

Для суждения об устойчивости стационарного решения была получена система дифференциальных уравнений в возмущениях, которая в векторно-матричной форме имеет вид:

$$\ddot{q}(t) + f_1 \cdot \dot{q}(t) + f_2 \cdot q(t) = 0, \qquad (10)$$

где $q(t) = \{q_1 ... q_n\}^T$ - вектор-функция возмущений; f_1, f_2 - матрицы размерностью n x n, компоненты которых зависят от статистических характеристик исследуемого стационарного решения.

Система (10) совместно с системой (6) образуют систему марковского типа в расширенном пространстве фазовых переменных. Дифференциальные уравнения относительно моментных функций могут быть получены из нее либо при помощи правила дифференцирования Ито и операции осреднения, либо при помощи прямого уравнения Колмогорова. После замыкания полученной бесконечной связанной системы дифференциальных уравнений на уровне моментов второго порядка при помощи гипотезы квазигауссовости и линеаризации ее около тривиального решения, приходим к системе:

$$\frac{dm_1^{ч}}{dt} = Hm_1^{ч}, \qquad (11)$$

где $ч = 2$ – уровень замыкания; $m_1^{ч}$ - вектор моментов, составленный из моментных функций до порядка $ч$ включительно; H – числовая матрица.

Если для этой системы выполняются условия теоремы Ляпунова об устойчивости по первому приближению, то тривиальное решение исходной системы устойчиво.

Для суждения об устойчивости использовался численный метод, основанный на критерии устойчивости Зубова, в основе которого лежит отображение левой полуплоскости характеристик показателей на внутренность единичного круга. Критерий реализуется путем возведения матрицы R в высокие степени:

$$R = (H - T)^{-1}(H + E), \qquad (12)$$

где H – числовая матрица из (11).

После исследования устойчивости стационарного решения принимается окончательное решение о целесообразности применения соответствующих этому решению конструктивных параметров.

На рис.4 приведены кривые изменения некоторых основных параметров качества для оптимизированной и неоптимизированной системы подрессоривания.

Из рисунков видно, что величина среднего ускорения на месте водителя в обоих случаях находится в допустимых пределах (менее 3м/с^2), а среднее количество выбросов за время испытания в оптимизированной системе значительно меньше,

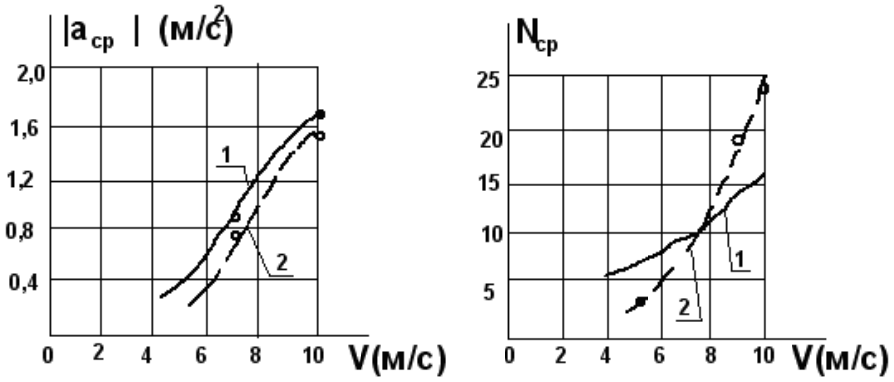


Рис.4. Изменение исходных основных параметров качества: 1-оптимизированная подвеска; 2-Реальная подвеска

чем в неоптимизированной (в неоптимизированной системе количество выбросов при скорости 10м/с достигло допустимого предела).

Поскольку максимальная скорость движения транспортной системы в большинстве случаев бывает ограничена не тяговыми возможностями двигателя, а числом выбросов в системе, то существует реальная возможность ее увеличения без существенных конструктивных изменений за счет оптимизации конструктивных параметров системы подрессоривания применительно к характерным условиям эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Вафин Р.К., Егодуров Г.С. Расчет нелинейных систем подрессоривания при случайном кинематическом воздействии // Расчет облегченных элементов конструкций: Межвуз. сб. науч. тр. – Чита, 1993. с. 49-55.
2. Вафин Р.К., Дамбаев Ж .Г., Егодуров Г.С. и др. Динамика, прочность и живучесть элементов машиностроительных конструкций в задачах и примерах. – Улан-Удэ: Бурят. кн. изд-во, 1997. 286 с.

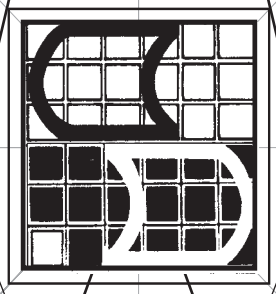
Министерство образования и науки Российской Федерации
Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта

Иркутский государственный университет путей сообщения
Иркутский научный центр СО РАН
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
Телекоммуникации и связь
Управление техническими системами
Информационные технологии

Полюшкин Ю.В. УДК 630

РАДИАЛЬНЫЙ ПРИРОСТ ДЕРЕВЬЕВ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ДИНАМИКИ ЭКОСИСТЕМ

Каждый класс экосистем определенного уровня организации и порядка пространственной размерности обладает структурной и функциональной спецификой обмена веществом, энергией и генетической информацией между слагающими эту экосистему компонентами. Иначе было бы невозможным их разграничение в пространстве и времени, терялся бы смысл их изучения, как объектов с выраженной целостностью.

Независимо от обмена потоками вещества, энергии, информации между смежными экосистемами одного ранга, каждая из них обладает территориальной и функциональной целостностью. Например, многие признаки экосистем тайги присущи только им; значительная доля потоков имеет циклический характер внутри экосистем; если рассматривать их в динамическом, а не эволюционном плане, то каждая экосистема имеет сравнительно постоянный потенциал вещества, энергии и генетической информации.

С учетом этой постоянной составляющей метаболизма логично допустить, что в экосистемах тайги, как и в любой физической системе, действуют законы, аналогичные законам физики (и прежде всего, закон сохранения вещества и энергии), осложненные биологическими закономерностями.

Вследствие этого для расчленения двух упомянутых начал объекты необходимо изучать во внешнем (абиотическом) и внутреннем (биологическом) аспектах.

Понятие динамики теряет смысл без категорий пространства и времени: функционирование экосистемы есть способ существования ее пространственной структуры во времени.

Наложение внутреннего (эндо-) и внешнего (экзо-) аспектов на пространственный (хоро-) и временной (хроно-) аспекты дает четыре новые категории: эндохорологическую, эндохронологическую, экзохронологическую и экзохорологическую составляющие изменчивости динамических признаков экосистемы. Нетрудно видеть, что ни пространство, ни время без внутренних или внешних свойств объекта не имеют определенности и любая построенная на этой основе классификация имеет лишь формальный смысл. Так, термин «хронографическая изменчивость», широко распространенный в биологической литературе, может быть в равной степени отнесен и к изменению во времени признаков биологического вида, и к динамике факторов внешней среды, т. е., с одной стороны, не является элементарной факторальной составляющей и, кроме того, сразу же требует уточнения: что именно рассматривается во временном аспекте - внешние (абиотические) или внутренние (биологические) компоненты экосистемы?

Упомянутые четыре составляющие взаимо дополнительны, элементарны (далее нерасчленимы), в основе каждой из них лежит факторальная обусловленность явления фенотипической изменчивости признаков вида или динамики объекта в целом. С таким подходом могут быть рассмотрены экосистемы любого ранга, уровня организации и размерности, будь то дерево с его местопроизрастанием, урочище или зона тайги в целом.

По отношению к таежным экосистемам четыре факторальные составляющие интерпретируются следующим образом.

1. Эндохорологическая показывает, какие внутренние потенциальные возможности имеет объект в смысле территориальной экспансии - будь то рост клетки, организма, размеры популяции или ареал вида. Составляющая вычленяется при анализе предельных значений изучаемого признака.

2. Эндохронологическая подразумевает влияние «внутреннего времени» биологического объекта - вклад биотических ритмов-суточных, сезонных, стадийных, возрастных в реальную изменчивость признака.

3. Экзохронологическая - наложенные на биологические ритмы пульсации внешних факторов, часто имеющие определенную периодичность. Нахождение степени синхронности колебаний факторов внешней среды и прироста позволяет судить о возможных причинах его снижения.

4. Экзохорологическая составляющая объединяет факторы внешнего пространства, медленно меняющиеся во времени – полнота древостоя, состав гумуса, дренаж при определенных уклонах и т.д.

Рассматривая динамические, а не эволюционные аспекты экосистем, допускаем, что каждому уровню организации и порядку размерности экосистем соответствует время, достаточное для выявления динамики. Так, динамика ценозов проявляется в сезонной и межгодовой изменчивости, динамика фаций - в периоды, соответствующие возрастным стадиям древостоя, динамике систем региональной размерности - не менее, чем за периоды, соизмеримые с продолжительностью жизни дерева (рис.1).

Любой биологический объект (организм, популяция, вид, сообщество) не может увеличивать свои размеры, массу, продукцию беспредельно. Существуют генетические, физиологические, популяционные механизмы обратной связи, стабилизирующие процессы роста. С достижением определенной высоты и диаметра дерева резко возрастают энергетические затраты на обеспечение физиологических функций – подъема почвенных растворов по стволу к листьям, транспирации и др. Виды, обладая специфичным физиологическим и анатомическим строением, имеют характерные для каждого из них пределы потенциально возможного роста отдельных организмов. Аналогичные соотношения существуют и для сообществ, где потенциальные величины фитомассы и продукции регулируются конкурентными отношениями в популяциях и ценозах.

Потенциальные возможности биологических компонентов в экосистемах реализуются лишь в исключительных случаях: максимальных размеров достигают единичные деревья из миллионов первоначально появившихся семян и всходов. Кроме прямой элиминации, особи и их совокупности в системе постоянно испытывают «давление» внешней среды, обеспечивающей, с одной стороны, их существование, а с другой - ограничивающей их рост (для деревьев это отклонения любых факторов от оптимума в пределах диапазона толерантности).

В каждом местоположении особи и ценоза степень минимизации и состав ограничивающих факторов специфичны. Семена сосны из одной шишки могут дать стволы высотой более 35 м на супесчаных почвах, а на верховом болоте максимальная высота перестойных деревьев не превышает 15 м. Пределы высоты и диаметра деревьев обусловлены соотношением свойств древесины, силой сцепления корней с почвой, весом и парусностью кроны с экстремальными характеристиками экотопа: наибольшая скорость ветра, максимальная снеговая нагрузка, минимальная доступность воды, кислорода и элементов почвенного

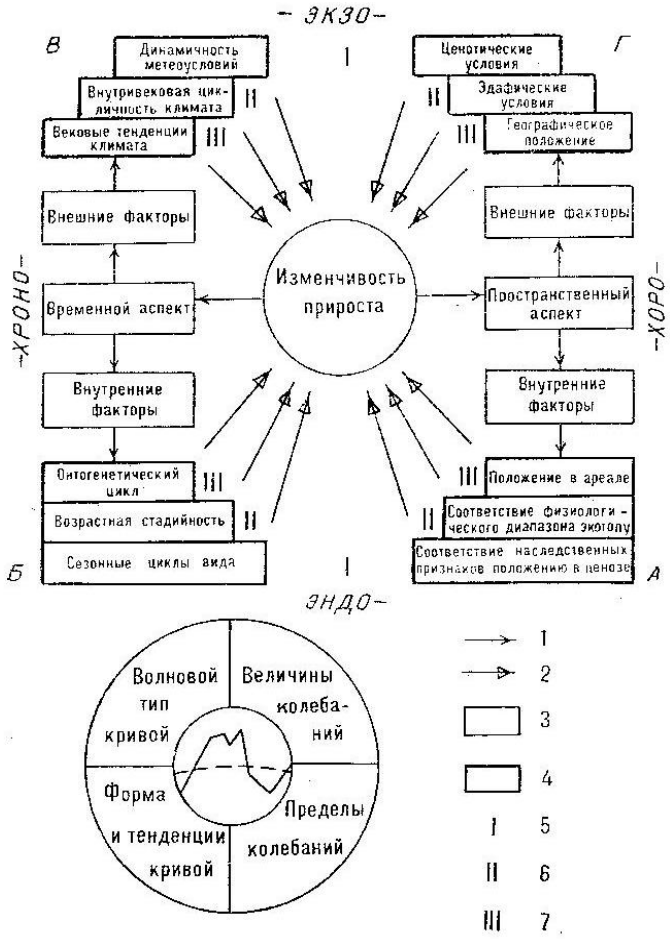


Рис. 1. Факторы внутривидовой изменчивости радиального прироста деревьев.
1- классификационные связи; 2 - факторальные связи; 3 - аспекты; 4 - составляющие изменчивости; 5 - ценотический; 6 - топологический; 7 - региональный порядок размерности экосистем; А - Г - последовательность анализа составляющих изменчивости прироста.

питания в определенные периоды и т.д.

Изложенные тривиальные соображения позволяют сформулировать следующие принципы:

1) лимит интеграла фенотипической изменчивости признака биологического вида в стационарных условиях динамики внешней среды есть величина постоянная;

2) максимальная амплитуда признака, продолжительность жизни и форма кривой онтогенеза, периодичность пульсации во времени, индицирующая отклонения факторов внешней среды от оптимума для вида, градиенты факторов среды в пространстве имеют выраженную топоспецифичность.

Принцип топоспецифичности можно сформулировать короче: факто-ральные составляющие фенотипической изменчивости признака, индицирующего динамику экосистемы, топоспецифичны.

Строго говоря, эти принципы не нуждаются в доказательствах и для экосистем стационарного типа (когда приход и расход вещества, энергии, информации сбалансированы) являются постулатами, отражающими законы термодинамики. Проиллюстрируем это примером. В благоприятных лесорастительных условиях дренируемого плакора дерево к концу жизни может достичь параметров, близких к максимальным для вида, допустим, в возрасте 200 лет. В смежном заболоченном экотопе замкнутого понижения его «сверстники» не достигают тех же размеров, ежегодный прирост их меньше, но продолжительность жизни может увеличиться, так как они позже вступают в противоречие с лимитирующими физическими факторами среды (ветер, снег и др.). Деревья, выросшие в тех же фоновых условиях климата, но в ложбине с повышенной влажностью и хорошим дренажем, напротив, раньше прочих достигают максимальных размеров и выпадают из полога уже в 100-150-летнем возрасте при шквальных ветрах.

Если индикационным признаком динамики экосистемы взят прирост по радиусу деревьев, то график его погодичных приращений характеризует изменчивость признака во времени. Сумма ежегодных приращений равна площади под кривой, объемлющей колебания графика, т. е. интегралу кривой. Во то же время сумма приращений за весь период жизни дерева - его диаметр. Если для каждой лесной экосистемы существует лимит по диаметру, то формулировка постулата 1 не должна вызывать сомнений даже по отношению к другим фенотипическим признакам экосистемы, которым также присущи ограничения.

Важнейшей характеристикой экосистемы является ее хорологическая протяженность, увеличивающаяся с возрастанием сложности и уровня организации. В первом приближении для классификации экосистем по их иерархической соподчиненности в пространстве может быть использована концепция размерности, предложенная для геосистем В. Б. Сочавой [18,19], поскольку локализация экосистемы определяется границами геосистем определенного ранга.

Мы попытались последовательно проследить изменчивость РПД в экосистемах увеличивающейся сложности и размерности, начиная с элементарных экосистем тина «особь-среда» и переходя к системам топологической (фация, урочище) и региональной размерности (подзона южной тайги). Это позволило использовать информацию, полученную при изучении объектов меньшей размерности, на более высоких ступенях анализа, что увеличивает достоверность окончательных выводов регионального плана.

Изменчивость радиального прироста деревьев (РПД) в экосистемах организменной и ценотической размерности может иметь в зависимости от цели самостоятельное значение, однако при изучении природных систем топологической размерности, с которыми имеет дело агроном, лесовод, строитель, эти составляющие чаще играют роль «шумов» и должны быть после рассмотрения элиминированы.

Изучение диапазонов варьирования признака на разных высотах дерева показало, что наиболее информативны спилы из нижней части ствола вне влияния корневой лапы (таблица 1). Частота преобладания южного радиуса оказалась наибольшей по сравнению с другими. Деревья, рас-

Таблица 1

Диапазон изменчивости ширины годичного кольца * (в мм) на разных относительных высотах по модельным деревьям пихты, ели, сосны

Высота спила	Елово-пихтовый с участием кедра, осины, березы; лес на плакоре				Сосняк разнотравный на гриве левобережья Иртыша	Сосняк кустарничково-сфагновый на первой террасе Иртыша
	Пихта		Ель		Сосна	
	I/153*	II/87	I/152	II/85	I/128	II/79
1,3 м	0,7-3,3	0,4-1,7	0,4-2,0	0,7-2,1	0,3-2,8	0,3-1,6
1/4 высоты дерева	0,5-1,5	0,5-1,5	0,7-2,2	0,7-1,4	0,6-4,5	0,3-1,6
1/2 высоты дерева	0,7-1,6	0,8-1,1	1,3-2,4	0,9-1,8	0,6-3,4	0,3-1,3
3/4 высоты дерева	1,1-1,9	0,9-1,9	1,3-1,8	1,0-1,5	1,1-2,8	0,3-1,3

* Величины осредненые по десятилетиям для пихты и ели, по пятилетиям для сосны.

Таблица 2

Диапазоны варьирования годичного прироста по радиусу пихты сибирской по спилам на высоте пня (5-10 см.)

Группа биогеоценозов по элементам рельефа		Число модельных деревьев пихты	Число замеров ширины годичного кольца	Диапазон варьирования годичного прироста, мм			
Обозначения	Местоположение			В биогеоценозах с полнотой			общий
				Меньше 0,9	от 0,9 до1,2	Больше 1,2	
А	Плакор	15	2951	0,70-4,3	0,30-3,0	0,25-2,7	0,25-4,3
Б	Приводораздельный склон	14	2850	0,10-4,4	0,60-4,4	0,15-3,2	0,10-4,4
В	Средняя часть склона	18	3725	0,10-3,9	0,25-4,4	-	0,10-4,4
Г	Нижняя часть склона	9	1966	0,10-5,4	0,05-4,6	0,10-4,0	0,05-5,4
Д	Старица	7	1010	0,20-5,4	0,10-4,4	-	0,10-5,4
Е	Останец	7	1036	0,05-2.7	0,10-4,3	0,20-3,4	0,05-4,3
Ж	Днище долины	6	1134	0,40-2,8	0,20-3,0	-	0,20-3,0
З	Надпойменные террасы	12	2288	0,05-5,0	0,05-4,4	0,15-2,8	0,05-5,0
	Общий диапазон			0,05-5,4	0,05-4,6	0,10-4,0	0,05-5,4

тущие на границах между биогеоценозами, имеют резкие различия прироста по радиусам разных направлений. Знание этих особенностей помогает при выборе моделей и высоты спила, сравнимого для всех объектов. Для элиминации составляющей «внутреннего ритма» сравнивались модели одной возрастной группы. Для элиминации составляющих внешнего аспекта деревья выбирались в пределах однородного участка.

Рассмотрены составляющие изменчивости в экосистемах ценотической размерности с учетом сделанных ранее методических ограничений. Приведены (таблица 2) диапазоны варьирования годичного прироста, ширины годичного кольца в биогеоценозах, сгруппированных по элементам рельефа. Знание эндохорологической составляющей позволяет выбрать ценозы, где максимально проявляются потенциальные возможности вида, т. е. кривая сезонного ритма прироста имеет самые высокие значения. В конечном счете знание эндохронологической составляющей необходимо для того, чтобы подбор факторов для сопоставлений с приростом осуществлялся на основе сведений о начале, конце и периоде наибольшей интенсивности отложений клеток внутри сезона.

Экзохронологическая составляющая в биогеоценозах нами специально не изучалась, так как на стационаре реализована фенологическая программа (Хомченко, 1975; и др.), выводы которой

учитывались при анализе взаимосвязей прироста и факторов среды.

Экзохорологическая составляющая элиминирована подбором сравнимых по полноте древостоев. Если же поставлена специальная задача вычленить эту составляющую в экосистемах ценотической размерности, то в сравнимых экологических условиях подбираются деревья одной возрастной группы, растущие в древостоях разной полноты.

Изменчивость прироста пихты в экосистемах топологического порядка размерности. Эндохорологическая составляющая. Сравнение пределов изменчивости прироста в конкретных топах с таковыми для региона имеют самостоятельное значение, если параллельно таким же образом сравниваются факторы среды. Так, диапазон варьирования снегозапасов на конец зимы на трансекте во всех случаях далек от граничных значений, поэтому непосредственно этот фактор не оказывает ограничивающего влияния на прирост. Это предположение подтвердилось при взаимном корреляционном анализе кривых за 20-летний период наблюдений.

Сопоставления по набору факторов показали, что полигон в целом находится в благоприятных условиях, однако конкретные фации представляют широкий спектр эдафических и гидроклиматических условий, и в каждом экотопе может появиться только часть полного диапазона изменчивости, обусловленная напряженностью тех факторов, которые именно в нем наиболее близки к граничным условиям.

Оказалось, что даже в экотопах, где отмечены наибольшие величины прироста, в отдельные годы он может уменьшаться до 7 и даже 1% от максимального у тех же моделей. Аналогично меняются во времени месячные осадки: наибольшие их величины могут в 20 раз превышать наименьшие. Изменчивость температур по годам значительно меньше, градиент их средних величин в подзоне не выражен, поэтому можно предположить ведущую роль факторов увлажненности в объяснении колебаний прироста во времени.

Пределы варьирования радиального прироста по количеству трахеид использованы в работе для упорядочения изучаемых топов по величинам прироста и параметрам (коэффициентам) формулы кривой соотношения прироста с диаметром деревьев. Эта зависимость специфична для биогеоценозов и единиц более высокого ранга (таблица 3).

Эндохронологическая составляющая обусловлена биологической кривой «большого периода роста», если бы внешние факторы были постоянными. Неодинаковые величины прироста на протяжении

Таблица 3

Вариабельность параметров зависимости прироста (Y) от диаметра (X): $:Y=aX - bX^2$

Местоположение биогеоценозов	Количество модельных деревьев	Диапазоны варьирования в пространстве			Ординация объектов по интенсивности прироста	
		max количества трахеид в слое 1971 г.	удельного прироста, трахеид/дм	приращения, трахеид/дм	I	II
А	30	22-60	$4\times\begin{cases}4\div12\\9\div20\\8\div28\\10\div26\\14\div21\\6\div17\\10\div23\\8\div34\end{cases}$	$4\times\begin{cases}1\div2\\2\div5\\2\div9\\2\div8\\3\div4\\1\div5\\3\div8\\2\div11\end{cases}$		1
Б	40	48-82			5	
В	40	43-88			7	
Г	20	44-83			6	
Д	15	70-100				3
Е	35	28-54				2
Ж	20	32-70				4
З	50	40-110			8	

жизни дерева обусловливают различную информативность участков кривой, соответствующих разным возрастным стадиям. Вычленить указанную составляющую можно методами скользящего или графического сглаживания (метод «коридоров» С. Г. Шиятова) [23], откорректировав высоту найденной кривой интегралом потенциально возможной кривой при известном предельном радиусе.

В нашем анализе оказалось достаточным не вычленять, а элиминировать эту составляющую, выбрав на реальных кривых наиболее информативные участки, совмещенные во времени со средневозрастной или приспевающей стадией роста и развития дерева и включающие полный магнитный цикл активности Солнца, в течение которого достаточно полно проявляется диапазон изменчивости гидроклиматических факторов.

Из всей совокупности моделей отобрано 50 за счет «отсеивания» старых, молодых, угнетенных, пораженных гнилью и с другими отклонениями от «нормы».

Для дальнейшего анализа выбран отрезок с 1951 по 1973 г., который отсекался на реальных кривых.

Экзохронологическая составляющая. Па каждой из 50 кривых прироста в пределах выбранного отрезка времени наблюдалось 3-5 выраженных понижений, причем во времени они совпадали далеко не всегда. Чтобы выявить годы с наибольшей частотой понижений прироста, с каждой кривой снято по 4 наибольших и наименьших значения, и отмечались годы, на которые они приходятся. Рассчитана средняя вероятность таких пульсаций и квадратические отклонения от средней. Отклонения, превышающие 2,580, считались неслучайными. Выраженные понижения прироста наблюдались в 1952-1954, 1961, 1966, 1973, более слабые - в 1958 и 1969-1970 гг.

Совмещенный графический анализ колебаний прироста с показателями осадков, стока, активности Солнца позволил сделать вывод о 5-летней периодичности этих колебаний. Однако прогнозная значимость этой закономерности невысока: реальная продолжительность этого периода колебалась в последнем двадцатилетии от 3 до 6 лет по факторам среды и от 3 до 7 лет по приросту.

Проведенный корреляционный анализ показал, что действие одних и тех же фоновых факторов оказалось различным в биогеоценозах поймы, склонов и водораздела. Вклад летних осадков оказался наиболее значимым на склонах, воздушной засухи - в низкополнотных биоценозах долины. Здесь отмечены наиболее высокие показатели взаимосвязи прироста с солнечной активностью.

Для древостоев полигона в целом ни один из взятых для анализа факторов не оказался ведущим. Вместе с тем совместное влияние группы факторов увлажненности территории во всех случаях дает однозначную положительную связь с приростом.

Более четко тем же методическим приемом выявлена 20-летняя периодичность, наблюдавшаяся в текущем столетии. Глубокие понижения прироста с высокой достоверностью совпадают с началом магнитных (двойных 11-летних) циклов активности Солнца. На основе методики прогнозов продолжительности солнечных циклов [2] дается прогноз глубоких понижений прирсста в конце 90-х годов текущего столетия и около 2020 года.

Экзохорологическая составляющая. После рассмотрения пределов, формы и временных пульсаций прироста можно более обоснованно судить о тенденциях величин прироста в пространстве, поскольку последовательно осуществлялся выбор моделей, отбор информативных участков на кривых прироста, «снятие» наибольших значений и сравнение по ним, а не только по усредненным величинам текущего прироста (таблица 4). Такой анализ дает четкое представление о двух геохорах в пределах изучаемого полигона, принципиально различающихся интенсивностью процессов метаболизма органического вещества на фоне различных гидротермических и эдафических условий [12]. Ведущим фактором, контролирующим величины прироста в благоприятных почвенных условиях, является режим влажности и аэрированности корнеобитаемого слоя, которые в свою очередь определяются рельефом и мехсоставом грунтов, т. е. условиями дренажа.

Изменчивость прироста хвойных сем. Pinaceae в экосистемах регионального порядка размерности изучалась с учетом информации и выводов, полученных при анализе топогеосистем.

Таблица 4

Максимальный годичный прирост пихты в средневозрастных и приспевающих древостоях полигона при сниженной полноте

местоположение биогеоценозов	полнота древостоя	Максимальные параметры деревьев в пределах элементов рельефа			Характеристика модельных деревьев				Годичный прирост		
		диаметр на высоте 1,3м, см	высота, м	возраст, лет	диаметр на высоте 1,3м, см	высота, м	возраст, лет	возраст, в котором наблюдался максимальный прирост, лет	текукущий за последние 13 лет, мм	max по одному из 4 радиусов за весь период жизни дерева, мм	
										I	II
А	0,6	57	33	181	32,0	21,0	94	73	2,3	4,2	
Б	0,9	52	30	160	30,0	19,0	98	44,71	2,0	4,2	
В	0,9	55	30	117	28,8	29,5	77	59	2,8	4,4	
Г	0,9	44	31	105	26,5	20,0	77	66,68	2,6		5,4
Д	0,6	51	26	81	31,5	21,0	81	57	2,1		5,4
Е	«Окно» при 1,3	47	28	160	29,0	19,5	109	88	1,5	4,4	
Ж	0,5	31	25	132	26,0	18,0	108	95	1,5		2,8
З	0,7	50	28	144	31,0	17,0	48	33	3,3		5,0

С увеличением размерности изучаемых экосистем становится очевидной недостаточность использования только одного вида для выявления наиболее существенных черт региона. Для этого следует выявить то общее, что присуще видам с различной экологией для характерных участков, представляющих системы региональной размерности.

Как и на предыдущих ступенях анализа, сравнивались предельные значения размеров для вида с таковыми для региона, параллельно -значения факторов климата в регионе и на границах ареалов. Один из выводов: в пространстве зон градиент увлажненности выражен слабее, чем градиент тепла. Именно последний фактор - причина снижения прироста с увеличением широты местности.

Совмещенный анализ 17 модельных деревьев пихты, ели, кедра и сосны подтвердил найденную ранее 20-22-летнюю периодичность и позволил выявить циклы продолжительностью около 40-45 и 80-90 лет. Выводы графических сопоставлений подтверждены применением спектрального анализа.

Для южнотаежной подзоны получены градиенты прироста в пространстве для участков, отвечающих понятию зонального типа растительности, по наибольшим величинам. Он снижается на 2,2 мм с каждым градусом увеличения широты местности.

Применение предложенной методической схемы [15,16] позволило организовать имеющийся материал полевых исследований и приемы его анализа, что повысило обоснованность региональных прогнозов [17]. Кроме того, упорядочение информации о приросте дало возможность увидеть новые стороны явления, сформулировать логические следствия такого подхода.

На основе изложенного эмпирического материала по пихте сибирской сформулирована гипотеза о взаимной компенсации составляющих изменчивости радиального прироста древостоев.

Оказалось, что увеличение амплитуд варьирования прироста, лимитов его во «внутреннем пространстве» (см. рис.1, *А)* сопряжено с более частыми его снижениями, т. е. с сокращением периодичности действия неблагоприятных факторов «внешнего вре-

мени» (В), и наоборот; уменьшение абсолютных величин прироста (Г), усредненных за весь период жизни дерева (за счет снижения градиентов постоянно действующих факторов «внешнего пространства»), компенсируется увеличением продолжительности жизни дерева (Б). Другими словами, *диаметрально противоположные составляющие фенотипической изменчивости* РПД (эндохорологическая и экзохорологическая) *взаимно компенсируются в пределах специфичного для данной экосистемы, лимита интеграла изменчивости признака* (в данном случае - максимального для экосистемы диаметра).

Эти соотношения можно записать следующим образом:

$$А \cdot В = C_1, \qquad Б \cdot Г = C_2$$

Поскольку все четыре составляющие - разные стороны одного объекта и явления, то в экосистеме стационарного типа должно выполняться вытекающее из приведенных формул соотношение

$$А \cdot В = const \cdot Б \cdot Г$$

где const - новая постоянная, зависящая от C_1 и C_2 и выражаемая эмпирическим коэффициентом через предельный диаметр. Абсолютная величина const зависит от принятых единиц измерения.

Экзохорологическая составляющая (Г) интерпретируется через градиенты внешней среды, т. е. потенциальные энергетические и материальные возможности создания продукции в экосистеме. Выявленную закономерность можно записать так:

$$Г = \frac{А \cdot В}{const \cdot Б}$$

При условии, что потенциальный запас энергии и вещества (Г) индицируется реальной продуктивностью, реализуясь в приросте (или урожайности), последняя формула означает, что продуктивность экосистемы определенного ранга и размерности при заданных условиях внешней среды прямо пропорционально произведению максимальной амплитуды признака на периодичность внешних ограничивающих влияний и обратно пропорционально продолжительности онтогенеза (гипотеза закона продуктивности экосистем).

Периодичность (длина периоды или «волны») между воздействиями неблагоприятных факторов – величина, обратная их частоте. Поэтому, продуктивность может быть рассчитана по пределам признака, продолжительности онтогенеза и частоте внешних влияний.

Зная принцип топоспецифичности, постулат лимита интеграла фенотипической изменчивости и закон взаимной компенсации диаметрально противоположных составляющих изменчивости в стационарных экосистемах, можно сознательно управлять процессами создания первичной продукции в них, заранее предвидя изменения одних характеристик при заданных параметрах среды за счет компенсационных эффектов по другим характеристикам. В зависимости от целевой установки в тех же условиях можно получать или высокопродуктивные, или длительно устойчивые насаждения; увеличив частоту неблагоприятных влияний (сокращение длины периодов между ними), мы способствуем элиминации части особей (и, напротив, при искусственной элиминации - рубке или частичной выборке урожая - частота неблагоприятных внешних влияний в ценозе увеличивается). За счет этого амплитуды варьирования прироста оставшихся особей возрастают, их продуктивность повышается, так как пространство каждой особи увеличивается, но при этом жизненный цикл - время - организмов за счет «интенсификации» режимов укорачивается пропорционально увеличению амплитуд признака.

Аналогичные соотношения, очевидно, можно проследить и на более высоких уровнях организации, в экосистемах: ценотической, топологической и региональной размерности.

Каким образом укладываются эмпирические данные по пихте сибирской в сформулированную закономерность?

Все без исключения особи верхнего яруса, устоявшие в борьбе за существование и не элиминировавшие из полога на ранних этапах онтогенеза, можно разбить на три типа:

1) стабильный прирост в течение всей жизни, низкие его величины, длительный период жизни, небольшие амплитуды коле-

баний, большая «длина волны» между минимумами прироста;

2) низкие величины прироста в начале и в конце жизненного цикла, резкое увеличение его в среднем возрасте, широкие амплитуды колебаний, увеличенная частота глубоких снижений прироста; жизненный цикл сокращается в 1,5-2 раза по сравнению с типом 1;

3) смешанный тип: дерево растет вначале по типу 1. при смене ценотической обстановки (рубка, выпадение соседних деревьев) переходит на режимы типа 2; максимальная продолжительность жизни колеблется между первыми двумя типами.

Таким образом, на уровне организма имеет место четкая компенсация диаметрально противоположных составляющих изменчивости, характеризуемых амплитудами и периодичностью колебаний, величинами прироста и продолжительностью жизни дерева.

В пределах каждого однородного по внешним абиотическим условиям среды участка (биогеоценоза) изменчивость прироста в пространстве и времени обусловлена плотностью окружения, выражаемой через полноту древостоя.

Эта закономерность четко прослеживается по данным таблицы 4. Во всех случаях, независимо от местоположения и топологической специфики биогеоценозов, диапазоны варьирования прироста и его средние величины увеличиваются при сниженной полноте. Если же сравнить близкие по предельным значениям диаметра местоположения А и В. то оказывается, что увеличение лимитов по приросту компенсируется снижением лимитов по продолжительности жизни. То же имеет место и в долине (сравнить местоположения Д и З в табл. 4).

Следовательно, увеличение площади питания (и соответственно прироста) - пространства,- приходящейся на каждую особь (при сниженной полноте), компенсируется уменьшением времени его жизни.

Если сравнивать экосистемы топологической размерности - фаций, урочищ, геомов, то и в них четко прослеживаются аналогичные соотношения. Так, древостои плакоров и верхней части склонов с благоприятными гидроклиматнческими условиями отличаются высокой полнотой и общим запасом фитомасс при низком приросте отдельных особей и стабильных режимах, длительной устойчивостью сообществ во времени, сглаженными режимами фптоклимата, слабо выраженными амплитудами колебаний прироста во времени. Долинные экосистемы, напротив, отличаются большой лабильностью, разнокачественпостыо в пространстве и времени, широкими амплитудами и большими величинами прироста, напряженностью и увеличенной скоростью метаболизма.

Пространство (следовательно, запас веществ и энергии) при сниженной полноте больше в пересчете на особь, но время жизненных циклов сокращается, система менее устойчива, сильнее подвержена действию неблагоприятных факторов, частота которых здесь увеличена и приводит к более частой повторяемости глубоких снижений прироста. За счет этого жесткость взаимосвязей прироста с отдельными внешними факторами среды увеличивается по сравнению с плакорными и склоновыми экосистемами (см. табл. 3, 4: [8,12]).

Аналогичные соотношения между проявлениями фенотипической изменчивости признаков древостоев отмечены в других регионах. Так, в южной тайге Приангарья А. А. Крауклисом [7] на основе развиваемой им концепции о диахронности процессов в геосистемах установлена возможность существования «некоторых механизмов компенсации временного разнообразия пространственным и наоборот». Хотя методические приемы анализа существенно отличались от изложенных в настоящей главе, общие выводы об изменчивости экосистем и динамике геосистем близки по существу, несмотря на то, что детерминирующую роль в Приангарье играет дефицит энергии [7], а в Прииртышье контролирующий фактор распределения показателей продуктивности экосистем в пространстве и времени - влага.

Частные примеры взаимной компенсации между признаками и процессами при-

родных систем содержатся в большинстве лесоведческих и лесоводственных работ. Обзор исследований по влиянию полноты на текущий прирост приведен в работе О.И. Питикина [14]. Общеизвестен эффект резкого увеличения прироста деревьев, оставленных после выборочной рубки, с последующим его «затуханием» [22]. Компенсация между различными факторами изменчивости прироста обсуждается в экологической литературе на протяжении столетия, чему способствовали также исследования дендрохронологического направления. Начатые в прошлом веке А. Покорни [26] и Ф. Шведовым [21], эти работы получили наибольшее развитие в трудах лаборатории А.Е. Дугласа, которые в настоящее время вызвали широкий резонанс и находят самые разнообразные применения, о чем можно сдуить по сводкам С.Г. Шиятова [23], Г.Е. Комина [6], Т.Т. Ботвинскаса [1], Г.Б. Гортинского [4], Г.И. Галазия [3], А.А. Молчанова [10]. В большинстве дендрохронологических работ по конкретным видам и регионам содержатся примеры компенсации между составляющими экологического пространства и времени, между величинами прироста и продолжительности жизни особей, в менее явном виде – между амплитудами и периодичностью колебаний. Однако, эти закономерности не привлекали внимания, поскольку в зависимости от цели конкретные исследования ограничивались анализом одной из составляющих изменчивости, чаще экзохронологической.

В настоящее время представляется возможным проследить изменения объема понятия «компенсация» по отношению к приросту древостоев в частности, и по отношению к изменчивости и динамике признаков геосистем в общем виде.

Наиболее простой эффект компенсации – взаимозаменяемость факторов продуктивности: отрицательное влияние одного из них компенсируется благоприятным сочетанием других. Так, в насаждения сосны смолистой (Висконсин, США) прослежена компенсация между увлажнением и содержанием гумуса в почвах [25].

Яркими примерами пространственной компенсации являются основные закономерности хода роста древостоев – уменьшение общего числа стволов с возрастом, дифференциация деревьев по высоте и диаметру, снижение прироста с увеличением полноты и сомкнутости как проявления всеобщей закономерности - борьбы за существование, присущей «для любого леса на земном шаре» [11].

Периодические компенсации в колебаниях космических факторов и связанных с ними явлений в биосфере установлены в 30-х годах прошлого столетия А. Л. Чижевским. Сформулированный им закон квантитативной компенсации заключается в процессе суммирования положительных и отрицательных отклонений в функциях биосферы в связи с периодической деятельностью Солнца, причем в идеальном случае эти отклонения сглаживаются до нуля [20].

Тем же автором приводятся обширные данные действия закона компенсации не только во времени, но и в пространстве: при одинаковом притоке энергии Солнца в биосферу Земли засухи в одних районах компенсируются наводнениями в других и т.д.

В приведенной ранее ссылке [7] мы видим качественно новый шаг: прослежена не только компенсация во времени или в пространстве, но и более сложный, не столь явный эффект - взаимная компенсация между пространственными и временными характеристиками состояний геосистем.

Очевидна тенденция увеличения сложности и абстрактности проявлений компенсации: факторальной – пространственной - временной - пространственно-временной.

Изложенную в настоящей главе гипотезу можно рассматривать как следующий этап в познании компенсационных эффектов функционпрования экосистем: переход от «компенсации сумм» к «компенсации произведений» - *произведения диаметрально противоположных составляющих изменчивости взаимно сбалансированы.*

Эмпирический материал по древостоям лишь иллюстрирует обсуждаемую гипотезу. Экспериментальное доказательство ее возможно в контролируемых условиях фитотрона па признаках видов с более коротким, чем у деревьев, жизненным циклом - микробов, водорослей, однолетних травянистых растений. Поскольку они не элементарны, получаемые при изучении явления изменчивости характеристики (лимиты, диапазоны, средние величины, коэффициенты вариации признака) не несут информации о вкладе групп факторов пространства времени, внешней внутренней среды в реально наблюдаемую изменчивость объекта.

Методологическое значение сделанных разработок (схема факторальных составляющих, рис.1) заключается в возможности их использования в качестве одного из оснований для создания неформальной классификации признаков фенотипической изменчивости биологических видов, что открывает новые пути познания факторальной обусловленности явления. Это расширяет сферу применения биологической информации для изучения динамики факторов среды в целях создания моделей экосистем, реализующих количественные показатели изменчивости в прогнозах.

Понятие динамики по отношению к экосистемам стационарного типа может интерпретироваться как изменчивость признаков ее функционирования в пространстве и времени без существенного изменения структуры компонентов, состава и генофонда биологических видов. Это означает, что динамика экосистемы индицируется фенотипическими изменениями признаков биоты.

В системах такого рода лимитирующим будет вещество, доступные количества которого наиболее близки к необходимому минимуму для данного вида. Выдвинутый Ю. Либихом в 19-ом столетии принцип: «Веществом, находящимся в минимуме, управляется урожай определяется величина и устойчивость последнего во времени» - получил известность как либиховский «закон» минимума. Многие авторы расширили это положение, включив в него другие факторы (температуру, время) помимо питательных веществ [27].

Наряду с минимальными значениями факторов лимитирующее влияние имеют и максимумы, если они близки к пределам переносимого данным организмом - закон толерантности, сформулированный В. Шелфордом в 1913 г. [27].

Обобщенная концепция лимитирующих факторов формулируется следующим образом: «Само присутствие и процветание организмов в данном местообитании зависит от целого комплекса условий. Всякое условие, которое приближается к пределам толерантности или выходит за эти пределы, называется лимитирующим условием или лимитирующим фактором» [27].

Из этого положения вытекает логическое следствие: лимитирующее или регулирующее влияние оказывают не только абсолютные значения показателей среды, но и степень их уклонения от оптимальных для вида диапазонов. Слабо варьирующие факторы вносят значительно меньший вклад в изменчивость признака по сравнению с резко варьирующими. Это ставит вопрос о возможности классификации факторов изменчивости, разграничения их на «предельные», «непосредственные» и «датчики времени» (Klaus, 1972).

Учитывая сказанное выше, для экосистем с благоприятными для видов условиями ведущей будет группа факторов с наибольшей изменчивостью.

Этому легко найти объяснение: перестройка режимов функционирования экосистем поглощает энергию, уменьшая тем самым ее затраты на создание первичной продукции [17]. Статистически достоверные связи переломов хода естественных процессов в системах планеты с переломами хода солнечной активности (а значит, и между собой попарно) убедительно подтверждают изложенные экологические подходы [5,20].

Моделирование процессов создания первичной продукции в экосистемах осложняется биологическими закономерностями. Соотношения между видами в ценозах, по-

пуляциях в первом приближении описываются моделями типа «хищник - жертва», для которых Вольтерра сформулировал три закона [9]:

1) *закон периодических циклов:* флуктуации численности обоих видов периодичны;

2) *закон сохранения, средних величин:* при неизменности среды и поведения сосуществующих видов их средняя численность остается постоянной;

3) *закон смещения средних величин:* уничтожение части особей обоих видов, пропорциональной количеству каждого из них, приводит к возрастанию численности используемого вида и уменьшению средней численности хищников.

Если провести аналогию между системой хищник - жертва с предложенной схемой, считая, что роль «хищника» в древостое могут выполнять внешние неблагоприятные факторы среды, способствующие снижению численности (элиминации особей из сообщества), аналогично «выеданию» части особей «хищником», то все три закона Вольтерра четко интерпретируются на основе эмпирического материала и по отношению к экосистеме в целом, а не только к биотическим ее компонентам. Так, флуктуации продуктивности периодичны (эндохронологическая составляющая), причем эта периодичность индицирует периодичность пульсации диапазона изменчивости факторов среды (экзохронологическая составляющая). При устойчивых градиентах среды (экзохорологическая составляющая) средний прирост древостоев относительно постоянен и индицирует реальные возможности экотопа для обеспечения определенных величин продуктивности. С элиминацией части особей (третий закон Вольтерра) возрастает продуктивность оставшихся, амплитуда колебаний признака, интенсивность возобновления. Элиминация же связана с большей частотой действия ограничивающих факторов (сокращением периодов между пульсациями).

Таким образом, есть основания полагать, что сформулированная гипотеза закона взаимной компенсации диаметрально противоположных составляющих изменчивости есть обобщение законов Либиха, Шелфорда и Вольтерра для экосистем стационарного типа, без выраженного эволюционного «тренда» во времени и может быть названа в случае ее экспериментального подтверждения *законом динамики экосистем*.

В результате изложенных соображений приходим к выводу, что далеко не всегда имеет смысл оправдывать применение сложного математического аппарата для изучения весьма сложных биологических и экологических систем. Как бы ни были многообразны связи между множеством входящих в систему компонентов и структурных элементов, факторов и видов, индицирующих их колебания, как бы ни осложняли эти взаимосвязи наложенные биологические взаимоотношения между организмами и видами, во всех случаях экосистемам присуще выполнение законов термодинамики. Именно поэтому в каждой экосистеме наблюдается взаимная компенсация факторальных составляющих фенотипической изменчивости признаков биоты как трансформатора потоков вещества и энергии. «Память» отдельных организмов о прошлых трансформациях, индицирующая их, далеко не во всех случаях легко «считывается». Деревья в этом смысле - очень информативный объект, дающий возможность проследить динамику экосистемы за большие промежутки времени.

В заключение отметим, что кажущейся простоте и даже наивности выводов логического анализа не должны противопоставляться результаты обширных исследований на больших выборках с применением многофакторного анализа и сложных математических аппаратов. Подходы эти не взаимоисключающие, а взаимодополняющие. Прежде чем исследовать массу факторов и признаков, важно систематизировать их в аспектах пространства и времени, исходности («извне» или «изнутри»), соподчинить их иерархически, проверить на стабильность или лабильность во времени и пространстве. Это может «отсеять» большую часть избыточной информации, затушевы-

вающей самые простые закономерности динамики.

Вслед за Ю. Одумом [27] важно не забывать, что «отношения между растениями - продуцентами и животными - консументами, между хищником и жертвой, да и численность и видовой состав в каждом местообитании подчиняются тем же законам, которые правят и неживыми системами - скажем, электромоторами или автомобилями».

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Битвинскас Т. Т. Дендроклиматические исследования. -Л., 1974. -172 с.
2. Витинский Ю. И. Цикличность и прогнозы солнечной активности. -М., 1973.
3. Галазий Г. И. Зависимость годичного прироста от изменений климата, уровня воды и рельефа на северо-западном побережье Байкала./ Геоботанические исследования и динамика берегов и склонов на Байкале. -Л., 1972, -С. 71-213.
4. Гортинский Г. Б. Опыт причинного анализа факторов, определяющих динамику прироста древесины: /Структура и продуктивность еловых лесов тайги. 1973, -С. 204-222.
5. Дружинин И. П., Хамьянова Н.В. Солнечная активность и переломы хода природных процессов на Земле. 1969. 296 с.
6. Комин Г. Е. Лесоведение и дендрохнология. – «Лесоведение» 1968, № 4.
7. Крауклис А. А. Некоторые итоги. Природные режимы и типогеосистемы Приангарской тайги. Новосибирск. 1975, -С. 270-278.
8. Крисон Х. П., Полюшкин Ю. В. Структура растительного покрова. Южная тайга Прииртышья. Новосибирск. 1975, -С. 165-185.
9. Леме Ж. Основы биогеографии. -М., 1975. 320с.
10. Молчанов. А. А. Изменчивость ширины годичного кольца с изменением солнечной активности . Формирование годичного кольца и накопление органической массы у деревьев. 1970, -С. 7-49.
11. Морозов Г. Ф. Учение о лесе., 1926, 368 с.
12. Нечаева Е. Г., Полюшкин Ю. В., Никитина. З. И. Природные взаимосвязи южнотаежных геосистем./ Южная тайга Прииртышья./ Новосибирск 1975, 740 с.
13. Осокин И. М Особенности радиационного режима в Забайкалье (на примере Читинской области) 1962, -С. 168-176.
14. Пітікін О. І. Вплів повности на поточни приріст запасу ялинників Карпат.- В кн.: Підвищения продуктивності лісів та ефективності іх використання. Львів, 1973, -С. 117-120.
15. Полюшкин Ю. В Изменчивость радиального прироста деревьев и ее использование в прогнозных целях. /Природа и природные ресурсы Тюменской области. Тюмень 1973, -С. 63-65.
16. Полюшкин Ю. В. Применение некоторых методов лесоведения при изучении топогеосистем. 1975. вып 47.
17. Полюшкин Ю. В. Изменчивость радиального прироста пихты сибирской и южной тайге Западной Сибири. автореф. канд. дис. Свердловск 1976. 24 с.
18. Сочава В. Б. К теории классификации геосистем с наземной жизнью. – «Докл. Ин-та геогр. Сибири и Дальнего Востока» 1972, вып.34, -С. 3-14.
19. Сочава В. Б. Геотопология как раздел учения о геосистемах. Топологические аспекты учения о геосистемах./ Новосибирск 1974а, -С. 3-86.
20. Чижевский А. Л. Земное эхо солнечных бурь. -М., 1976. 368 с.
21. Шведов Ф. Дерево как летопись засух. 1982.- «Метеорол. вестн.», 1892, №5. Перепечатано в кн.: Дендроклиматохронология и радиоуглерод. Каунас, 1972, -С. 17-26.
22. Швиденко А. И. Реакция подроста пихты белой на удаление древесного яруса. «Лесоведение», 1973, № 6, -С. 73-77.
23. Шиятов С. Г. Дендрохронология, ее принципы и методы:/Проблемы ботаники на Урале. /Свердловск, 1973, -С. 53-81.
24. Южная тайга Приангарья. Л., 1969. 268 с.
25. lyer Jaya G., Dosen Robert C. Compensatory trends of forest growth.”Ecology”, 1974, №1, p. 211-212.
26. Pocorny A. Eine Methode, im den meteorologischen Coefficienten des jahrliches Holzzuwachses der Dicotyledonenstamme zu ermitteln.- “Bot. Zeit”, 1869, № 44.
27. Ю. Одум Основы экологии – М.:Мир, 1975.

Лонцих П.А., Кононова Н.В. УДК 006.354, 382.3

ПРИНЦИПЫ TQM, АЛГОРИТМЫ ФОРМИРОВАНИЯ И САМООЦЕНКА ОРГАНИЗАЦИИ КАК ИНСТРУМЕНТ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССНОГО ПОДХОДА

Концепция увеличения эффективности, надежности и повышение безопасности продукции изложена в семействе стандартов ИСО 9000, принятых в качестве национальных стандартов во многих странах. Надежность и безопасность изделий на всех этапах их жизненного цикла являются аспектами качества продукции, которое характеризует ее способность удовлетворять установленным и предполагаемым потребностям общества. Требования общества – обязательства, вытекающие из законов, инструкций, правил, кодексов, уставов и других соображений относительно обеспечения качества изделий. Они становятся все более жесткими и более определенными.

Проблемы непрерывного совершенствования деятельности любой организации находятся в центре внимания теории и практики менеджмента. Одной из наиболее приемлемых концепций, ориентированных на постоянное улучшение различных аспектов работы организации, является концепция всеобщего управления качеством (TQM). Постоянное улучшение деятельности организации является одним из принципов этой концепции. Содержание данного принципа означает, что результаты деятельности организации становятся оптимальными, если ее работа осуществляется на основе управления знаниями в условиях созданной культуры непрерывного познания, инноваций и улучшения.

Принципы TQM составляют основу современного видения эффективного управления организацией. Об этом свидетельствует и тот факт, что основные положения концепции TQM стали основой МС ИСО серии 9000:2000. Так, ГОСТ Р ИСО 9000:2008 «Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь» содержит следующие определения, отражающие сущность постоянного улучшения деятельности организации: улучшение качества – часть менеджмента качества, направленная на увеличение способности выполнять требования к качеству; постоянное улучшение – повторяющаяся деятельность по увеличению способности выполнять требования.

Контроль качества продукции – деятельность, включающая проведение измерений, экспертиз, испытаний для оценки одной или нескольких характеристик объекта, проверки его соответствие установленным требованиям по качеству, способности обеспечить декларированные изготовителем показатели надежности и безопасности продукции.

При проведении контроля и проверке качества продукции государственные надзорные органы и специализированные организации руководствуются нормативными актами и стандартами России. Поэтому изделия должны удовлетворять обязательным требованиям, соответствующих стандартов. Разработчик и изготовитель изделий несут ответственность за декларированные показатели на всех этапах жизненного цикла. Потребитель – работодатель несет ответственность за безопасную эксплуатацию изделий, за обеспечение требуемых режимов работы и технического состояния, за своевременное проведение проверок и ремонтов.

Для оценки качества и работоспособности машин многие изготовители устанавливали свои нормы (на их виброактивность, для оценки качества изготовления и технического состояния при эксплуатации), исходя из опыта эксплуатации машин. В основном нормировали общие значения амплитуды или размаха вибросмещения корпусов подшипников или ротора, относительно подшипников. Нормы на вибростойкость устанавливали только для специальных машин, приборов контроля, строительных конструкций. В кораблестроении

нормировалось среднее квадратическое значение виброускорения в третьоктавных полосах частот до 10 кГц в местах передачи колебаний машины конструкциям корабля.

Успешная работа любой организации на современном рынке неосуществима без постоянного улучшения, совершенствования ее деятельности, нацеленной на повышение удовлетворенности потребителей. В свою очередь, совершенствование деятельности невозможно без периодического анализа фактического состояния работы по качеству и ее результатов, опираясь на который можно наметить и реализовать дальнейшие шаги в улучшении деятельности. Такой всесторонний анализ в мировой практике получил название самооценки.

ГОСТ Р ИСО 9004:2001 содержит следующее определение самооценки: «Самооценка – всестороннее оценивание, итогом которого является мнение или суждение о результативности и эффективности и уровне зрелости системы менеджмента качества». Несмотря на наличие определения, зафиксированного в стандарте, до настоящего времени не существует единого подхода к определению сущности, механизма реализации, а также реакции организации на результаты самооценки. Однако, как правило, самооценка деятельности организации проводиться в сравнении с какой-либо моделью, выбранной в качестве эталона. В настоящее время существует достаточно много моделей совершенствования на базе премий качества по различным, заранее определенным критериям.

Модель премии можно определить как набор критериев, имеющих внутренние взаимосвязи и объединенных графической схемой. Содержание критериев отражает основные составляющие бизнеса, актуальные для построения конкурентоспособной организации с эффективной системой управления.

В истории национальных наград за качество ключевую роль играют три широко известные и признанные во всем мире премии: премия Деминга – японская награда за успешную разработку и применение методов управления качеством в масштабах всей компании; национальная премия качества Малколма Болдриджа, критерии которой сформировали философию не только американского, но мирового бизнеса последних лет; Европейская премия качества, являющая собой образец взаимовыгодного сотрудничества организаций Европы под эгидой Европейского фонда управления качеством.

Премии качества вышли за рамки обычного конкурса и рассматриваются как инструмент управления и совершенствования бизнеса. Критерии и модели премий находятся в авангарде современных методов управления, формируют базу для систематической самооценки организации и разработки стратегии совершенствования.

Успех премий выражается в улучшении показателей деятельности и повышении конкурентоспособности компаний в странах, где проводятся конкурсы качества. Этот факт привлек особое внимание к премиям со стороны бизнес - сообщества. Во многих странах были учреждены собственные программы качества на базе ведущих мировых премий. В России это премия Правительства Российской Федерации в области качества, которая вручается с 1997 года. За это время получено более 800 заявок на участие в конкурсе из 67 субъектов Российской Федерации. По итогам конкурсов 1997-2007 годов премии присуждены 86 организациям. Среди победителей последних лет ОАО "Нарзан", ГОУ ВПО «Томский политехнический университет», ОАО "Северсталь", ОАО "КАМАЗ", ОАО "Лакокраска" и другие.

Ежегодный конкурс на соискание Премии Правительства РФ в области качества, оценочные критерии которого гармонизированы с моделью престижной Европейской премии по качеству, предоставил российским организациям современный инструмент целенаправленного развития, совершенствования деятельности и повышения конкурентоспособности. В основу модели премий, а, следовательно, и самооценки на соответствие ее требованиям, как и в другие конкурсные модели, заложены принципы TQM.

Учитывая важность европейского рынка для отечественных предприятий и организаций, критерии российской премии гармонизированы с европейской, что предоставляет заинтересованным организациям возможность ориентироваться на принципы работы в области качества зарубежных компаний. Кроме того, подобная практика облегчает подготовку организаций страны к участию в конкурсе на соискание Европейской премии по качеству. Однако модель российской премии не является точной копией европейской. Она создавалась с учетом реальных условий, в которых работают предприятия России

Каждая организация, представившая на конкурс свои материалы, получает объективную оценку группы экспертов, которая представляется в виде экспертного заключения, содержащего дан-

ные о сильных сторонах деятельности организации и областях, где можно ввести улучшения, а также балльную оценку, которая позволит конкурсанту сопоставить свой уровень с уровнем победителей.

Организации - участники конкурса оцениваются в баллах по модели, включающей две группы критериев:
- первая характеризует, как организация добивается результатов в области качества, что делается для этого («возможности»);
- вторая характеризует, что достигнуто («результаты»).

Оценка выражается суммарным количеством баллов по критериям модели Премии. Оценка критериев группы «Возможности» проводится по трем элементам (рис. 1):
- совершенство подхода,
- полнота подхода,
- оценка и пересмотр подхода.

Оценка критериев группы «Результаты» проводится по двум элементам:
- достижения,
- полнота охвата

Первая группа включает в себя критерии:
- лидирующая роль руководства (критерий 1);
- политика и стратегия организации в области качества (критерий 2);
- персонал (критерий 3);
- партнерство и ресурсы (критерий 4);
- процессы, осуществляемые организацией (критерий 5).

Вторая группа включает критерии:
- удовлетворенность потребителей качеством продукции (услуг) (критерий 6);
- удовлетворенность персонала (критерий 7);
- влияние организации на общество (критерий 8);
- результаты работы организации (критерий 9).

При этом каждый из 9 критериев модели содержит определенные составляющие и рекомендуемые области оценки:

Критерий 1 позволяет оценить, как руководители организации всех уровней определяют ее предназначение, вырабатывают стратегию развития и способствуют ее реализации; как они формируют ценности, необходимые для достижения долгосрочного успеха, и внедряют их с помощью соответствующих мероприятий и личного примера; насколько они вовлечены в деятельность, обеспечивающую развитие и внедрение системы менеджмента организации.

Критерий 2 «Политика и стратегия организации в области качества» позволяет оценить, как организация реализует свое предназначение и стратегию развития посредством ориентации на потребности заинтересованных сторон, разработки политики, планов, целей и процессов.

Критерий 3 «Персонал» нацелен на оценку управления персоналом, развития и использования его знаний и потенциала на индивидуальном уровне, на уровне групп и всей организации; на выявление того, как в организации планируются виды деятельности в целях претворения в жизнь выработанной политики и стратегии, а также в целях эффективной реализации своих процессов.

Критерий 4 «Партнерство и ресурсы» связан с определением того, как организация планирует внутренние ресурсы и свои взаимоотношения с

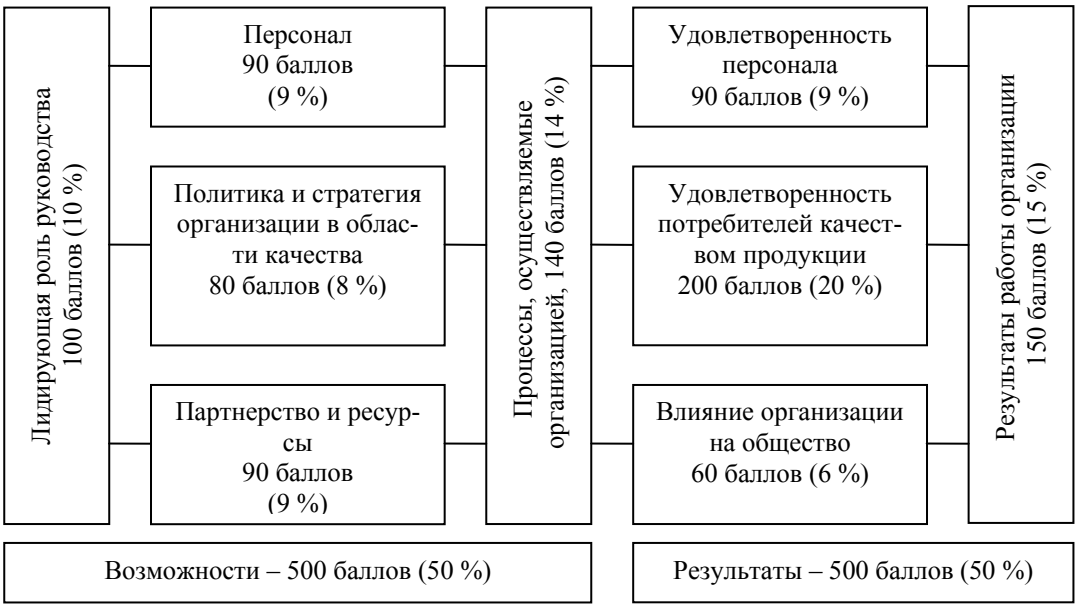


Рис. 1. Принципиальная схема модели Премии

внешними партнерами и как управляет ими в целях претворения в жизнь выработанной политики и стратегии, а также в целях эффективной реализации своих процессов.

Критерий 5 «Процессы, осуществляемые организацией» позволяет выявить, как организация проектирует процессы, осуществляет менеджмент и совершенствует их в целях претворения в жизнь выработанной политики и стратегии, а также полного удовлетворения и создания ценности для своих потребителей и других заинтересованных сторон.

Критерий 6 «Удовлетворенность потребителей качеством продукции (услуг)» нацелен на оценку результатов, которых добилась организация в отношении удовлетворения интересов внешних потребителей.

Критерий 7 «Удовлетворенность персонала» предполагает определение результатов, которых добилась организация в отношении удовлетворенности своего персонала.

Критерий 8 «Влияние организации на общество» связан с анализом результатов, которых добилась организация в отношении удовлетворения интересов общества на местном, национальном и мировом уровнях (социально значимый критерий).

Критерий 9 «Результаты работы организации» позволяет оценить результаты, которых добилась организация в отношении запланированных целей в работе.

Говоря о содержании критериев Премии Правительства РФ в области качества, особо хочется остановиться на критерии 6 «Удовлетворенность потребителей качеством продукции (услуг)». Высокая конкуренция и быстро меняющиеся условия на современном рынке делают его наиболее значимым критерием во всей модели. Долгосрочный успех организации тесно связан с ее способностью меняться в соответствии с желаниями потребителей, постоянной работой по повышению их удовлетворенности и умением перераспределять приоритеты. Критерий 6 «Удовлетворенность потребителей качеством продукции (услуг)» теснейшим образом связан с критерием 7 «Удовлетворенность персонала» Удовлетворение потребителей и персонала – приоритет в работе любой организации. Ведь именно потребитель является конечным судьей, оценивающим качество продукции и услуг. В свою очередь, сотрудники организации, как инициативные и творческие участники всех процессов, олицетворяют для потребителя всю организацию в целом.

Деятельность каждой организации направлена в конечном счете на создание новой ценности для потребителя. Создание и улучшение качества продукции - это в итоге добавление ценности для людей, а значит, улучшение качества жизни, что в свою очередь порождает новые потребности и ожидания в отношении продукции и инициирует инновации и улучшение качества. Улучшение качества жизни включает, естественно, сохранение или улучшение окружающей среды.

Борьба за потребителя в настоящее время немыслима без качества. Во всем мире качество уже давно стало ключевым фактором достижения конкурентных преимуществ. Причем это не только качество продуктов и услуг, но, в первую очередь, качество бизнес-процессов и системы управления организации. Качество требует признания. Премии за качество и достижение превосходства в бизнесе приносят признание лучшим организациям и являются важным элементом в стратегиях совершенствования, повышения производительности и конкурентоспособности, как на микро, так и на макроэкономическом уровне.

Возвращаясь к вопросу самооценки, стоит сказать, что одна из основных целей не только победителей, но и всех участников конкурса – освоение метода самооценивания организации на соответствие премии. Даже не участвуя в конкурсе, применение критериев премии позволяет организации получить всестороннюю картину своей деятельности, и на этой основе определить приоритетные направления совершенствования. Самооценка на базе критериев премии способствует систематизации и структурированию системы управления организацией. Самооценка проводиться для анализа бизнес – процессов и выявления областей, требующих первоочередных улучшений в условиях постоянно меняющейся внешней среды.

В самооценке заложено одно из главных свойств премий по качеству, которое делает их не просто знаком признания заслуг, а процедурой, помогающей организации определить свои достижения и недостатки, свои шансы на успех или задачи на будущее.

Однако в России модель и критерии национальной премии стали инструментом совершенствования пока для небольшого числа компаний. Премия Правительства РФ в области качества остается для организаций лишь наградой в одном из многочисленных конкурсов, со всеми плюсами и минусами, присущими подобным мероприятиям. Многие руководители воспринимают и внедряют современные подходы по «инерции», как требование рынка. Необходимо менять принципы ведения бизнеса, необходимо новое понимание качества.

Качество должно пронизывать все виды деятельности организации, в том числе менеджмент. Встает проблема формирования культуры качества, и здесь роль самооценки деятельности организации неоспорима

Кроме того, в связи со все усиливающейся конкуренцией «легкий» бизнес закончился, требуется серьезная работа по развитию и совершенствованию, что не всегда встречает понимание среди руководителей. Необходим универсальный инструмент, с помощью которого можно измерять качество деятельности организации. Без измерения нет совершенствования. Самооценка деятельности организации как раз и есть тот инструмент, который позволяет провести бенчмаркинг, оценить деятельность по девяти общепризнанным критериям. Однако в России практика эталонного сопоставления с лучшими в своей области организациями, компаниями-лауреатами премии, конкурентами прививается плохо в силу «комплекса засекреченности» отечественного бизнеса.

В завершение следует сказать, что изучение содержания, методов, моделей и процесса самооценки деятельности необходимо, поскольку является одним из шагов на пути к осознанию необходимости активного применения инструментов управления качеством в практике деятельности российских предприятий и организаций. Возможности совершенствования, которые открывают модели премий качества, можно с успехом использовать для построения конкурентоспособной организации в России уже сегодня - важно лишь знать о существовании этих возможностей и взять их на вооружение раньше конкурентов.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Самооценка деятельности организации на соответствие критериям Премии Правительства Российской Федерации в области качества 2006 года: Рек. для организаций- участников 2006 года – М.: ВНИИС, 2006. 78 с.
2. Салимова Т.А, Еналеева Ю.Р. Самооценка деятельности организации – М.: Академический проект,2006. 279 с.
3. Кощий С, Стерлинг М. Самооценка деятельности организации – механизм усиления конкурентных преимуществ // Стандарты и качество. 2008. №11. С.30
4. Щукин О. Молодые менеджеры используют методику самооценки организации // Стандарты и качество. 2007. №8. С.94
5. Розенблатт Ф. Принципы нейродинамики. Перцептрон и теория механизмов мозга. М.: Мир, 1965. 480 с.
6. Hopfield J.J. Neural Networks and Physical systems with emergent collective computational abilities//Proc. Nat. Sci. USA. 1982. V.79. P. 2554-2558.

Зоркальцев В.И., Киселева М.А.

УДК 519.833.2

РАВНОВЕСИЕ НЭША ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПЛАНОВ

Введение

Рассматривается проблема согласования производственных планов нескольких предприятий в случае, когда удельные затраты отдельных технологий данного предприятия зависят от интенсивностей использования этих технологий другими предприятиями. Каждое предприятие стремится выбрать такой план интенсивностей использования технологии из допустимых, который имел бы минимальные затраты. Поскольку издержки зависят от интенсивностей использования тех же технологий другими предприятиями, то рассматриваемая проблема представляется в виде набора взаимосвязанных задач оптимизации планов нескольких предприятий.

Естественно предположить, что если какое-либо предприятие имеет возможность улучшить свой план за счет изменения только выбираемых этим предприятием параметров (т.е. при неизменных интенсивностях использования технологии другими предприятиями), то оно осуществит эту возможность. Поэтому интерес представляет определение равновесных по Нэшу планов предприятий, т.е. ситуации, когда ни у одного из предприятий нет указанной возможности улучшения своего плана.

Здесь ограничимся случаем, когда ограничения в моделях предприятий линейные, а удельные затраты на технологические способы являются линейными возрастающими функциями от суммарных интенсивностей использования данных технологий всеми предприятиями. Докажем, что в этом случае проблема поиска набора равновесных по Нэшу планов предприятий сводится к задаче квадратичного программирования, для решения которой имеются эффективные алгоритмы (см., например, [1, 2, 3].

Исследуемая проблема может рассматриваться в качестве модели различных ситуаций согласования планов предприятий, в затратах которых имеются общие ингредиенты – единый природный ресурс, особый вид техники или рабочая сила данной квалификации. Увеличение спроса на общий ингредиент у одного предприятия ведет к росту цены и, соответственно, удельных затрат по данному ингредиенту у всех остальных предприятий. Одна из областей приложений – согласование планов перевозок нескольких клиентов общей транспортной сети с тарифами на перевозки по отдельным ветвям, зависящим от суммарных объемов перевозок по этим ветвям всех клиентов.

Затраты на перевозки транспортом общего пользования обычно нелинейно зависят от объемов перевозок [4]. В частности, эта нелинейность для автомобильного, водного, железнодорожного транспорта обусловлена тем, что с ростом объемов перевозок по отдельным транспортным путям возрастает среднее время транспортировки грузов. Нелинейная зависимость издержек от объемов транспортируемой продукции имеет место и для специализированных видов транспорта – трубопроводного, линей электропередач. Исследуемая здесь проблема согласования интересов имеет место в тех случаях, когда пользователи сами выбирают объемы перевозок по отдельным ветвям транспортной системы своих грузов (автомобильный и водный транспорт, некоторые варианты организации деятельности железнодорожного транспорта, системы транспорта газа, теплоснабжения городов при нескольких экономически независимых источниках теплоэнергии).

Стандартный путь при доказательстве существования равновесия Нэша состоит в использовании известной теоремы Брауэра о неподвижной точке. Этот способ для выяснения вопроса существования равновесия Нэша был использован нами в [5]. Этот путь не является конструктивным, поскольку не позволяет находить точку равновесия Нэша. В этом отношении интересен способ определения равновесия Нэша через условия оптимальности каждого участника. Как показано в [6] этот путь в случае линейных удельных затрат приводит к задаче квадратичного программирования. Материал данной статьи является развитием результатов [6] в т.ч. для произвольных, не только транспортных предприятий.

1. Некоторые свойства задач квадратичного программирования

Приводимые ниже математические факты потребуются в дальнейшем.

Эквивалентные задачи квадратичного программирования. Назовем **исходной** следующую задачу квадратичного программирования: найти вектор $x \in R^n$ из условий

$$\frac{1}{2}x^T Qx + (c,x) \to \min \qquad (1)$$

при ограничениях

$$Ax = b, x \geq 0. \qquad (2)$$

Заданными являются векторы $c \in R^n, b \in R^m$, матрица A размера $m \times n$, симметричная положительно определенная матрица Q размера $n \times n$. Как известно, данная задача имеет решение в том и только случае, если ограничения совместные. Это решение в силу строгой выпуклости целевой функции будет единственным.

Эквивалентная система уравнений. Из условий оптимальности для задачи минимизации строго выпуклой функции при линейных ограничениях (см., например, [3, 7]) следует, что вектор $x \in R^n$ будет решением задачи квадратичного программирования (1), (2) в том и только том случае, если для него выполняются условия (2) и при некотором $u \in R^m$

$$Qx + c \geq A^T u, \qquad (3)$$

$$x^T (Qx + c - A^T u) = 0. \qquad (4)$$

Система уравнений и неравенств (2)–(4) является равносильной исходной задаче квадратичного программирования (1), (2). Если векторы x, u являются решением системы (2)–(4), то вектор x будет решением задачи (1), (2), а вектор u будет состоять из множителей Лагранжа ограничений-равенств задачи (1), (2).

Двойственная задача квадратичного программирования. Пусть S – матрица $n \times n$, обратная к $Q, S = Q^{-1}$. Матрица S, как известно, также будет симметричной положительно определенной.

Двойственной к (1), (2) назовем следующую задачу квадратичного программирования: найти векторы $y \in R^n, u \in R^m$ из условий

$$\frac{1}{2} y^T S y - (b,u) \to \min \qquad (5)$$

при ограничениях

$$y - A^T u \geq -c. \qquad (6)$$

Согласно условию оптимальности Куна-Таккера векторы y, u будут решениями задачи (5)–(6) в том и только том случае, если для них выполняется условие (6) и при некотором $x \in R^n$ справедливы соотношения

$$x = Sy, \qquad (7)$$

$$-b = -Ax, x \geq 0, \qquad (8)$$

$$x\,(y - A\,u + c) = 0. \qquad (9)$$

Отметим, что условие (7) равносильно выражению

$$y = Qx. \qquad (10)$$

Если использовать это выражение в (6), то система (6), (8), (9) будет совпадать с системой (2)–(4). Поэтому задачу (5), (6) можно считать равносильной исходной задаче оптимизации (1), (2). Оптимальные значения переменных исходной задачи, составляющие вектор x, являются множителями Лагранжа ограничений (6) двойственной задачи.

Модификация двойственной задачи. Используя выражение (10), двойственную задачу можно представить в виде задачи поиска векторов переменных $x \in R^n, u \in R^m$ из условий

$$\frac{1}{2} x\,Qx - (b,u) \to \min \qquad (11)$$

при ограничениях

$$Qx - A\,u \geq -c. \qquad (12)$$

Лемма 1. *Пусть Q – матрица $L \times L$, диагональные коэффициенты которой больше 1, а остальные равны 1. Тогда Q – положительно определенная матрица.*

Доказательство. Пусть $Q = E + C,$

где E – матрица $L \times L$ со всеми единичными коэффициентами, C – диагональная матрица с коэффициентами $c_j > 0, j = 1,...,L$ по диагонали. Тогда для любого $w \in R^L$

$$w^T Q w = w^T E w + w^T C w = (\sum_{j=1}^{L} w_j)^2 + \sum_{j=1}^{L} c_j w_j^2.$$

Первая составляющая полученного выражения – неотрицательная, вторая составляющая при $w \neq 0$ – положительная. Следовательно, при любом $w \neq 0, w \in R^L$

$$w^T Q w > 0.$$

Лемма 1 доказана.

Лемма 2. *Если Q – положительно определенная матрица размера $L \times L$ с коэффициентами*

$$q_{ii} = 2, q_{ij} = 1, i \neq j,$$

то обратной ей будет матрица S размера $n \times n$ с коэффициентами

$$s_{ii} = \frac{n}{n+1}, s_{ij} = \frac{-1}{n+1}, i \neq j.$$

Доказательство. Непосредственной проверкой можно убедиться, что матрица

$$M = QS$$

будет диагональной с единицами по диагонали. Действительно, она имеет следующие коэффициенты

$$m_{} = q\,s_{} = \frac{2n}{n+1} + (n-1)\frac{-1}{n+1} = 1,$$

$$m_{il} = \sum_{j=1}^{L} q_{ij} s_{jl} = \frac{n}{n+1} + (n-2)\frac{-1}{n+1} - \frac{2}{n+1} = 0,$$

при $j \neq l$.

2. Исходные определения

Пусть L – количество субъектов (предприятий), согласующих свои решения, n – количество используемых технологий каждым из предприятий, m_l – количество производимых или потребляемых видов ресурсов предприятия $l = 1,...,L$. Для каждого субъекта заданы: векторы ресурсов b^l из R, матрица технологических коэффициентов A_l размера $m_l \times n$. Допускается, что какие-то технологии из рассматриваемого набора могут не использоваться некоторыми (но не всеми) субъектами: если предприятие l не использует технологию j, то столбец матрицы A_l с номером j будет нулевым вектором.

Искомыми величинами являются интенсивности использования технологических способов отдельными субъектами. Пусть они составляют векторы x^l из $R^n, l = 1,...,L$. Вектор переменных x будем называть допустимым планом субъекта l, если выполняются условия

$$Ax = b, x \geq 0. \qquad (13)$$

Здесь первое условие выражает материальный баланс в производстве и использовании отдельных видов ресурсов $i = 1,...,m_l$. Второе усло-

вие – неотрицательность интенсивности технологии. Множество допустимых планов субъекта l обозначим X^l.

Введем вектор суммарных интенсивностей использования технологий

$$z = \sum_{l=1}^{L} x^l. \qquad (14)$$

Удельные затраты на каждую технологию $j \in \{1,...,n\}$ предприятия $l \in \{1,...,L\}$ будем рассматривать в виде функции $P_j^l(z_j)$ от неотрицательного числа z_j. Будем считать, что это линейно возрастающая функция

$$P_j^l(z_j) = \alpha_j z_j + \beta_j^l, j = 1,...,n. \qquad (15)$$

Здесь α_j, β_j^l – заданные вещественные числа, причем $\alpha > 0$.

Произведение удельных затрат на интенсивность использования технологии j субъектом l дает затраты данного субъекта на эту технологию, которые можно рассматривать в виде функции

$$G_j^l(z_j, x_j^l) = P_j^l(z_j)x_j^l. \qquad (16)$$

Замечание. Затраты субъекта l на технологию j можно представить в виде суммы двух величин: затрат от использования некоторого общего ресурса всеми субъектами и индивидуальных издержек, не связанных с интенсивностями использования данной технологии другими субъектами. Вторую составляющую будем рассматривать в виде линейной функции от интенсивности технологий. Соответственно удельные издержки можно представить в виде суммы двух составляющих

$$P_j^l(z_j) = P_j(z_j) + \gamma_j^l,$$

где

$$P_j(z_j) = \alpha_j z_j + \gamma_j^0$$

– удельные затраты на общий для всех субъектов ресурс при некотором заданном γ_j^l,

$$\gamma_j^l = \beta_j^l - \gamma_j^0$$

– удельные затраты субъекта l в технологии j на остальные виды ресурсов.

Введем вектор суммарных интенсивностей технологий всех субъектов за исключением l-го

$$z^l = z - x^l. \qquad (17)$$

Издержки l-го субъекта на технологию j полезно будет представить в виде функций от величин z_j^l и x_j^l

$$F_j^l(z_j^l, x_j^l) = G_j^l(z_j^l + x_j^l, x_j^l). \qquad (18)$$

Суммарные издержки l-го субъекта являются функцией от векторов z^l и x^l

$$F^l(z^l, x^l) = \sum_{j=1}^{n} F_j^l(z_j^l, x_j^l). \qquad (19)$$

Целью каждого предприятия является выбор такого допустимого для него плана, при котором суммарные издержки минимальны. При этом следует учитывать, что издержки каждого клиента зависят от выбора планов другими предприятиями. То есть имеем L взаимосвязанных задач оптимизации, нуждающихся в доопределении. Одним из способов доопределения такой многокритериальной проблемы является поиск равновесия Нэша, т.е. такого набора допустимых планов $x^l, l = 1,...,L$ каждого субъекта, при котором никому из них не выгодно менять свой план. Приведем строгое определение этого равновесия.

Равновесие Нэша при согласовании производственных планов. *Набор допустимых планов $\bar{x}^l \in X^l$ субъектов $l = 1,...,L$ будет равновесным по Нэшу, если для любого $\tau \in \{1,...,L\}$ не существует плана $\tilde{x}^\tau \in X^\tau$ такого что*

$$F^l(\tilde{z}^\tau, \tilde{x}^l) < F^l(\bar{z}^\tau, \bar{x}^\tau),$$

где

$$\bar{z}^\tau = \sum_{l \neq \tau} \bar{x}^l.$$

3. Сведение проблемы поиска равновесия Нэша к системе уравнений и неравенств

Согласно приведенному выше определению равновесия Нэша векторы $\bar{x}^1,...\bar{x}^L$ составляют равновесный набор в том и только том случае, если для каждого $l \in \{1,...,L\}$ вектор $\bar{x}^l$ является решением задачи оптимизации

$$F(\bar{z}^l, x^l) \to \min, x^l \in X^l \qquad (20)$$

при фиксированном значении вектора

$$\bar{z}^l = \sum_{\tau \neq l} \bar{x}^l. \qquad (21)$$

Из (15)–(19) следует, что F^l – сепарабельная, квадратичная строго выпуклая функция от вектора x^l при любом векторе $z^l \in R^n$

$$F(z^l, x^l) = \sum_{j=1}^{n} \alpha_j (x_j^l)^2 + \sum_{j=1}^{n} \alpha_j z_j^l x_j^l + \beta_j^l x_j^l. \quad (22)$$

Следовательно, если $X^l \neq \varnothing$, то задача (20) имеет и единственное оптимальное решение.

Обозначим

$$f^l(z^l, x^l) = \nabla_{x^l} F(z^l, x^l)$$

– градиент целевой функции задачи (20). Согласно (22) компонентами этой вектор-функции будут функции

$$f_j^l(z_j^l, x_j^l) = 2\alpha_j x_j^l + \alpha_j z_j^l + \beta_j^l, j = 1,...,n. \quad (23)$$

Согласно условиям оптимальности Куна-Таккера для задачи минимизации дифференцируемой выпуклой функции при линейных ограничениях (см., например, [7]) для того, чтобы вектор $\overline{x}^l$ был решением задачи (20) необходимо и достаточно выполнения условий

$$A_l \overline{x}^l = b^l, \overline{x}^l \geq 0, \quad (24)$$

$$f^l(\overline{z}^l, \overline{x}^l) \geq A_l^T \overline{u}^l, \quad (25)$$

$$(\overline{x}^l)^T (f^l(\overline{z}^l, \overline{x}^l) - A_l^T \overline{u}^l) = 0 \quad (26)$$

при некотором $\overline{u}^l \in R^{m_l}$. Вектор $\overline{u}^l$ состоит из множителей Лагранжа ограничений-равенств $A_l x^l = b^l$ задачи (20).

Поскольку $\overline{x}^l \geq 0$, то условия (25), (26) равносильны следующему ограничению: если $\overline{x}_j^l > 0$, то j-ая компонента неравенств (25) должна выполняться в виде равенства. При введении такого ограничения исключается необходимость введения условия дополняющей нежесткости в виде (26). Итак, согласно (23) условия (25), (26) можно заменить на следующие

$$2\alpha_j x_j^l + \alpha_j z_j^l + \beta_j^l \geq (A_l^T u^l)_j, \quad (27)$$

$$2\alpha_j x_j^l + \alpha_j z_j^l + \beta_j^l = (A_l^T u^l)_j, \text{если } x^l > 0 \quad (28)$$

для всех $j = 1,...,n$. Учитывая, что $\alpha_j > 0, x_j^l \geq 0$, условия (27), (28) равносильны ограничению

$$2\alpha_j x_j^l = ((A_l^T u^l)_j - \alpha_j z_j^l - \beta_j^l)_+, j = 1,...,n. \quad (29)$$

Здесь $()_+$ – операция срезки: для любого вещественного t

$$t_+ = \max\{0, t\}.$$

Из определения операции срезки и неравенства $\alpha_j x_j^l \geq 0$ следует, что условие (29) можно записать в таком виде

$$\alpha_j x_j^l = ((A_l^T u^l)_j - \alpha_j z_j - \beta_j^l)_+,$$

где

$$z_j = z_j^l + x_j^l.$$

На основе приведенного рассуждения получаем доказательство следующего утверждения.

Теорема 1. *Векторы $x^1, x^2, ..., x^L$ из R^n составляют равновесные по Нэшу планы рассматриваемых субъектов в том и только том случае, если при некоторых векторах $u^l \in R^{m_l}, l = 1,...,L$ выполняются условия*

$$A_l x^l = b^l, x^l \geq 0, l = 1,...,L, \quad (30)$$

$$\alpha_j x_j^l = ((A_l^T u^l)_j - \alpha_j \sum_{\tau=1}^{L} x_j^\tau - \beta_j^l)_+,$$

$$j = 1,...,n, l = 1,...,L. \quad (31)$$

Данная теорема сводит проблему поиска равновесия Нэша к задаче решения системы уравнений и неравенств (30), (31), что может быть полезным для разработки алгоритмов поиска точки равновесия Нэша. При этом пока остаются нерешенными вопросы о существовании и единственности равновесия Нэша. Ответы на них будут получены в следующем разделе.

4. Представление проблемы поиска точки равновесия Нэша в виде задачи квадратичного программирования

Введем функции от векторов $x^l \in R^n$, $l = 1,...,L$. Пусть

$$\Phi(x^1,...,x^L) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{n} \alpha_j ((\sum_{l=1}^{L} x_j^l)^2 + \sum_{l=1}^{L} (x_j^l)^2),$$

$$H(x^1,...,x^L) = \Phi(x^1,...,x^L) + \sum_{j=1}^{n} \sum_{l=1}^{L} \beta_j^l x_j^l.$$

Согласно лемме 1 функция Φ является квадратичной строго выпуклой, следовательно, таковой будет и функция H.

Отметим, что

$$\frac{dH(x^1,...,x^L)}{dx_j^l} = \alpha_j x_j^l + \alpha_j \sum_{l=1}^{L} x_j^l + \beta_j^l.$$

Согласно (23)

$$\frac{dH(x^1,...,x^L)}{dx_j^l} = f_j^l(\sum_{\tau=1}^{L} x_j^\tau, x_j^l).$$

Рассмотрим задачу квадратичного программирования с переменными, составляющими векторы $x^l \in R^n$, $l = 1,...,L$:

$$H(x^1,...,x^L) \to \min, x^1 \in X^1,...,x^L \in X^L. \quad (32)$$

Заметим, что в силу указанных выше свойств функции H, если задача (32) имеет до-

пустимые решения, т.е. если $X^l \neq \varnothing$ для всех $l = 1,...,L$, то эта задача имеет и оптимальное решение. Причем оптимальное решение будет единственным.

Согласно условиям оптимальности Куна-Таккера для задачи (32) набор векторов $\overline{x}^1,...,\overline{x}^L$ из R^n будет составлять оптимальное решение этой задачи в том и только том случае, если это допустимое решение

$$A_l \overline{x}^l = b^l, \overline{x}^l \geq 0, \ l = 1,...,L \qquad (33)$$

и при некоторых $\overline{u}^l \in R^{m_l}$

$$f^l(\sum_{\tau \neq l} \overline{x}^\tau, \overline{x}^l) \geq A_l^T \overline{u}^l, \qquad (34)$$

$$(\overline{x}^l)^T (f^l(\sum_{\tau \neq l} \overline{x}^\tau, \overline{x}^l) - A_l^T \overline{u}^l) = 0 \qquad (35)$$

для всех $l = 1,...,L$.

Условия (33)–(35) совпадают с условиями (24)–(26) с учетом (21). Следовательно, оптимальным решением задачи (32) является набор равновесных по Нэшу планов отдельных субъектов. Получили доказательство следующих двух утверждений.

Теорема 2. *Если у каждого предприятия имеются допустимые планы $X^l \neq \varnothing$ для всех $l = 1,...,L$, то существует и единственный равновесный по Нэшу набор планов $x^l \in X^l$, $l = 1,...,L$.*

Теорема 3. *Равновесный по Нэшу набор планов $\overline{x}^l \in X^l$ субъектов $l = 1,...,L$ является решением задачи квадратичного программирования (32).*

Поскольку для решения задач квадратичного программирования существуют эффективные алгоритмы, то можно считать, что теорема 3 дает конструктивный путь для вычисления точки равновесия Нэша.

5. Двойственная задача квадратичного программирования

К задаче квадратичного программирования (32) можно записать двойственную, относительно векторов переменных $y^l \in R^n$, $u^l \in R^m$:

$$\frac{1}{2(n+1)} \sum_{j=1}^{n} \frac{1}{\alpha_j} \left(\sum_{l=1}^{L} (y_j^l)^2 + (y_j^l - \sum_{\tau \neq l}^{L} y_j^\tau)^2 \right) - \sum_{i=1}^{m_l} \sum_{l=1}^{L} b_i^l u_i^l \to \min,$$

при ограничениях

$$y_j^l - (A_l^T u^l)_j \geq -\beta_j^l, \ l = 1,...,n, \ l = 1,...,L.$$

Модифицированная двойственная задача относительно векторов переменных $x^l \in R^n$, $u^l \in R^m$ будет иметь вид:

$$\frac{1}{2} \sum_{j=1}^{n} \alpha_j ((\sum_{l=1}^{L} x_j^l)^2 + \sum_{l=1}^{L} (x_j^l)^2) - \sum_{i=1}^{m_l} \sum_{l=1}^{L} b_i^l u_i^l \to \min,$$

при ограничениях

$$2\alpha_j x_j^l + \alpha_j z_j^l + (A_l^T u^l)_j \geq -\beta_j^l, l = 1,...,n, l = 1,...,L.$$

Несложно убедиться, что условия оптимальности Куна-Таккера для двойственной задачи (при $y = Qx$) и модифицированной двойственной задачи совпадают с системой (33)–(35).

Таким образом, для рассматриваемой задачи продемонстрирован способ доказательства существования и единственности точки равновесия Нэша. Предложен конструктивный способ его нахождения на основе сведения исходной проблемы согласования интересов к задаче выпуклого квадратичного программирования.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Базара, М. Нелинейное программирование. Теория и алгоритмы / М. Базара, К. Шетти. – М.: Мир, 1982. – 583 с.
2. Полак, Э. Численные методы оптимизации. Единый подход. / Э. Полак. – М.: Мир, 1974. – 376 с.
3. Васильев, Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач / Ф.П. Васильев. – М.: Наука, 1988. – 552 с.
4. Васильева, Е.М. Нелинейные транспортные задачи на сетях / Е.М. Васильева, Б.Ю. Левит, В.Н Лившиц. – М: Финансы и статистика, 1981. – 105 с.
5. Зоркальцев, В.И. Равновесие Нэша в нелинейной транспортной модели / В.И. Зоркальцев, М.А. Киселева // Оптимизация, управление, интеллект. – 2007.–. №1(13). – С. 33-41.
6. Зоркальцев, В.И. Равновесие Нэша в транспортной модели с квадратичными затратами / В.И. Зоркальцев, М.А. Киселева // Дискретный анализ и исследование операций. – 2008. – Том 15. – №3. – С. 31-42.
7. Зоркальцев, В.И. Системы линейных неравенств: учебное пособие / В.И. Зоркальцев, М.А. Киселева. – Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2007. – 127 с.

Романова Г.В., Чертенкова О.С. УДК 57.087

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОМПОНЕНТОВ, ОБУСЛАВЛИВАЮЩИХ ВАРИАТИВНОСТЬ СЕРДЕЧНОГО РИТМА

Степень напряжения регуляторных систем – это интегральный ответ организма на весь комплекс воздействующих на него факторов независимо от того, с чем они связаны. Наиболее простой и доступный метод, и главное, позволяющий вести непрерывный динамический контроль, – это математический анализ ритма сердца. Изменения ритма сердца – универсальная оперативная реакция целостного организма на любое воздействие факторов внешней среды.

Совершенствование математического обеспечения эргономических исследований и, в частности, более широкое применение методов математического моделирования позволит глубже понять механизмы формирования вариативности сердечного ритма (HRV) и правильно оценить физиологическое и эргономическое значение показателей HRV.

Исходной концепцией для построения модели явились исследования по волнам кровяного давления [1]. Эргономическая направленность разрабатываемой нами модели (объективная оценка умственной нагрузки и нервно-психического напряжения) позволили отказаться от учёта ишемического и хеморецепторного колец обратной связи, относящихся к клинике сердечно-сосудистых и дыхательных систем. Разработанная структура системы управления сердечным ритмом реализует быструю регуляцию АД и обеспечивает воспроизведение основных компонентов вариативности сердечного ритма – сосудистой, дыхательной и высокочастотных аритмий у практически здорового человека.

Схема модели приведена на рис.1. В модели имеются входы экспериментально определённых частотных и амплитудных характеристик дыхательных движений грудной клетки и колебаний общего периферического сопротивления сосудистой системы, при этом учитывались их шумы. А также вход модели – внутренняя частота синусо-

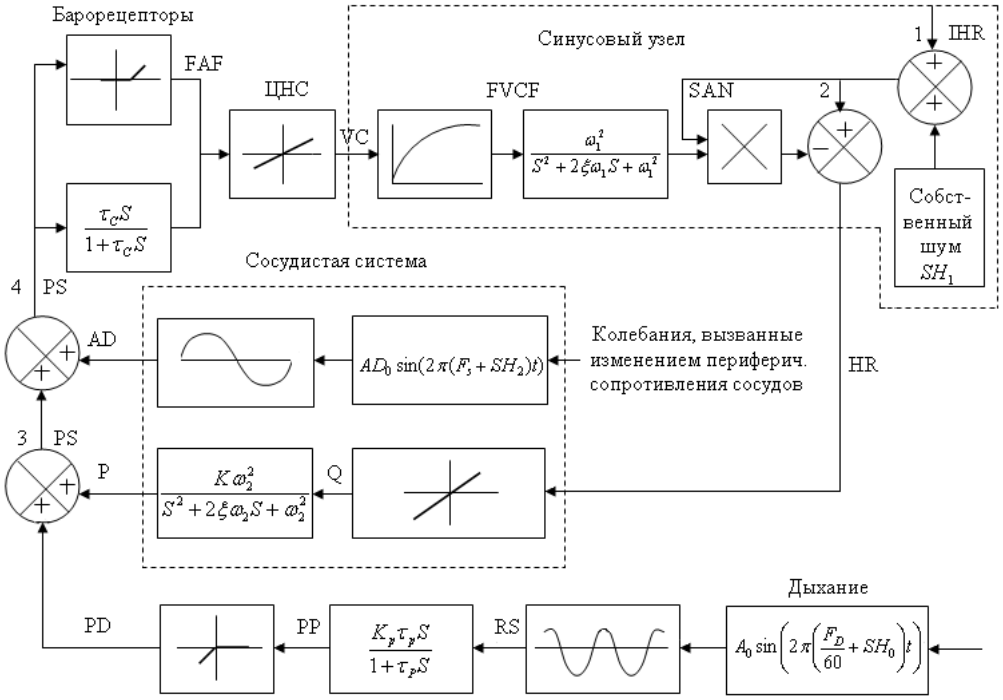


Рис. 1. Структура математической модели управления сердечным ритмом

вого узла (IHR) с её нестабильностью, наглядно проявляющейся при высоких уровнях рабочей нагрузки.

Выход модели, т.е. сердечный ритм (HR), преобразуется в минутный объём крови, выбрасываемый сердцем (Q) с коэффициентом пропорциональности KHR. Передаточная функция сосудистой системы описывает колебательное поведение кровяного давления (P). Воздействие дыхательных движений (PP) на кровяное давление учитывается при суммировании в компараторе 3, сосудистые воздействия (AD) – в компараторе 4 (см. рис.1). Частота афферентных разрядов (FAF) с баррорецепторов преобразуется в ЦНС в частоту эфферентных разрядов (VC) с коэффициентом пропорциональности KVS. Нисходящее воздействие ЦНС на синусовый узел осуществляется через волокна вагуса, реализуя быструю регуляцию АД, представленную в модели посредством блоков синусового узла.

Существенным отличием этой модели от моделей [2, 3] заключается в замене дифференциальных уравнений и передаточных функций дискретной математической моделью, более соответствующей импульсному характеру изучаемого процесса и применении соответствующих современным данным исходных значений ряда физиологических переменных.

Модель содержит три нелинейных элемента (рис.2), четыре линейных, описанных передаточными функциями.

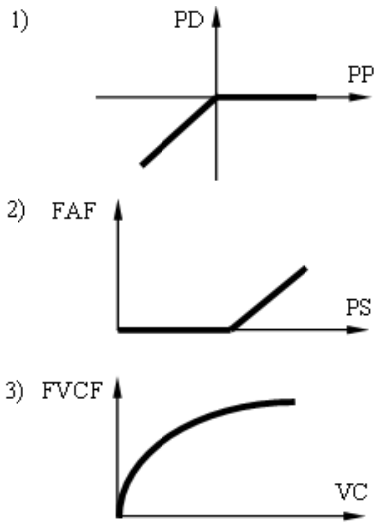


Рис. 2. Нелинейные элементы модели:
1) элемент системы дыхания, пропускающий только отрицательную полуволну дыхательного цикла; 2) элемент барорецепторного контроля, минимальная уставка которого соответствует 40 мм рт. ст.; 3) элемент синиаурикулярного узла (АН)

Математическое описание нелинейных элементов дано в формулах:

$$1)\ PD = \begin{cases} 0, & если \quad PP > 0 \\ KD \times PP, & если\ PP < 0 \end{cases},$$

где $KD = 1$ – коэффициент усиления;

$$2)\ FAF = \begin{cases} 0, & если \quad P_S \le P_{KP} (P_{KP} = 40) \\ KF(P_S - P_{KP}), & если \quad P_S > P_{KP} \end{cases};$$

$$3)\ FVCF = \begin{cases} 0, & если \quad VC \le 0 \\ \dfrac{VC}{A + B \times VC}, & если \quad VC > 0 \end{cases}.$$

Значения A = 1,74; B = 0,96 приведены в работе [4] .

Четыре передаточных звена включают в себя две пары однотипных звеньев вида:

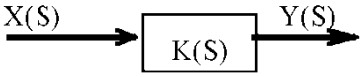
$$K_{1,2}(S) = \frac{K_{y1,2} \times \tau_{1,2} \times S}{1 + \tau_{1,2} \times S}; \qquad (1)$$

$$K_{3,4}(S) = \frac{K_{y3,4} \times w_{3,4}^2}{S^2 + 2\xi_{3,4} \times S \times w_{3,4} + w_{3,4}^2} \qquad (2)$$

где K_y – коэффициенты усиления звеньев; ξ – параметр колебательности; ω – круговая частота; τ – постоянная времени.

Чтобы перейти к разностным уравнениям достаточно от передаточных функций, представляющих собой преобразование Лапласа непрерывной функции, перейти к преобразованию Лапласа дискретной функции, которое часто называют z-преобразованием, а затем от него уже непосредственно перейти к разностному уравнению.

Пусть имеем непрерывную передаточную функцию K(S)



Чтобы от непрерывной функции времени перейти к дискретной функции на входе системы ставят ключ, который на мгновение замыкает входной сигнал X, а затем, в течение времени T держит его разомкнутым. T называют периодом дискретности.

Ключ математически описывается суммой δ-функций

$$X_T(t) = T \sum_{k=0}^{\infty} \delta(t - kT) \qquad (3)$$

Передаточная функция ключа есть преобразование Лапласа.

По определению преобразования Лапласа:

$$K_{кл}(S) = T \sum_{n=0}^{\infty} \int_0^{\infty} \delta(t - nT) e^{-St} dt = T \sum_{n=0}^{\infty} e^{-SnT}$$

так как $\int_0^\infty \delta(t-a)e^{-St}dt = e^{-aS}$ из свойств δ-функции. Преобразование Лапласа для суммы δ-функций $T\sum_{n=0}^{\infty} e^{-SnT} = \frac{T}{1-e^{-ST}}$.

Чтобы сделать запись более компактной обозначают $e^{ST} = z$, тогда $\frac{T}{1-e^{-ST}} = \frac{T}{1-z^{-1}} = -T\frac{z}{1-z}$. Это преобразование уже называют z-преобразованием.

Найдем передаточную функцию непрерывного преобразования Лапласа совместно с ключом

Она равна свертке передаточной функции ключа $K_{кл}(S)$ и непрерывной части $K(S)$, т.е.

$$K^*(S) = \frac{1}{2\pi j}\int_{c-j\infty}^{c+j\infty} K_{кл}(S-\lambda)K(\lambda)d\lambda =$$

$$= \frac{T}{2\pi j}\int_{c-j\infty}^{c+j\infty} \frac{K(\lambda)}{1-e^{-(S-\lambda)T}}d\lambda$$

Обозначим $z = e^{ST}$, тогда

$$K^*(z) = \frac{1}{2\pi j}\int_{c-j\infty}^{-+j\infty} \frac{K(\lambda)}{1-z^{-1}e^{\lambda T}}d\lambda.$$

Это формула перехода от непрерывного преобразования к дискретному z-преобразованию [5].

Этот интеграл можно вычислить пользуясь теорией вычетов. Однако проще воспользоваться таблицами z-преобразований, которые имеются во многих справочниках по теории автоматического регулирования.

Рассмотрим конкретно уравнения (1) и (2). Уравнение (1) (индексы опущены)

$$K(S) = (\tau \times S)\frac{K}{1+\tau \times S}.$$

Это реальное дифференцирующее звено. Первый множитель $\tau \times S$ идеальное дифференцирующее звено, которому при дискретном преобразовании соответствует первая разность:

$\Delta(n) = [X(n) - X(n-1)]; n = 1,2,...,\infty$.

Второй множитель преобразуем

$$\frac{K}{1+\tau \times S} = \frac{K}{\tau\left(S+\frac{1}{\tau}\right)}.$$

Из таблиц z-преобразования следует

$$K^*(z) = \frac{T \times K \times z}{\tau \times \left(z - e^{-\frac{T}{\tau}}\right)} = \frac{T \times K}{\tau}\frac{z}{z - e^{-\frac{T}{\tau}}}. \quad (4)$$

Входом для звена z является $\Delta^*(z)$, а выход обозначим Y*(z). Тогда

$$\frac{T \times K}{\tau}\frac{z}{z - e^{-\frac{T}{\tau}}} = \frac{Y^*(z)}{\Delta^*(z)}.$$

Отсюда

$$Y^*(z) \times \tau \times \left[z - e^{-\frac{T}{\tau}}\right] = T \times K \times z \times \Delta^*(z)$$

или

$$Y^*(z) \times z - Y^*(z) \times e^{-\frac{T}{\tau}} = \Delta^*(z) \times z \times \frac{T \times K}{\tau}.$$

Переходя к дискретной функции времени и учитывая теорему о сдвиге получим выражение для разностного уравнения

$$Y(n+1) - e^{-\frac{T}{\tau}} \times Y(n) = \frac{T}{\tau} \times K \times \Delta(n+1).$$

Сдвинем аргумент на единицу, заменив n + 1 на n, а n на n - 1 и получим окончательно

$$Y(n) = A_1 \times Y(n-1) + A_2[X(n) - X(n-1)] \quad (5)$$

$$A_1 = e^{-\frac{T}{\tau}};$$

$$A_2 = \frac{K \times T}{\tau};$$

$$X(n) - X(n-1) = \Delta(n).$$

Найдем z-преобразование уравнений (2).

Пусть $X_{вх}(t)$ и $X_{вых}(t)$ – соответственно функции времени на входе и выходе динамического звена (2).

Тогда

$$\frac{X_{вых}(S)}{X_{вх}(S)} = \frac{K \times w^2}{S^2 + 2\xi \times S \times w + w^2} \quad (6)$$

В таблицах z-преобразований нет функции, точно соответствующей правой части (6). Поэтому преобразуем знаменатель правой части, так чтобы получить полный квадрат. Для этого прибавим и отнимем $\xi^2 w^2$. Тогда

$$S^2 + 2\xi S w + w^2 + \xi^2 w^2 - \xi^2 w^2 =$$

$$= (S + \xi w)^2 + (w^2 - \xi^2 w^2) =$$

$$= (S + \xi w)^2 + w^2(1 - \xi^2) = (S + \alpha)^2 + \beta^2,$$

где $\alpha = \xi w$ и $\beta = w\sqrt{1-\xi^2}$.

Окончательно получим

$$K(S) = \frac{Kw^2}{(S+\alpha)^2 + \beta^2} .$$

Этой функции соответствует z-преобразование

$$K^*(z) = \frac{K \times w^2 \times T}{\beta} \frac{z \times e^{-\alpha T} \times \sin \beta T}{z^2 - 2z \times e^{-\alpha T} \times \cos \beta T + e^{-2\alpha T}}$$

Обозначим

$$A_8 = 2 \times e^{-\alpha T} \cos \beta T = 2 \times e^{-\xi w T} \cos[w\sqrt{1-\xi^2}T] ;$$

$$A_9 = e^{-2\xi w T} ;$$

$$A_{10} = \frac{KTw^2}{w\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi w T} \sin[w\sqrt{1-\xi^2}T] ,$$

тогда

$$K^*(z) = \frac{A_{10} \times z}{z^2 - A_8 \times z + A_9} .$$

Так как $K^*(z) = \frac{X_{вых}(z)}{X_{вх}(z)}$, то

$$\frac{X_{вых}(z)}{X_{вх}(z)} = \frac{A_{10} \times z}{z^2 - A_8 \times z + A_9} ,$$

или

$$X_{вых}(z)[z^2 - A_8 \times z + A_9] = X_{вх}(z) \times A_{10} \times z ,$$

$$z^2 \times X_{вых}(z) - A_8 \times z \times X_{вых}(z) + A_9 \times X_{вых}(z) = X_{вх}(z) \times A_{10} \times z .$$

С учетом теоремы о сдвиге получаем разностное уравнение

$$X_{вых}(n+2) - A_8 X_{вых}(n+1) + A_9 X_{вых}(n) = A_{10} X_{вх}(n+1)$$

Заменим m = n + 2, тогда

$$X_{вых}(m) = A_8 X_{вых}(m-1) - A_9 X_{вых}(m-2) + A_{10} X_{вх}(m-1)$$

Это окончательное выражение для разностного уравнения, в котором аргумент m можно снова заменить на n.

При ξ = 1 уравнение (2) переходит в

$$K(S) = \frac{Kw^2}{(S+w)^2} .$$

Ему соответствует

$$K^*(z) = \frac{KTw^2 \times z \times e^{-wT}}{(z - e^{-wT})^2}$$

и разностное уравнение

$$X_{вых}(n) = A_3 X_{вых}(n-1) - A_4 X_{вых}(n-2) + A_5 X_{вх}(n-1)$$

где $A_3 = 2e^{-wT}; A_4 = e^{-2wT}; A_5 = Kw^2 T e^{-wT}$.

Расчет переходных процессов при T = 0,1 сек и T = 1/6 сек показал, что надо выбрать T = 1/6 сек. При таком T наблюдается устойчивое решение системы при всех условиях и дальнейшее уменьшение T приводит только к увеличению времени решения задачи.

Можно сделать следующие выводы:

1. Более адекватным математическим аппаратом модели управления ритмом сердца сравнительно с принятыми подходами будет система разностных уравнений, т.к. именно такие уравнения учитывают дискретный характер моделируемого процесса и существенно облегчают решение задач моделирования.

2. Переход к разностным уравнениям обеспечивается переходом от преобразования Лапласа непрерывной функции к преобразованию Лапласа дискретной функции.

3. Устойчивость решения разностных уравнений обеспечивается подбором оптимального шага дискретности.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Koepchen, H.P. History of studies and concepts of blood pressure waves / H.P. Koepchen // Mech. Blood Pressure Waves. Berlin et. al. 1984. P. 3-23.
2. Luckzak, H. Decomposition of heart rate variability under the ergonomics aspects stressor analysis / H. Luczak, U. Philipp, W. Rohmetr // The study of heart rate variability. Oxford, 1980.
3. Miyawaki K. Analysis and simulation of the periodic heart rate fluctuation / K. Miyawaki, T. Takahashi, H. Takamura // Received Nov. 25. 1965. № 709. P. 315.
4. Luczak H. Fractioned heart rate variability. Part I: Analysis in a model of the cardiovascular and cardiorespiratory system / H. Luczak // Ergonomics, 1978. V. 21. № 11. P. 895-911.
5. Anderson D.E. Ambylatory monitoring of respiration: Inhibitory breathing in the natural ehviroment / D.E. Anderson, K. Code, J.A.Hagthwite // Psychophysiol, 1992. V. 29. № 5.

Кирий В.Г., Чан Ван Ан

УДК 14.07.07

МОДЕЛЬ ТЕСТИРОВАНИЯ КАК СИСТЕМА СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН

В данной статье предлагается вероятностная модель процесса тестирования, в которой в качестве случайных величин выступают две величины, а именно, количество студентов, принимающих участие в тесте и количество правильных ответов на вопросы теста. Вопросы теста поступают независимо от результата ответа, сложность вопроса оценивается вероятностью правильного ответа: чем меньше вероятность, тем сложнее вопрос.

В работе авторов [1] была предложена полиномиальная вероятностная модель процесса тестирования как процесса с независимыми случайными величинами (количеством студентов и количеством правильных ответов).

Если в качестве показателя эффективности процесса тестирования взять среднее количество студентов прошедших тест, то согласно этой модели возможные исходы тестирования представляют из себя следующие события:

A_1 -один студент отвечает правильно на все вопросы теста с вероятностью $p_1 p_2 ... p_m$.

……

A_i - i студентов отвечают правильно на все вопросы теста, $n-i$ неправильно.

……

$A_n - n$ студентов отвечают правильно на все вопросы теста с вероятностью

$$(p_1 p_2 ... p_m)^n .$$

В общем случае вероятность этих исходов рассчитывается по формуле Бернулли [2]:

$$B_i = C_n^i (p_1 p_2 ... p_m)^i (1 - p_1 p_2 ... p_m)^{n-i} ,$$

где m – количество вопросов.

Отсюда математическое ожидание и дисперсия числа студентов прошедших тест соответственно равны

$$\mathrm{M}[X_i] = n\prod_1^m p_j . ,$$

$$\mathrm{D}[X_i] = n\prod_1^m p_j \left(1 - \prod_1^m p_j\right),$$

где X_i -число студентов из n ,ответивших правильно на все вопросы теста.

Для случая, когда все вопросы имеют одинаковую сложность, получаем, что $\mathrm{M}[X_i] = np^m$ и тогда просто решается обратная задача определения такой степени сложности вопроса, при которой был бы определенный процент числа студентов прошедших тест.

Очевидно, что на основе полиномиальной модели можно рассчитать основные показатели эффективности и по отношению к количеству правильных ответов.

Однако несомненный интерес представляет нахождение такой вероятностной модели, в которой тестирование рассматривается как система двух случайных величин (X, Y), где X - количество студентов, ответивших правильно на все вопросы теста, Y - количество правильных ответов.

Для нахождения показателя эффективности по отношению к количеству правильных ответов воспользуемся формулой полной вероятности, в соответствии с которой полная вероятность события B_k, что $Y = k$, где k изменяется от 0 до mn, равна:

$$P(B_k) = \sum_{i=1}^{n} P(C_i) P(B_k / C_i) ,$$

где $P(B_k)$ - полная вероятность события, что n студентами, участвующими в тесте, получено k правильных ответов;

$P(C_i)$ - безусловная вероятность того, что $X = i$, $i = \overline{1,n}$;

$P(B_k / C_i)$ – условная вероятность того, что $Y = k$ при условии, что $X = i$.

Вывод уравнений в общем виде представляет значительные трудности, так как в формулах необходимо учитывать влияние еще и количества вопросов, в связи с этим ниже приводятся результаты исследования для конкретных параметров процесса тестирования.

Рассматривается тест, состоящий из 3 вопросов, в котором участвуют 5 студентов, в таком тесте максимальное количество правильных ответов будет равно 15, сложность вопроса оценивается вероятностью правильного ответа p и неправильного ответа q.

Ниже приведены формулы для расчета безусловной вероятности $P(C_i)$ и условной вероятности $P(B_k / C_i)$.

1.Число студентов, ответивших правильно равно нули: $x = 0$. При этом условные вероятности правильных ответов рассчитываются по следующим формулам:

Безусловная вероятность того, что ни один из пяти студентов не прошёл тест, равна:

$$P(x = 0) = (1 - p^3)^5 .$$

Условная вероятность того, что число правильных ответов равно 0 ,при условии того, что ни один студент не прошёл тест равна :

$$P(y = 0 / x = 0) = q^{15} .$$

При этом же условии, условная вероятность получения одного правильного ответа равна :

$$P(y = 1 / x = 0) = 15 p^1 q^{14} .$$

Условная вероятность получения двух правильных ответов равна:

$$P(y = 2 / x = 0) = 105 p^2 q^{13} .$$

Условная вероятность получения трёх правильных ответов равна вероятности того, что из пяти студентов получено три правильных ответа, но из этих студентов никто не ответил правильно на все вопросы теста:

$$P(y = 3 / x = 0) .$$

Для расчета этой вероятности нужно от вероятности того, что из пятнадцати ответов получено три правильных ответа отнять вероятность того, что из 5-и студентов только один ответил правильно на все вопросы, эта вероятность равна

$$P(y = 3 / x = 0) = 450 p^3 q^{12} .$$

Рассуждая аналогичным способом, находим расчетные формулы для других случаев процесса тестирования при условии, что ни один студент не прошёл тест:

$$P(y = 4 / x = 0) = 1305 p^4 q^{11}$$
$$P(y = 5 / x = 0) = 2673 p^5 q^{10}$$
$$P(y = 6 / x = 0) = 3915 p^6 q^9$$
$$P(y = 7 / x = 0) = 4050 p^7 q^8$$
$$P(y = 8 / x = 0) = 2835 p^8 q^7$$
$$P(y = 9 / x = 0) = 1215 p^9 q^6$$
$$P(y = 10 / x = 0) = 243 p^{10} q^5 .$$

2.Рассмотрим следующий вариант тестирования, когда один студент прошел тест.

Безусловная вероятность того, что один студент прошел тест равна:

$$P(x = 1) = C_5^1 p^3 (1 - p^3)^4 = 5 p^3 (1 - p^3)^4 .$$

Условные вероятности получения правильных ответов равных $0,1$ и 2 равны нулю, так как один студент ответил правильно на три вопроса теста:

$$P(y=0/x=1)=P(y=1/x=1)=P(y=2/x=1)=0.$$

Условная вероятность получения трёх правильных ответов при условии, что один студент ответил правильно на все вопросы теста, равна единице:

$$P(y = 3 / x = 1) = 1 .$$

Условная вероятность получения 4-х правильных ответов равна вероятности того, что из оставшихся студентов получен один правильный ответ

$$P(y = 4 / x = 1) = C_{12}^1 p^1 q^{11} = 12 p^1 q^{11} .$$

Условная вероятность получения 5-и правильных ответов равна вероятности того, что из оставшихся студентов получено два правильных ответа

$$P(y = 5 / x = 1) = C_{12}^2 p^2 q^{10} = 66 p^2 q^{10} .$$

Условная вероятность получения шести правильных ответов равна вероятности того, что из четырёх оставшихся студентов получено три правильных ответа, но из этих оставшихся студентов никто не ответил правильно на все вопросы теста.

Для расчета этой вероятности нужно от вероятности того, что из двенадцати ответов получено три правильных ответа отнять вероятность того, что из четырёх студентов только один студент ответил правильно на все вопросы, эта вероятность равна

$$C_4^1 p^3 q^9 = 4 p^3 q^9 .$$

И окончательно получаем:

$$P(y = 6 / x = 1) = 216 p^3 q^9$$

Рассуждая аналогично находим расчетные формулы для других случаев процесса тестирования при $x = 1$:

$$P(y = 7 / x = 1) = 459 p^4 q^8$$
$$P(y = 8 / x = 1) = 648 p^5 q^7$$
$$P(y = 9 / x = 1) = 594 p^6 q^6$$
$$P(y = 10 / x = 1) = 324 p^7 q^5$$
$$P(y = 11 / x = 1) = 81 p^8 q^4 .$$

3.Ниже приведены расчетные формулы для случая, когда два студента ответили правильно на все вопросы теста .

Безусловная вероятность того, что два студента прошли тест равна :

$$P(x=2)=C_5^2 p^6(1-p^3)^{\ 3}=10p^6(1-p^3)^3.$$

Условная вероятность того, что получено шесть правильных ответов, равна единице:

$$P(y=6/x=2)=1.$$

Условная вероятность того, что получено семь правильных ответов, равна:

$$P(y=7/x=2)=C_9^1 p^1 q^8=9p^1q^8.$$

Условная вероятность получения восьми правильных ответов равна:

$$P(y=8/x=2)=C_9^2 p^2 q^7=36p^2q^7.$$

При расчёте условной вероятности получения девяти правильных ответов необходимо учитывать, что остальные три студента дали три правильных ответа, но из этих студентов никто не ответил правильно на все вопросы теста.

$$P(y=9/x=2)=81p^3q^6$$

Рассуждая аналогичным образом, получаем расчетные формулы для других вариантов процесса тестирования:

$$P(y=10/x=2)=108p^4q^5$$

$$P(y=11/x=2)=81p^5q^4$$

$$P(y=12/x=2)=27p^6q^3$$

4.Ниже приведены расчетные формулы для случая, когда три студента прошли тест.

Безусловная вероятность такого события равна:

$$P(x=3)=C_5^3 p^9(1-p^3)^{\ 2}=10p^9(1-p^3)^2.$$

Условная вероятность получения девяти правильных ответов равна единице:

$$P(y=9/x=3)=1$$

Условная вероятность получения десяти правильных ответов равна:

$$P(y=10/x=3)=6p^1q^5$$

Условная вероятность получения одиннадцати правильных ответов равна:

$$P(y=11/x=3)=15p^2q^4$$

Условная вероятность получения двенадцати правильных ответов равна:

$$P(y=12/x=3)=18p^3q^3.$$

Условная вероятность получения тринадцати правильных ответов равна:

$$P(y=13/x=3)=9p^4q^2$$

5.Ниже приведены расчетные формулы для варианта, когда четыре студента прошли тест.

Безусловная вероятность того, что четыре студента прошли тест:

$$P(x=4)=C_5^4 p^{12}(1-p^3)=5p^{12}(1-p^3)$$

Условная вероятность получения двенадцати правильных ответов равна единице:

$$P(y=12/x=4)=1$$

Условная вероятность получения тринадцати правильных ответов равна:

$$P(y=13/x=4)=3p^1q^2$$

Условная вероятность получения четырнадцати правильных ответов равна

$$P(y=14/x=4)=3p^2q^1$$

6. И наконец последний вариант, когда все пять студентов прошли тест.

Безусловная вероятность того, что пять студентов прошли тест

$$P(x=5)=C_5^5 p^{15}(1-p^3)^0$$

Условная вероятность получения пятнадцати правильных ответов равна единице:

$$P(y=15/x=5)=1$$

Ниже приведена таблица условных вероятностей для всех случаев сочетания количества студентов, проходящих тестирование и количества получаемых ответов

X / Y	0	1	2	3	4	5
0	q^{15}	0	0	0	0	0
1	$15p^1q^{14}$	0	0	0	0	0
2	$105p^2q^{13}$	0	0	0	0	0
3	$450p^3q^{12}$	1	0	0	0	0
4	$1305p^4q^{11}$	$12p^1q^{11}$	0	0	0	0
5	$2673p^5q^{10}$	$66p^2q^{10}$	0	0	0	0
6	$3915p^6q^9$	$216p^3q^9$	1	0	0	0
7	$4050p^7q^8$	$459p^4q^8$	$9p^1q^8$	0	0	0
8	$2835p^8q^7$	$648p^5q^7$	$36p^2q^7$	0	0	0
9	$1215p^9q^6$	$594p^6q^6$	$81p^3q^6$	1	0	0
10	$243p^{10}q^5$	$324p^7q^5$	$108p^4q^5$	$6p^1q^5$	0	0
11	0	$81p^8q^4$	$81p^5q^4$	$15p^2q^4$	0	0
12	0	0	$27p^6q^3$	$18p^3q^3$	1	0
13	0	0	0	$9p^4q^2$	$3p^1q^2$	0
14	0	0	0		$3p^2q^1$	0
15	0	0	0		0	1

На основании полученных расчетных формул предлагается оценить эффективность процесса тестирования, рассчитав математическое ожидание числа правильных ответов по следующей формуле:

$$M[Y] = \sum_{k=1}^{15} Y_k P(Y_k),$$

где

$$P(Y_k) = P(Y = k) = \sum_{i=1}^{n} P(X = i) P(Y = k / X = i)$$

$$P(Y_0) = q^{15}(1-p^3)^5$$

$$P(Y_1) = 15p^1q^{14}(1-p^3)^5$$

$$P(Y_2) = 105p^2q^{13}(1-p^3)^5$$

$$P(Y_3) = 450p^3q^{12}(1-p^3)^5 + 5p^3(1-p^3)^4$$

$$P(Y_4) = 1305p^4q^{11}(1-p^3)^5 + 60p^4q^{11}(1-p^3)^4$$

$$P(Y_5) = 2673p^5q^{10}(1-p^3)^5 + 330p^5q^{10}(1-p^3)^4$$

$$P(Y_6) = 3915p^6q^9(1-q^3)^5 + 1080p^6q^9(1-p^3)^4 + +10p^6(1-p^3)^3$$

$$P(Y_7) = 4050p^7q^8(1-q^3)^5 + 2295p^7q^8(1-p^3)^4 +90p^7q^{11}(1-p^3)^3$$

$$P(Y_8) = 2835p^8q^7(1-p^3)^5 + 3240p^8q^7(1-p^3)^4 + +360p^8q^7(1-p^3)^3$$

$$P(Y_9) = 1215p^9q^6(1-p^3)^5 + 2970p^9q^6(1-p^3)^4 +810p^9q^6(1-p^3)^3 + 10p^9(1-p^3)^2$$

$$P(Y_{10}) = 243p^{10}q^5(1-p^3)^5 + 1620p^{10}q^5(1-p^3)^4 +1080p^{10}q^5(1-p^3)^3 + 60p^{10}q^5(1-p^3)^2$$

$$P(Y_{11}) = 405p^{11}q^4(1-p^3)^4 + 810p^{11}q^4(1-p^3)^3 +150p^{11}q^4(1-p^3)^2$$

$$P(Y_{12}) = 270p^{12}q^3(1-p^3)^3 + 180p^{12}q^3(1-p^3)^2 +5p^{12}(1-p^3)$$

$$P(Y_{13}) = 90p^{13}q^2(1-p^3)^2 + 15p^{13}q^2(1-p^3)$$

$$P(Y_{14}) = 15p^{14}q^1(1-p^3)$$

$$P(Y_{15}) = p^{15}$$

Зависимость математического ожидания числа правильных ответов от сложности вопроса теста показана на графике.

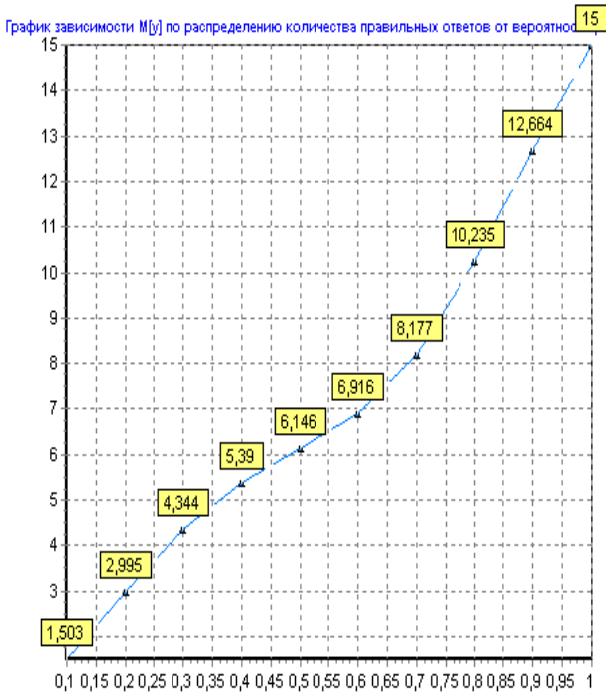


Рис. 1. График зависимости M(y) по распределению количества правильных ответов от вероятности

На основании данного графика можно решить обратную задачу определения сложности вопроса теста для заданного показателя эффективности. Например, если разработчик теста планирует получать семь правильных ответов из возможных пятнадцати ответов, то ему следует включать такие вопросы в тест, чтобы вероятность правильного ответа была равна 0.69.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Кирий В. Г., Чан Ван Ан. Полиномиальная вероятностная модель независимого процесса тестирования // Вестн. ИрГТУ. 2008. № 4. С. 253–255.
2. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М. : Наука, 1964. 412 с.

Белякова А.Ю., Бузина Т.С.,
Вашукевич Е.В., Иваньо Я.М.

УДК 519.863:631.145:551.5

МОДЕЛИ КЛАСТЕРОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ С УЧЕТОМ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ПРИРОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Во многих странах, где взвешенная государственная политика поддержки предпринимательства направлена на достижение социально-экономического роста, постепенно происходит процесс активного взаимодействия малых, средних и крупных предприятий. Один из основателей теории кластеров, профессор Гарвардской бизнес-школы М.Портер (Michael E.Porter), определяет кластер, как географически сконцентрированную группу взаимосвязанных компаний, специализированных поставщиков услуг фирм в родственных отраслях, а также связанных с их деятельностью организаций (например, университетов, агентств по стандартизации, торговых объединений), конкурирующих, и при этом – ведущих совместную деятельность [3].

О масштабах распространения и разнообразии кластеров можно судить по индустриально развитым государствам. Так, в США успешно функционируют кластеры по выпуску ковров, офисной мебели, медицинской техники, ювелирных изделий и т.д.

В одной из 13 испанских автономий – Каталонии, кластеры дают около 20% внутреннего валового продукта и 40% промышленного экспорта страны. Среди кластеров, расположенных на ее территории, есть объединения по производству игрушек из дерева, бижутерии, вязаных изделий, выделанной кожи, готового мяса, сельскохозяйственных машин, издательский кластер, кластер по выпуску бытовой электроники, мебельный кластер.

Португалия имеет три кластера только в рамках виноделия, а также кластер по производству пробок для закупорки бутылок. В Германии с 1995 г. действует программа создания биотехнологических кластеров Bio Regio, широко известен кластер по производству встроенных кухонь и другой техники. В Финляндии развит лесопромышленный кластер, куда входит производство древесины и древесных продуктов, бумаги, мебели, полиграфического и связанного с ним оборудования [3].

Кластерная модель интеграции предприятий успешно применяется и в странах СНГ. В Подольском регионе Украины (Хмельницкая, Винницкая и Тернопольская области) созданы и успешно работают первые отраслевые кластеры - объединения родственных предприятий, финансовых, исследовательских и других организаций [3].

Следует отметить, что в республике Казахстан разработана и внедряется правительственная программа создания кластеров, среди которых следует выделить хлопковый кластер. Большой потенциал имеют зерноперерабатывающая и мясомолочная промышленность, и сложились благоприятные условия для создания плодоовощного кластера.

Что касается сельского хозяйства, следует отметить, что в настоящий момент и теоретическая, и практическая части кластеризации в агропромышленном производстве являются малоизученными. Исследования показали, что формирование агропромышленных кластеров в современных условиях может быть основой построения конкурентоспособной экономики региона. Проблема создания агропромышленных кластеров прежде всего связана с наличием множества разрозненных хозяйств различных категорий, руководствующихся исключительно собственными интересами.

Агропромышленный кластер можно определить как территориально локализованную интегрированную структуру, организованную на базе

промышленного и сельскохозяйственного производства, целью которой является создание индустриальной основы для повышения конкурентоспособности и производительности продовольственной сферы региона, перераспределения добавленной стоимости и комплексного использования социально-экономического потенциала территории.

Возможность и характер развития интеграционных процессов в сфере производства продовольствия определяются особенностями аграрного сектора. К таким особенностям следует отнести в первую очередь естественный фактор. Если в промышленности процесс производства приводит к изменению вида и формы предмета труда, то образование потребительных стоимостей в сельскохозяйственном производстве зависит от непосредственного влияния климатических и других условий. Использование в качестве основного средства производства земли обуславливает дискретность сельскохозяйственного производства и значительную его территориальную рассредоточенность. Полученный продукт в сельском хозяйстве не является конечным этапом технологического процесса производства продукции. Готовая сельскохозяйственная продукция предъявляет определенные специфические требования к ее транспортировке, хранению и переработке.

Кроме естественных, организационных и технологических факторов, процессы интеграции в сфере производства продовольствия сопряжены с необходимостью учета и рыночных условий, которые обусловлены низкой привлекательностью сельскохозяйственного производства по сравнению с другими отраслями.

Эти особенности аграрного сектора создают принципиальные отличия в технологии, масштабах, размещении и организации производства сельскохозяйственной продукции от идентичных процессов в других отраслях промышленности, что является причиной поиска наиболее оптимальной формы интегрированного взаимодействия в каждом конкретном случае.

Существуют различные классификации кластеров, комбинации которых в той или иной мере свойственны любому из них. Для агропромышленного сектора наиболее актуальными являются следующие группировки предприятий:

- географическая, в которой построение кластеров четко связано с определенной территорией, начиная от местных кластеров (плодоконсервный) до подлинно глобальных, например, аэрокосмический кластер;
- горизонтальная, в которой несколько отраслей/секторов могут входить на равных правах в более крупный кластер;
- вертикальная, которая включает в себя кластеры с иерархической связью смежных этапов производственного или инновационного процесса;
- технологическая, которая отражает совокупность производств, связанных одной и той же технологией;
- фокусная - кластер фирм, сосредоточенных вокруг одного центра – лидирующего крупного предприятия, НИИ или университета.

Локализованность кластера означает, что он имеет достаточно определенные границы. Для России характерно выделение кластеров в пределах административно-территориальных единиц (республик, краев, областей). Это обусловлено относительно высокой управляемостью отраслями, подотраслями, видами деятельности на региональном уровне по сравнению с общенациональным.

Анализируя ситуацию, сложившуюся в стране за период 1990-2008 гг., можно сказать, что в производстве растениеводческой продукции ведущее место занимают сельскохозяйственные предприятия. В животноводческой отрасли основная часть поголовья крупнорогатого скота сосредоточена у населения. Значительная доля молока производится также населением.

Очевидно, что в этих условиях необходимо использовать потенциал производства продукции хозяйствами населения. Поэтому требуется создание комплекса мер по эффективному привлечению молока и мяса, производимого личными подсобными хозяйствами, и стимулированию их деятельности в этом направлении.

Исходя из реальных условий сельскохозяйственного производства, переработки продукции и сбыта, можно выделить два направления интеграции сельскохозяйственных предприятий:

- стабильно работающие предприятия-переработчики формируют вокруг себя хозяйства, которые обеспечивают его сырьем для переработки;

- товаропроизводители различных категорий хозяйств, включая перерабатывающие предприятия, объединяются для совместного функционирования.

В работе предложена модель кластера для производства, переработки и реализации сельскохозяйственной продукции по результатам анализа состояния сельскохозяйственного производства и переработки Иркутской области (рис.1). Кластер

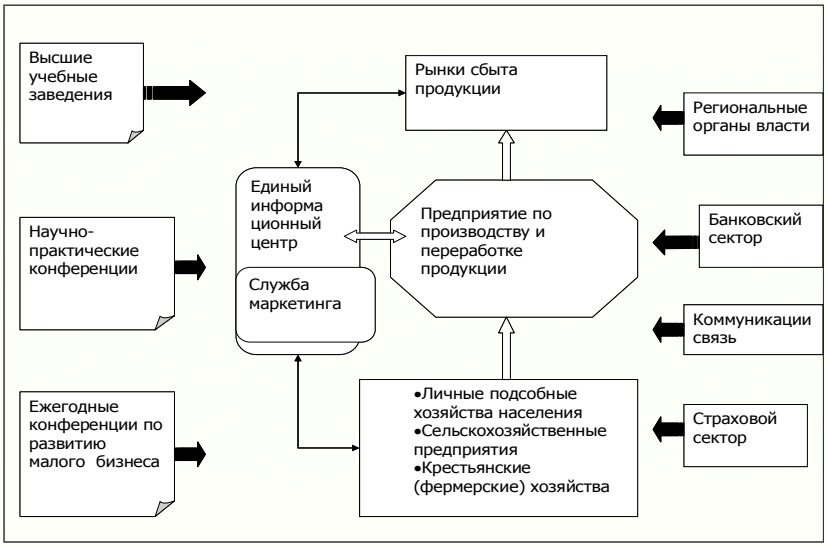


Рис. 1. Кластер сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий

сформирован по сетевому принципу: общности рынка ресурсов, поставщиков и потребителей. Участниками модели являются товаропроизводители различных категорий хозяйств, прежде всего личные подсобные хозяйства населения, и предприятие, выступающее как переработчик и организатор реализации товара. Координирующее звено представляет собой единый информационный центр, включающий маркетинговую службу, созданный на базе перерабатывающего предприятия. Связка предприятий, рынков сбыта и информационной службы является основным, центральным ядром кластера. Внешнюю среду кластера составляют научные и образовательные учреждения, органы региональной власти, представители банковских, страховых, коммуникационных подразделений.

Очевидно, что основой успешного и эффективного функционирования агропромышленного кластера является устойчивость сельскохозяйственного производства, на которую в значительной мере оказывают влияния природно-климатические факторы. Поскольку ведение сельского хозяйства осуществляется в условиях риска и неопределенности, особое значение приобретает предвидение возможных трудностей и планирование мероприятий с целью уменьшения последствий неблагоприятного влияния внешней среды на производство.

Оптимальное управление хозяйственным риском должно сочетать в себе стратегическое и тактическое управление. Стратегические решения выражаются в выборе базовых параметров управляемой системы, максимально адаптированных к условиям неопределенности и стохастичности, а тактические - позволяют оперативно реагировать на изменение условий хозяйствования.

При решении стратегических задач целесообразно использовать оптимизационные методы. Экономико-математические модели, адекватные реальным условиям производства, должны учитывать стохастическую природу воспроизводственного процесса в аграрной сфере, изменчивость погодных, экономических и социальных условий.

В простейшем случае для оптимизации функционирования кластера сельскохозяйственных предприятий применимы линейные оптимизационные модели. Математическая модель кластерного объединения по своей форме близка к модели сочетания отраслей в сельскохозяйственном предприятии. Вместе с тем, в отличие от нее, в модели кластера в качестве переменных величин, подлежащих определению, будут выступать не только площади культур и поголовье разных групп и видов животных, но и объемы сельскохозяйственной продукции, производимой для реализации, что влияет на размеры перерабатывающих отраслей. Поэтому в модель включены ограничения, увязывающие производство и переработку.

При создании кластеров следует учитывать то, что сельское хозяйство относится к числу отраслей, наиболее подверженных риску, зависимому от погодных условий, результатами которых могут быть стихийные явления. Очевидно, что в модели кластера экстремальные природные явления оказывают влияние на блок – производство, и косвенно – на переработку сельскохозяйственной продукции. Так, вследствие весенних паводков и половодий сокращаются площади зерновых и кормовых культур, что, в свою очередь, повлечет

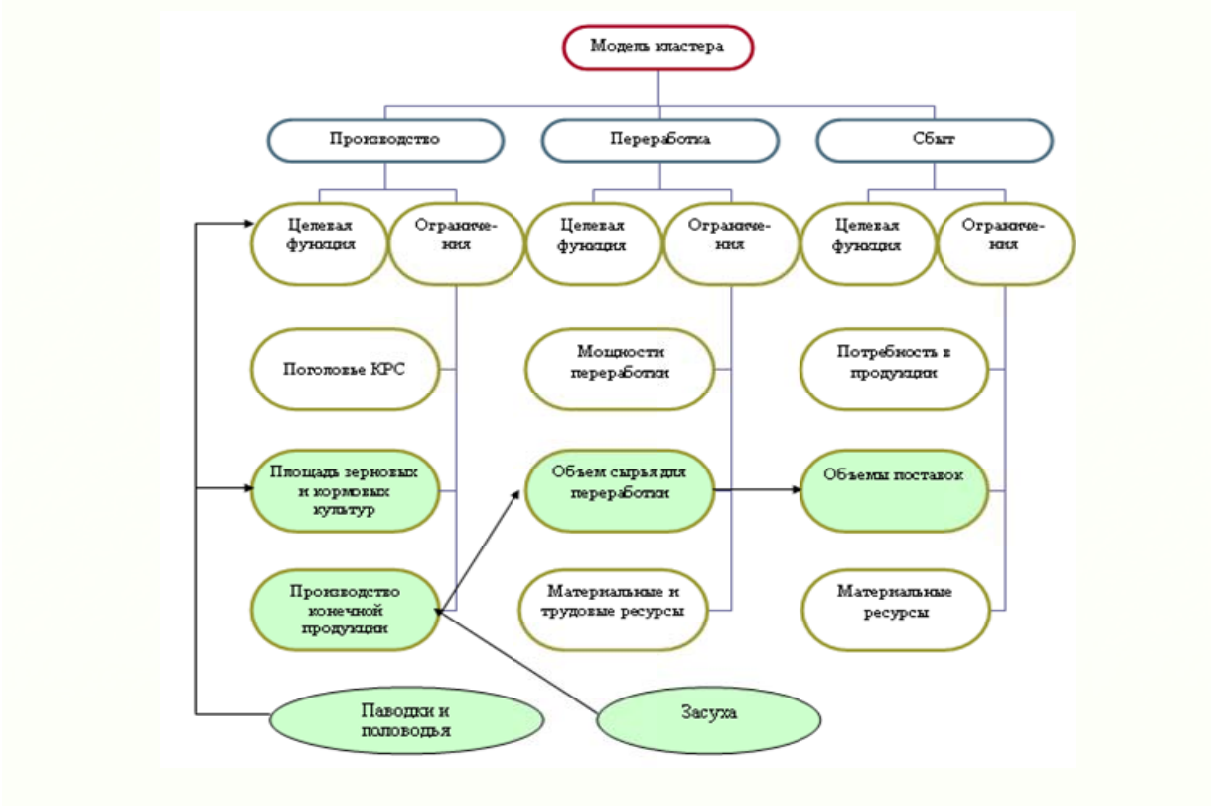


Рис. 2. Схема учета влияния экстремальных природных явлений в оптимизационных моделях

за собой сокращение валового производства продукции растениеводства и животноводства. Помимо этого, данное природное явление влияет и на коэффициенты при целевой функции, если таковыми являются затраты на 1 га площади. Влияние засухи сказывается на снижении урожайности зерновых и кормовых культур и сокращении производства конечной продукции. Другими словами, необходимо решить задачу математического программирования с неопределенными параметрами (рис.2).

В пределах страны ежегодные потери от гидрометеорологических явлений, к которым относятся: засухи, паводки, половодья, заторы, зажоры, ливневые осадки, заморозки, раннее выпадение снега, исчисляются сотнями миллиардов рублей. В частности, в Иркутской области, ущербы от влияния экстремальных природных явлений составляют ежегодно 200-400 миллионов рублей. В ранжированном ряду природных стихий по нанесению ущербов сельскому хозяйству региона первые места занимают засухи, дождевые паводки и весенние половодья.

В работе [4] экстремальные природные явления оценивались с помощью двухуровневой модели, то есть из многолетних рядов характеристик природного явления были выделены события, согласно критериям. Значения многолетних рядов экстремальных характеристик, превышающие или не превышающие некоторый критический уровень, отнесены к природным событиям.

Критерием оценки агрономической засухи является критическое значение урожайности, вычисляемое по формуле

$$x_k = 0,8\overline{x} \qquad (1)$$

где $\overline{x}$ - среднее значение ряда.

В гидрологической практике для оценки явления используется отметка, характеризующая его опасность

$$x \geq x_k, \qquad (2)$$

где $x_к$ – критический расход воды.

В работах [1,2,6] предложены методики для оценки событий по формулам (1) и (2), которые применены на территории Иркутской области. По различным пунктам рассчитывалось количество событий и определялось усредненное по территории значение вероятности превышения природной характеристики. Затем построены кривые распределения найденных вероятностей превышения событий.

Так, вероятности событий засухи составляют в остепненной зоне 30,6%; в подтаежно-таежной– 21,4%; в лесостепной зоне – 13,7%. Для дождевых паводков вероятности событий составили 16%; для весеннего половодья – 24%. Таким образом, при учете трех природных явлений, при-

чиняющих экономический ущерб сельскому хозяйству, частота их возникновения возрастает.

Для того чтобы определить границы территорий, подверженных влиянию природных стихий, выполнено районирование территории Иркутской области по влиянию гидрометеорологических явлений на сельское хозяйство региона

На первом этапе определены районы с развитым сельским хозяйством. На втором этапе по данным, предоставленным отделом специального назначения Министерства сельского хозяйства Иркутской области, выделены районы, подверженные гидрометеорологическим явлениям. По данным об экстремальных природных явлениях, наблюдаемых на территории Иркутской области, определены однородные территории по влиянию на сельскохозяйственное производство наводнений и засух. Построены карты, на которых показаны районы с развитым сельским хозяйством, подвергающиеся влиянию дождевых паводков, весеннего половодья и агрономической засухи [1].

Районирование сельскохозяйственных территорий по воздействию природных стихий имеет значение для выделения сельскохозяйственных кластеров на территории области. При определении границ кластеров в качестве критериев используются виды производимой сельскохозяйственной продукции, категории хозяйств и виды перерабатывающих предприятий. Помимо этого, при объединении предприятий в кластеры учитываются расстояние между объектами, закупочная цена на продукцию, стоимость грузоперевозок, традиции, состояние дорожной сети и другие признаки.

Объектами кластеризации выступают сельские населенные пункты, личные подсобные хозяйства которых производят значительную долю молока и мяса. Объединение объектов в кластеры проводится по следующим видам продукции – молоко, мясо и зерно.

На основе минимизации расстояний и состояния дорожной сети определены группы пунктов, которые потенциально являются наиболее близкими к перерабатывающим предприятиям. По результатам кластеризации сформированы потенциально возможные сельскохозяйственные кластеры в регионе (рис.3).

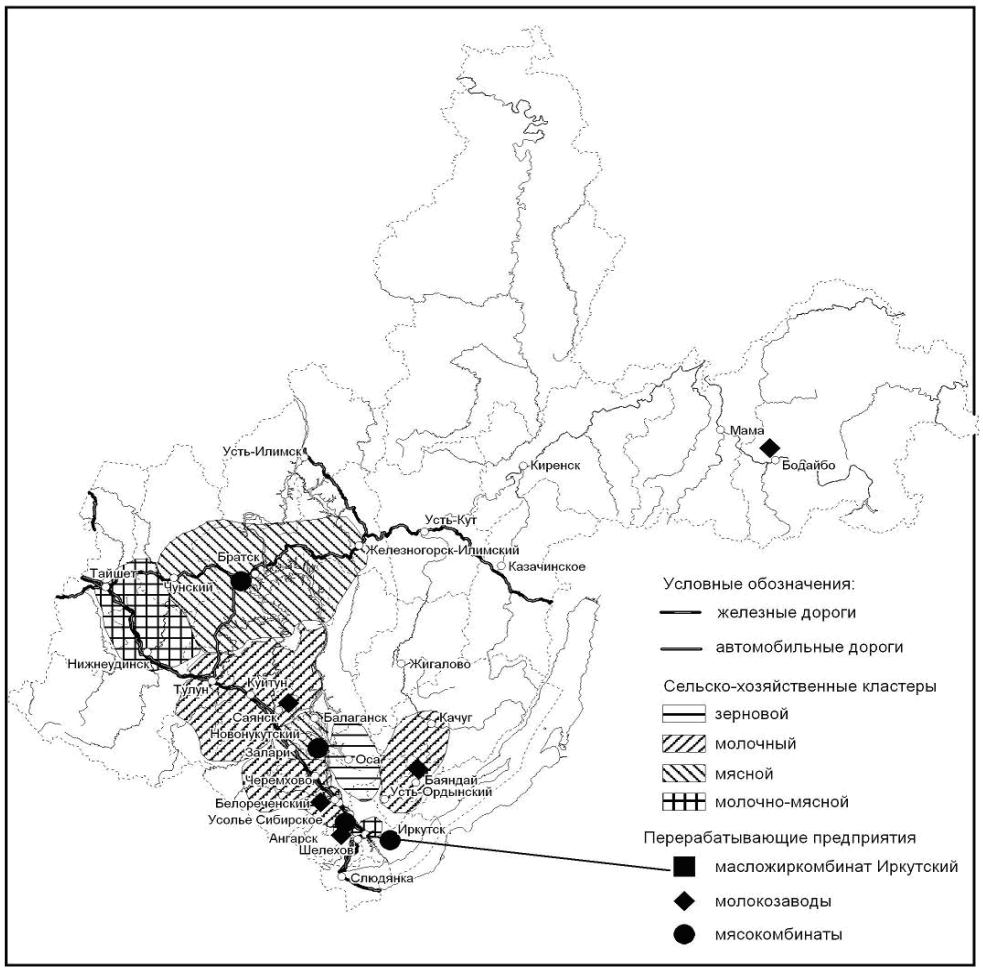


Рис. 3. Выделенные сельскохозяйственные кластеры различных видов для Иркутской области

Наиболее значимыми из них являются мясной кластер предприятий Братского района, молочный кластер товаропроизводителей Зиминского, Куйтунского и Тулунского районов, зерновой кластер различных категорий хозяйств Нукутского, Балаганского, Заларинского районов.

На основе районирования, связанного с кластеризацией и проявлением экстремальных событий, определена степень влияния различных природных стихий на сельскохозяйственные кластеры области. Другими словами, работа сельскохозяйственного кластера связана с погодными рисками. В частности, засуха оказывает влияние на кластеры в Братском, Нукутском, Балаганском и Заларинском районах. Влияние же паводков и половодий существенно сказывается в Ангарском районе, а три гидрометеорологических явления встречаются в Усольском и Черемховском районах, где возможно создание молочного кластера. Следовательно, при создании моделей работы кластеров следует учитывать возможные риски, связанные с этими явлениями.

В работах [1,2,5] рассматривалось моделирование сельскохозяйственного производства с учетом экстремальных природных явлений. При этом была предложена задача стохастического программирования, которая позволяет выбрать наилучший план:

$$P[\max(\min) f(X) = CX - DX] \geq p\,, \qquad (3)$$

$$P[A - A_1 X \leq (\geq) B - B_1] \geq p,\ \mathrm{X} \geq 0\,, \qquad (4)$$

$$\mathrm{X} \geq 0 \qquad (5)$$

где X - вектор, удовлетворяющий системе ограничений, C – вектор-строка, B – вектор-столбец, A – матрица размерности $m \times n$, p – заданная вероятность превышения некоторого критического уровня, $D=(d_1, d_2, \ldots, d_n)$ – вектор приведенных коэффициентов ущербов, A_1 – матрица, учитывающая влияние на коэффициенты левых частей ограничений экстремальных явлений, B_1 - вектор-столбец, ограничивающий использование ресурсов.

В работе [1] на основе задачи математического программирования (3)-(5) предложена модель для решения частных задач с учетом ущербов в целевой функции и детерминированными ограничениями и модель, в которой правые части ограничений являются вероятностными, а остальные – определенными. Эти модели реализованы для задач оптимизации сельскохозяйственного производства с учетом паводков и половодий для одного из хозяйств Иркутской области.

Ниже приведена другая задача - с вероятностными коэффициентами в левых частях ограничений

$$\max(\min) f(X) = \sum_{j=1}^{n} c_j x_j\,, \qquad (6)$$

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij}(P) x_j \leq (\geq) B_i\,,\ i = \overline{1, \mathrm{m}}\,, \qquad 7)$$

$$x \geq 0\,, \qquad (8)$$

где x_j – искомые переменные; a_{ij} – матрица коэффициентов при неизвестных; B_i- вектор-столбец, P - вероятность превышения, величина которой не выше критической вероятности $P_к$, соответствую-

Таблица 1

Варианты моделей выделенных сельскохозяйственных кластеров

№ п.п.	Муниципальные образования	Вид кластера	Экстремальные природные явления	Вид модели
1	Ангарский, Шелеховский	Мясной, молочный	**Весеннее половодье** или **дождевой паводок**	Задача стохастического программирования с детерминированной целевой функцией и вероятностными ограничениями
2	Балаганский, Заларинский, Нукутский Баяндаевский, Боханский Братский	Зерновой Молочный Мясной	**Агрономическая засуха**	Задача стохастического программирования с детерминированной целевой функцией и вероятностными коэффициентами в левых частях ограничений
3	Зиминский, Иркутский Усольский, Черемховский	Молочный	**Засуха**, **дождевые паводки** , **весеннее половодье**	Задача стохастического программирования с детерминированной целевой функцией и вероятностными ограничениями

щей переходу значения в событие. Задачи (6)-(8) применимы для моделирования сельскохозяйственного производства на территориях проявления засух.

Рассмотренные задачи могут быть использованы как при влиянии на сельскохозяйственное производство одного, так и множества природных явлений.

На основе выделения на территории Иркутской области кластеров сельскохозяйственных предприятий, в таблице 1 предлагаются возможные варианты оптимизационных моделей.

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

На территории Иркутской области можно выделить мясные, молочные и зерновые кластеры, по критериям минимизации расстояний до пунктов переработки и состояния дорожной сети.

На основе построенных карт по влиянию засух и наводнений на сельскохозяйственное производство, предложены различные варианты моделей выделенных кластеров.

В основу этих моделей положена задача математического программирования с учетом экстремальных природных явлений, которые имеют стохастическую природу.

В работе предложены различные варианты стохастических моделей для оптимизации выделенных сельскохозяйственных кластеров.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Белякова, А.Ю. Изменчивость засух, паводков и половодий, формирующихся на сельскохозяйственных территориях Иркутской области/ А.Ю. Белякова, Е.В. Вашукевич // Сборник статей международной научно-практической конференции посвященной 75-летию образованию ИрГСХА «Климат, экология, сельское хозяйство Евразии».- Иркутск, НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2009. – С. 619-627.
2. Белякова, А.Ю. Модели оптимизации производства сельскохозяйственной продукции со статистическими оценками наводнений и засух / А.Ю. Белякова, Е.В. Вашукевич, Е.С. Труфанова //Современные технологии. системный анализ. Моделирование. ИрГУПС.- 2008.-спецвыпуск-С. 152-158.
3. Бузина, Т.С**.** О применении оптимизационных моделей в задаче создания кластеров сельскохозяйственных предприятий Восточно-Сибирского региона / Т.С**.**Бузина // Труды 12 Байкальской Всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении». – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2007. – Ч.1. – С.271-279.
4. Вашукевич Е.В. Статистическая оценка влияния факторов на агрономическую засуху /Е.В. Вашукевич //Сборник материалов международной научно-практической конференции «Совместная деятельность сельскохозяйственных товаропроизводителей и научных организаций в развитии АПК Центральной Азии». – Иркутск, 2008. – С 89-94.
5. Иваньо Я.М. Об одной модели оптимизации сельскохозяйственного производства с учетом природных событий /Актуальные вопросы развития АПК (материалы научно-практической конференции ИрГСХА, 12-16 февраля 2007 г.). - Иркутск: Изд-во ИрГСХА, 2007. С. 84-87.
6. Иваньо Я.М. Экстремальные природные явления: методология, моделирование и прогнозирование. - Иркутск: Изд-во ИрГСХА, 2007. – 267 с.

Анисимов М.М.

УДК 519.633.6

РАСШИРЕНИЕ СЕТЕЙ ВАН-ХАО ДЛЯ АНАЛИЗА «СЛОЖНЫХ» ПРОЦЕССОВ

Введение

В новейшей истории развития Российской экономики 2008 год стал одним из самых сложных. С сентября под воздействием углубляющегося глобального кризиса, усиления оттока капитала с развивающихся рынков и падения цен на экспортные товары состояние российского финансового рынка стал определять кризис доверия. Российский фондовый рынок, как и рынки других стран, испытал масштабное снижение котировок,

у ряда кредитных организаций возникли проблемы с ликвидностью и исполнением текущих обязательств, напряженная ситуация сложилась на межбанковском рынке.

Развитие кризисных явлений могло реально привести к панике вкладчиков и клиентов банков и опасности перерастания кризисных явлений в системный социально-экономический кризис. В связи с этим снова резко выросла актуальность задач по построению надлежащей системы по управлению рисками и прогнозирования развития макроэкономических событий.

Традиционный подход [1] использует в качестве рабочих моделей ряд статистических тестов, однако снова необходимо подчеркнуть, что в этих моделях, несмотря на возможную строгость математической формулировки задачи, результат моделирования может зависеть от субъективных предпочтений эксперта в выборе метрики, базовых шкал, коэффициентов уравнений и т.д. Более того, формальные методы оценки рисков во многих случаях не могут дать однозначных рекомендаций. Поэтому, наряду с формально-экономическими методами, обязательным является применение экспертных методов прогнозирования и соответствующих методов из теории экспертных оценок [2,3].

Таким образом, альтернативой классическим статистическим моделям и сопряженным с ними VAR [1] методам может стать сетевой подход. С помощью сетей удобно описывать сложную семантическую конструкцию системы, присущую социальным, экономическим и финансовым процессам. В этом случае такие сети иногда называются семантическими или когнитивными.

Граф такой сети может быть задан двумерной матрицей, в этом случае говорят о семантической или когнитивной карте, описывающей систему.

Пример подобного рода дедуктивных рассуждений в виде графа сети Ван-Хао [4] и семантической карты представлен на рис.1, рис. 2. Происходящие в сетях события фиксируют изменения в системе и в свою очередь служат причинами других событий. Такая система будет строиться на основе сетевой модели Ван-Хао, одного из самых мощных математических инструментов моделирования систем с ярко выраженными процессами, взаимодействующими между собой. Аппарат сетей Ван-Хао позволяет наращивать сеть и проводить качественный анализ влияния изменений характеристик системы, которые являются следствием намеренных возбуждений некоторых событий. Сеть отражает реальную действительность с точки зрения аналитика и служит для целей прогнозирования развитий событий.

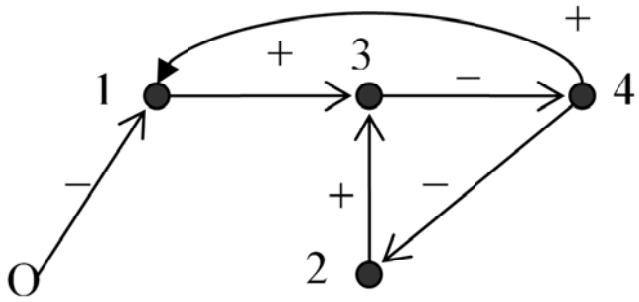


Рис. 1. Событийная сеть Ван-Хао для записи рассуждений о причинно-следственных связях между событиями

	1	2	3	4
1			+	
2			+	
3				−
4	+	−		

Рис. 2. Когнитивная карта сети Ван-Хао, содержащая значения корреляционных функций

Для моделирования экономических и финансовых процессов строится формальная система, которая позволит выделить начальный и повторяющийся фрагменты, что предоставит возможность анализа распространения фронта событий, а также других потенциально возможных волновых явлений, происходящих в системе. Любопытно отметить, что аналитические статьи в журналах, газетах, собственно выступления аналитиков могут быть описаны в виде соответствующих сетей Ван-Хао. В связи с широким распространением этих сетей, возникла необходимость их формализации[5].

Сетевая модель Ван-Хао

Формально WN может быть задана графом $G(WN) \supseteq X \times X$, где $X = \{x_1, \ldots, x_n\}$ - конечный алфавит характеристик (сущностей), в которых происходят события $\{\varphi_{x_1}, \ldots, \varphi_{x_n}\}$, $\times$ – декартово произведение. Каждое событие φ_{x_i} связано с из-

менением соответствующей сущности $x_i \in X$. Дуга графа $\langle x_i, x_j \rangle$ интерпретируется как утверждение о причинно-следственной связи между событиями φ_{x_i} и φ_{x_j}, и может быть задана логическим утверждением, имеющим вид рассуждения (Если в сущности x_i происходит событие φ_{x_i}, то оно вызывает событие φ_{x_j} в сущности x_j). Каждой вершине $x_i \in X$ может быть соотнесена функция $\varphi_{x_j} = \psi(\varphi_{x_i})$, которая называется пусковой функцией.

Для каждой сущности x рассматривается пара утверждений о противоположных событиях. $\varphi_x = \{0,1\}$. Семантика этих событий может быть весьма разнообразна: возбуждение-торможение, виновность-невиновность и т.д. В сети Ван-Хао пусковые функции называются корреляционными. Корреляционные функции существуют только двух типов, условно называемые положительной и отрицательной корреляцией.

При формализации сетей Ван-Хао выделяют следующие проблемы:

1. Противоречивость. Появление события является следствием двух различных причин. При возникновении такой неоднозначности эксперту рекомендовалось выбрать одну из двух причинно-следственных связей.

2. Цикличность сети. Такая сеть вызывала сложность в интерпретации поведения из-за появления в сети повторяющейся последовательности событий. Рассматривалась обычно конечная последовательность событий, где начальным считалось событие возбуждающее сеть, а конечным первое повторяющееся событие.

3. Асинхронность. Сложность в логической интерпретации противоречивости и цикличности связана с неопределенностью времени задержек реакций сущностей в сети. На самом деле, в реальных системах, для которых моделью поведения служит сеть Ван-Хао, времена реакций не только неизвестны, но меняются в зависимости от разных обстоятельств. Системы, в которых времена генерации событий не привязаны к общесистемному времени (не синхронизированы) называются асинхронными.

В представленной статье предлагается одна из возможных формальных моделей поведения сети, снимающая ограничения по противоречивости, цикличности и асинхронности.

Исследуемая модель сети Ван-Хао базируется на следующих принципах:

1. Поведение сети Ван-Хао задается логическими конструкциями, т.н. процессорной сети, которая является развитием сети Петри. Такая логическая конструкция называется событийной сетью (EN-Event Network). EN генерирует параллельные потоки событий.

2. Вводится специальный асинхронный автомат Малера, который управляется событийной сетью EN. Это позволяет проводить удобный анализ поведения системы в пространстве состояний автомата [6,7]

Логическая модель поведения событийной сети.

Для построения конструктивного механизма управления введем формальное описание в виде Joiner-сети [8,9]. Далее будет использоваться нотация, принятая в сетях Петри (только нотация, но не сам формализм) [10].

На рис 3 представлен пример типового логического элемента сети. Он состоит из входных позиций φ_1, φ_2, выходных позиций φ_3, φ_4 и перехода ψ.

Позиции содержат информацию о произошедших событиях: $\varphi_i = 1$ если произошло событие φ_i, иначе $\varphi_i = 0$. Каждому переходу соответствует пусковая функция ψ. Она выполняется процессором «С» и запускает срабатывание перехода, в результате чего возникают выходные события. Таким образом, каждому переходу соответствует свой процессор. Формально поведение элемента описывается следующими булевскими уравнениями:

$$\psi(t+1) = (\varphi_1(t) \vee \varphi_2(t)) \,\&\, \overline{\varphi_3(t)} \,\&\, \overline{\varphi_4(t)}$$

$$\varphi_1(t+1) := 0; \varphi_2(t+1) := 0$$

$$\varphi_3(t+1) := 1; \varphi_4(t+1) := 1$$

Содержательная интерпретация уравнений заключается в следующем. Пусковая функция срабатывает ($\psi = 1$), если произошло хотя бы одно события (либо φ_1, либо φ_2, но не оба вместе) и выходные позиции пусты. ($\varphi_3 = 0, \varphi_4 = 0$). Пустота выходных позиций означает, что выходные события, порожденные переходом, были использованы в предыдущих тактах для запуска других переходов. (см. уравнение 1). Существенно, что все выходные события возникают одновременно (см. уравнения 2, 3).

Сеть, состоящая из элементов с таким поведением, называется Joiner-сетью и отличается от сети Петри тем, что в сетях Петри для срабатыва-

ния пусковой функции требуется наличие (конъюнкция) всех входных событий. Joiner-сеть (JN) не ожидает совершения всех входных событий, а реагирует на любое из них. Каждый элемент JN срабатывает автономно (асинхронно), если возникает условие $\psi = 1$ для уравнения 1. По сути дела JN есть система логических уравнений для всех элементов, что позволяет разработать эффективную программу моделирования.

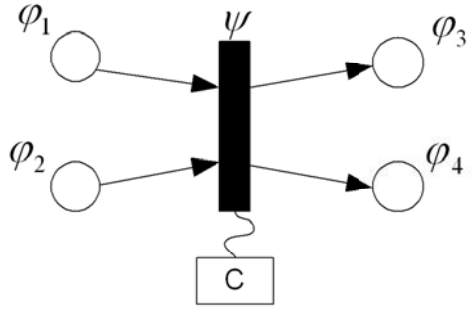


Рис. 3. Элемент тормозящей Joiner-сети (JN)

Процессорная интерпретация и асинхронный автомат Малера

Введенная выше Joiner-сеть (JN) позволяет достаточно просто описать процесс порождения параллельных потоков событий при возбуждении любой сущности, но совершенно не позволяет анализировать эти потоки, так как события происходят мгновенно и нигде не запоминаются. В каком-то смысле появление событий хаотично. Таким образом, возникает естественное желание ввести «историческую память» событий.

В этом случае возникает процессорная модель порождения. Идея такой модели заключается в том, что пусковые функции, которые генерирует Joiner-сеть, запускают переходы некоторого автомата, состояния которого и являются исторической памятью.

Каждую сущность сети $x_i \in X$ можно рассматривать как процессор C_i, генерирующий события φ_{C_i}. Запуск такого процессора (генератора) производится входным событием, на которое он отвечает выходным событием. В реальности процессоры различны по своей природе, собственно как и исходные сущности, которые генерируют изменения событий.

Таким образом, формальный переход от рассуждающей сети WN к процессорной сети происходит по правилам замены интерпретации. Для всякой пары процессоров C_iC_j соответствующих вершинам сети WN *i-j* задается распределенная пусковая функция $\psi_{C_iC_j}$:

$$(C_i \xrightarrow{+} C_j) \Rightarrow$$

$$(C_i \xrightarrow{\psi^{+}_{C_iC_j}} C_j);\ (C_i \xrightarrow{-} C_j) \Rightarrow$$

$$(C_i \xrightarrow{\psi^{-}_{C_iC_j}} C_j)$$

Переход к процессорной интерпретации из сетей Ван-Хао в соответствии с правилами дает удобство наблюдения за поведением системы. Взаимно-однозначное отображение событийной сети в автоматную сеть позволяет облегчить проведение анализа реальных сетей.

Распределенная процессорная сеть генерирует последовательности событий, которые носят названия сценариев. Заметим, что в связи с тем, что сеть содержит цикл, то все сценарии состоят из бесконечно повторяющиеся последовательности событий [11]. Введенные преобразования позволяют ввести понятие автоматной интерпретации.

Добавим в распределенную процессорную сеть «историческую память», в которой запоминаются события, происходящие в сети Ван-Хао. Память вводится для удобства наблюдения за поведением сети и позволяет определять параллельные траектории распространения возбуждений. Память является общей для всех процессоров. Для каждого процессора имеется своя ячейка памяти. Таким образом, «историческая память» представляет собой регистр из ячеек S, где фиксируется состояние каждой процессорной части в определенный момент времени». Если возникает в некотором процессоре С событие φ^{+}_{C}, то в соответствующей ячейке с именем «с», соответствующей процессору С записывается с:=1, а для события φ^{-}_{C} – с:=0. Понятно, что если число процессоров сети равно “n”, то число возможных различных состояний памяти будет 2^n.

Работа процессорной сети с памятью описывается т.н. асинхронным автоматом Малера [6,7]. Простые правила его работы, перехода из состояния St в следующее состояние St+1, иллюстрируются рис. 4. Правила используют пусковые функции в распределенной процессорной сети. Применение правил происходит в соответствии с правилами работы сети Ван-Хао.

Ситуационная сеть

В регистре состояний асинхронного автомата запоминается история произошедших событий, но только на один такт. В следующем такте состояние ячейки может измениться в связи с возникновением события с другой пусковой функци-

ей. Таким образом, формируется граф с вершинами, являющимися состояниями автомата. Граф переходов AAM[6,7] называется ситуационной сетью (SN-Situation Network), так как состояние регистра на самом деле описывает смену ситуаций, которые возникают при возбуждении некоторой сущности. На рис.5 показано, как взаимодействуют событийная сеть с ситуационной сетью. Возбуждение в виде пусковых функций из событийной сети передается в ситуационную сеть SN.

Приведем пример разворачивания ситуаций при возбуждении события в сущности «1» и начальной ситуации S_{10}=1010. (рис.5)

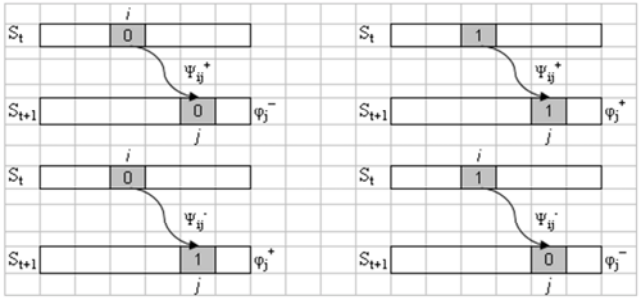


Рис. 4. Правила работы асинхронного автомата Малера с «исторической памятью»

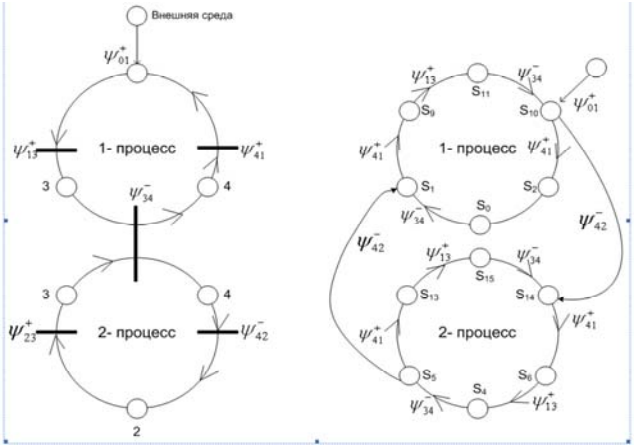


Рис. 5. Взаимодействие событийной и ситуационной сетей при возбуждении внешнего события в сущности «1»: десятичные номера ситуаций соответствуют двоичному номеру регистра состояний (а. Событийная Joiner-сеть, б. Ситуационная сеть (SN) в виде графов перехода AAM)

Ситуационное пространство удобно представить в виде алгебраической решетки [12]. На рис. 6, рис.7 ситуационное пространство представлено алгебраической решеткой двух видов:

1. В виде двухмерной таблицы, так называемой диаграммы Вейча (DW), обычно используемой в проектировании цифровых схем[13]. Такая диаграмма для регистра ситуаций, состоящего из 4-х ячеек для запоминания четырех событий в сети Ван-Хао, изображена на рис. 6

2. В виде 4-х мерного гиперкуба, представленного на рис 7.

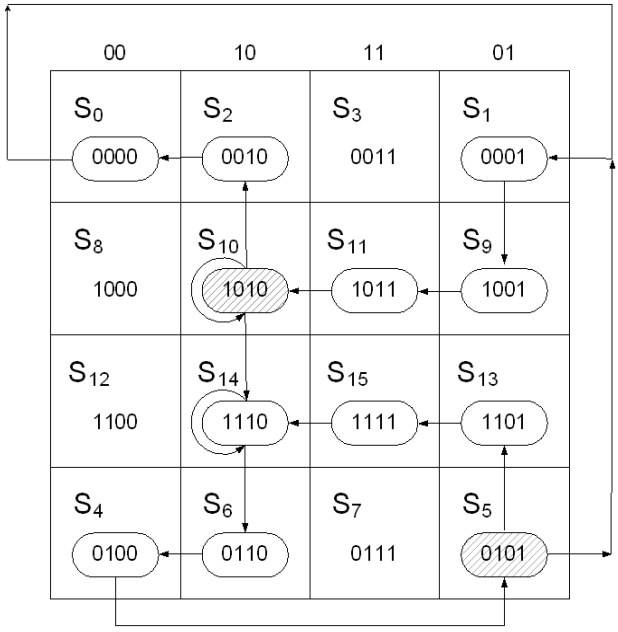


Рис. 6. Два параллельных процесса, порождаемых асинхронным автоматом в ситуационном пространстве, представленном в виде диаграммы Вейча (двумерной таблицы)

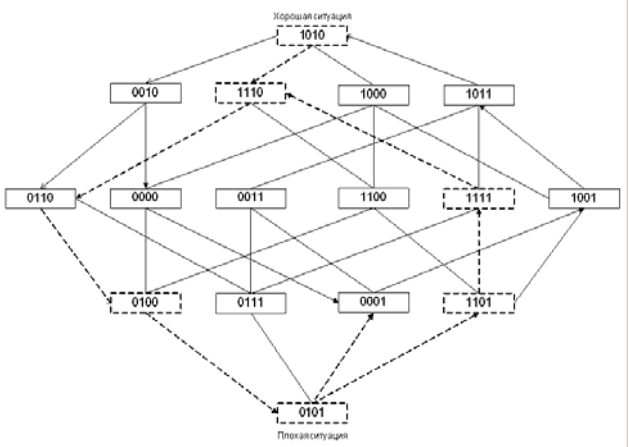


Рис. 7. Два параллельных процесса, порождаемых асинхронным автоматом в ситуационном пространстве, представленном в виде алгебраической решетки на 4-х мерном гиперкубе

Таблица DW представляет собой матрицу, где записываются 2^n возможных состояний (ситуаций). Ячейки таблицы упорядочены так, что каждая ячейка имеет соседние ячейки, отстоящие от нее на расстояние Хемминга [14], равное «1». На рис 6 и рис. 7 показаны параллельные траекто-

рии движения автомата. На рис. 5б каждые предыдущее и последующее состояние различаются ровно в одном двоичном разряде. В таком пространстве ситуаций можно вводить понятия «хороших/плохих» ситуаций, понятия близости и различия, а также осуществлять группировку в ситуационном пространстве.

Таким образом, введенная интерпретация позволяет обобщить сети Ван-Хао, устранив ограничения ацикличности, противоречивости и асинхронности, что является ключевым в «сложных» задачах по моделированию процессов.

Заключение

В работе были рассмотрены некоторые методики анализа и оценки рисков посредством сетевых методов. В частности, осуществлена формализация сетей Ван-Хао и снятие существующих ограничений ацикличности, противоречивости и асинхронности.

Сетевые модели не являются панацеей, во многих случаях более эффектным будет использование традиционных методов статистики. Во многих областях управления рисками сетевые подходы зарекомендовали себя как более рациональное решение и требуются дальнейшие исследования в данной области.

Проблема адекватности при сетевом моделировании вызывает особые трудности и не решена до сих пор. В качестве тестов можно разработать математические модели, однако снова необходимо подчеркнуть, что в этих моделях, несмотря на возможную строгость математической формулировки задачи, результат моделирования может зависеть от субъективных предпочтений эксперта.

Проверка правильности причинно-следственных зависимостей может быть выполнена статистически, однако часто статистические методы сталкиваются с проблемой «Черного лебедя» [15], маловероятного события значительной амплитуды. Возможность учета такого события придает особую ценность сетевому моделированию.

Одной из ключевых проблем для оператора, работающего в социальной, финансовой системе заключается в том, что распределение вероятности событий (например, события рынка акций) приходится восстанавливать по фактическим событиям. Большинство исследований в области рисков, проведенных в последнее время, были ориентированы на математические и экономические детали, в то время как последствия неверного выбора распределения оказали, оказывают, и впредь будут оказывать гораздо более разрушительный эффект, чем неверные математические детали.

Одним из самых знаменитых примеров подобной ошибки стал крах хедж-фонда “Long Term Capital Management”[16]. Именно тогда и произошло «маловероятное значительной амплитуды». Многие полагают, что в обстоятельствах, когда будущее зависит не только от физической вселенной, но и от решений человека, законов не существует, даже вероятностных.

Иными словами, предпосылка о том, что существует генератор событий, который известен, и, поэтому вероятности всех событий, исходящих из генератора, исчислимы, а, следовательно, есть возможность определить риск каждого из них как сумму всех событий превышающих придуманный им порог значений рыночных переменных,- ошибочна. Такой генератор никому не известен и существует только в воображении анализирующего.

Бороться с подобными ситуациями вполне реально посредством подключения дополнительных сетей к основной, исходной сети. Это позволит существенным образом изменить структуру поведения исходной сети и реализовать модель значительных отклонений в рамках сетевой парадигмы.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Cormac, Butler. Mastering Value at Risk [Текст] / B. Cormak. – Prentice Hall, 1999. – 256 p. – Англ.
2. Варшавский, В.И., Поспелов, Д.А. Оркестр играет без дирижера [Текст] / В.И. Варшавский, Д.А. Поспелов. – М.: Наука, 1984. – 208 с.
3. Поспелов, Д. А. Логико-лингвистические модели в системах управления [Текст] / Д.А. Поспелов. - М.: Энергоиздат, 1981. – 232 с.
4. Трахтенгерц, Э.А. Компьютерная поддержка принятия решений [Текст] / Э.А, Трахтенгерц. – М.: Синтег, 1998. – 376 с.
5. Анисимов, М.М. Рассуждающие сети Ван-Хао. Анализ и практическое применение [Текст] / М.М. Анисимов// Вестник компьютерных и информационных технологий. №7 – М.: Издательство Машиностроение, 2009. – с. 33-38.
6. Muller, D.E. Lecture Notes on asynchronous circuits theory [Текст] /D.E. Muller. – Urbana: Univ. of Illinois, 1961. – 245 p.
7. Варшавский, В. И. Автоматное управление асинхронными процессами в ЭВМ и дискретных системах [Текст]/ Варшавский В.И. – . М., Наука, 1986. – 308 с.

8. Новик, К.В. Joiner-сети для моделирования взаимодействующих процессов [Текст] / К.В. Новик // Информационные и математические технологии в науке и образовании, часть 1: Сб. науч. тр./ИСЭМ СО РАН. – Иркутск, 2005. – с. 243-249.
9. Столяров, Л.Н., Новик, К.В. Реализация параллельных процессов с помощью сетей Joiner-net [Текст] /Л.Н. Столяров, К.В. Новик // Информационные и математические технологии: Сб. научных трудов/ИСЭМ СО РАН – Иркутск, 2004. – с. 11-14.
10. Котов, В.Е. Сети Петри [Текст] /В.Е. Котов. – М.: Наука, 1984. – 160 с.
11. Анисимов, М.М. Интерпретации рассуждающих сетей [Текст] / М.М. Анисимов // Информационные технологии в науке, социологии, экономике и бизнесе. Приложение к журналу «Открытое образование». XXXIV международная конференция. IT+SE'08. – М: МГАПИ, 2009. – с. 48-52.
12. Мендельсон, Э. Введение в математическую логику [Текст] / Э. Мендельсон. – М:Наука, 1971, – 322 с.
13. Пухальский, Г.И., Новосельцева, Т.Я. Цифровые устройства [Текст] / Г.И. Пухальский, Т.Я. Новосельцева. – СПб.: Политехника, 1996. – 885 с.
14. Hamming, R. W. Error-detecting and error-correcting codes [Текст] / R. W. Hamming//Bell System Technical Journal, 29(2), 1950. – p. 147-160 – Англ.
15. Nassim, N. T. The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable [Текст] / N.T. Nassim. - Random House, 2007 – 400 с. – Англ.
16. Nicholas, D. Inventing Money: The Story of Long-Term Capital Management and the Legends Behind It [Текст] /D. Nicholas. - Wiley, 2000 – 320 p. – Англ.

КОНФЕРЕНЦИИ И СЕМИНАРЫ

I. 24-30 июня 2009 года в г. Улан-Удэ была проведена IV международная конференция «Проблемы механики современных машин».

Организаторами конференции выступили:

- Министерство образования и науки Российской Федерации;
- Федеральное агентство по образованию;
- Российская Академия наук;
- Научный совет РАН по проблемам машиноведения и технологических процессов;
- Министерство образования и науки Республики Бурятия;
- Восточно-Сибирский государственный технологический университет;
- Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН;
- Иркутский государственный университет путей сообщения;
- Братский государственный университет.

Конференция проводилась при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 09-01-06049, и Программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2010 гг.) РНП 2.1.2/609.

Сотрудниками Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС) были представлены следующие доклады:

Дамбаев Ж.Г., Милованова Е.А., Милованов А.А., Милованов А.И., Гришко Д.В. Поиск новых путей развития транспортной системы.

Димов А.В. Обратные связи в механических колебательных системах. Формы физической реализации.

Ермошенко Ю.Ф., Фомина И.В. Динамическое гашение колебаний в задачах транспортной динамики.

Елисеев С.В., Хоменко А.П. Об устойчивости механических колебательных систем с рычажными связями.

Елисеев С.В., Белокобыльский С.В., Шастин В.И. Возможности настройки и управления динамическим состоянием

Китов Б.И., Мухачев Ю.С., Рябов Е.В. Реализация ускоренного движения сыпучего материала по вибролотку.

Лукьянов А.В., Портной А.Ю., Гарифулин В.Ю., Романовский А.И. Разработка комплекса входного виброконтроля моторвентиляторов электровоза.

Лукьянов А.В., Перелыгин В.Н., Гарифулин В.Ю., Бондарик В.В. Разработка системы термодиагноститки машинного и электрического оборудования электровозов.

Логунов А.С. Колебательные структуры с элементами запаздывания.

Милованова Е.А., Милованов А.А., Милованов А.И. Обоснование подходов к обеспечению поточных исследований динамических характеристик железнодорожного экипажа.

Милованова Е.А., Милованов А.А., Милованов А.И. Стендовое обеспечение исследований на железнодорожном транспорте.

Купцов Ю.А., Новосельцев П.В. Исследование механизма для шлифования рабочих поверхностей зубчатого колеса колесной пары локомотива.

Ковалевский В.Н., Дамбаев Ж.Г. Оптимизация амплитудно-временных характеристик взрыва смежных удлиненных зарядов при добыче строительных материалов из природного камня.

Ковалевский В.Н., Дамбаев Ж.Г Определение развития трещин между смежными зарядами при направленном разрушении горных пород.

Насников Д.Н., Пермяков М.А., Московских А.О. Сочленения твердых тел как элементы колебательных структур.

Павловский С.В. Инновация процесса ремонта как основа надежности сложной механической системы.

Панасенко А.Н.. Утяшева И.М. Необходимые и достаточные условия существования эвольвентного зубчатого зацепления.

Панасенко А.Н.. Утяшева И.М. Аналитическое проектирование эвольвентного зубчатого зацепления по заданным критериям качества.

Панасенко А.Н. Аналитические методы и объектно-ориентированный подход к исследованию плоских одноподвижных механизмов.

Перелыгин В.Н. Автоматизация и повышение достоверности тепловизионного контроля электрических машин и электрооборудования электровозов.

Пимштейн П.Г., Кабанов О.Е. Оценка остаточных напряжений в отводах, гнутых из труб, после гибки.

Соболев И.В. Исследование динамики состава поезда на основе нелинейной имитационной модели.

Соболев В.И., Градобоев А.В. Метод дополнительной нагрузки как модификация МКЭ для расчета конструкций с нелинейными свойствами.

Татаринов В.Г., Мордина Г.М., Пимштейн П.Г. Исследование напряженного состояния и прочности штуцерных узлов при действии внешнего момента и внутреннего давления.

Тупицын А.А., Милованов А.И., Тупицын А.А., Ревенский А.А. Новые виды зацепления зубчатых передач.

Тупицын А.А., Ревенский А.А., Тупицын А.А. Исследование качественных показателей торцовой зубчатой передачи с внутренним зацеплением.

Тупицын А.А., Каргапольцев С.К., Тупицын А.А. Торцевая цевочная передача.

Мухачев Ю.С., Китов Б.И., Рябов Е.В. Аналоговая система автоматического управления вибрационным транспортным механизмом.

Мухопад А.Ю. Структурная организация программной модели сложных автоматов управления мехатроникой.

Рябов Е.В., Мухачев Ю.С. Микропроцессорная система электронного управления осторезонансным вибрационным питателем.

Упырь Р.Ю., Московских А.О. Особенности динамических свойств виброзащитных систем приборного оборудования.

Упырь Р.Ю., Фомина И.В. Рычажно-зубчатые связи в подвесках транспортных средств.

Упырь Р.Ю., Ситов И.С., Сливинская Л.П. Подходы к обеспечению технологического качества в вибрационных машинах.

Упырь Р.Ю. Обоснование возможностей расширения элементной базы колебательных систем.

Хоменко А.П., Белокобыльский С.В., Елисеев С.В. Динамика транспортных систем. Мехатронные подходы.

Цвик Л.Б., Шапова М.В., Храменок М.А. Уточненная адаптивная схема аппроксимации уровня напряжений в патрубковых зонах сосудов давления.

Цвик Л.Б., Шапова М.В., Храменок М.А. Аппроксимация напряжений в патрубковых зонах сосудов давления на основе предварительного численного моделирования.

Черниговская Т.Н. Гармонический элемент ширнирно закрепленной тонкой пластины в дискретно-континуальных моделях.

Шапова М.В. Электронная таблица и алгоритм расчета коэффициентов концентрации напряжений в патрубках сосудов давления.

II. 11-16 марта 2009 года в г. Иркутске (оз. Байкал) была проведена III Всероссийская конференция «Винеровские чтения»

Организаторами конференции являются:Иркутский государственный технический университет, Институт динамики систем и теории управления СО РАН, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН.

Всероссийская конференция «Винеровские чтения» проводится Иркутским государственным техническим университетом в ознаменование шестидесятилетия выхода в свет основополагающей книги американского математика Норберта Винера «Кибернетика. Управление и связь в живом организме и машине». Признано, что появление этого издания ознаменовало возникновение новой науки – Кибернетики – одной из самых продуктив-

ных и быстро развивающихся наук XX века. По сути именно кибернетика привела к созданию устройств, радикально изменивших нашу обыденную жизнь, производство, наука, бизнес, социальную сферу.

В октябре 2009 года исполнится сорок пять лет с начала подготовки в Иркутском государственном техническом университете специалистов-кибернетиков и тридцать лет с даты основания факультета Кибернетики.

Проводя ранее конференции «Винеровские чтения» на региональном уровне, организаторы убедились в том, что тематика конференции, интерес к ней со стороны ученых, практиков, вузовской общественности выходит за рамки Иркутской области. Это и обусловило организацию конференции на всероссийском уровне.

В материалах конференции представлены доклады ее участников на заседаниях пяти секций:

- Моделирование и управление в сложных технических системах.
- Управление в экономических системах.
- Интеллектуальные и информационные системы и технологии.
- Параллельные и распределенные вычисления, GRID – технологии, Web – приложения.
- Информационные и математические технологии в подготовке ИТ - специалистов.

Перед началом Всероссийской конференции «Винеровские чтения»проводится еще две конференции: студенческая научно-техническая конференция и школа-семинар молодых ученых. На них представлены результаты исследований и практические разработки студентов факультета Кибернетики Иркутского государственного технического университета, аспирантов и научной молодежи.

Публикация материалов конференции осуществлена в электронной форме. Все поступившие в Оргкомитет доклады представлены на CD-ROM, имеющем все необходимые библиографические данные, включая ISBN. Этот вид публикаций идентичен печатной форме, что обеспечивает полную правомерность библиографических ссылок.

На конференции были представлены доклады сотрудников Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС):

Градобоев А.В. Особенности моделирования и расчета плоско напряженных железобетонных конструкций методом конечных элементов с учетом специфических свойств железобетона.

Елисеев С.В. Новые подходы в теории колебаний. Задачи управления динамическим состоянием в динамике машин.

Логунов А.С. Фазовые сдвиги в динамических взаимодействиях элементов колебательных структур.

Насников Д.Н. Математические модели активных элементов как типовых звеньев в управляемых виброзащитных системах.

Упырь Р.Ю., Московских А.О. Математическая модель обобщенного упругого элемента в колебательных структурах.

Черниговская Т.Н. Метод гармонического элемента в дискретно-континуальных динамических моделях.

III. XII Байкальская Всероссийская конференция «Информационные и математические технологии в науке, управлении (ИМТ'2009)» прошла в июне 2009 года на оз. Байкал (г. Иркутск).

Организаторами конференции являются: президиум ИНЦ, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Институт динамики систем и теории управления СО РАН, Иркутский государственный технический университет, Иркутский государственный университет путей сообщения, Восточно-Сибирский институт МВД г. Иркутска.

Конференция регулярно проводится с 1993 г. под руководством д.т.н., проф. Л.В. Массель (Иркутск) и д.т.н., проф. Л.Н. Столярова (Москва), начиная с1998 г. – ежегодно.

В заседаниях конференции принимают участие сотрудники научных организаций и ведущих ВУЗов гг. Иркутска, Москвы, Томска, Новосибирска, Красноярска, Якутска, Улан-Удэ, Благовещенска и др.

Дополнительные координаты можно получить на сайте оргкомитета по адресу http: // www/sei.irk.ru/sei34/index.html

Координаты для связи: E-mail: massel@isem.sei.irk.ru (председатель оргкомитета семинара Массель Людмила Васильевна) или: mak@isem.sei.irk.ru (ученый секретарь семинара Макагонова Надежда Николаевна), тел. (8-395-2) 429-619, 428-864; почтовый адрес: 664033, Иркутск, Лермонтова, 130, ИСЕМ СО РАН.

Программный комитет конференции

Сопредседатели: Массель Л.В., д.т.н., ИСЭМ СО РАН, Иркутск; Столяров Л.Н., д.ф.-м.н., МФТИ, Москва.

Члены программного комитета: Бычков И.В., чл.-корр. РАН, Иркутск, ИДСТУ СО РАН;
Федотов А.М., чл.-корр. РАН, Новосибирск, НГУ;
Горбунов-Посадов М.М., д.ф.-м.н., Москва, ИПМ РАН; Горнов А.Ю., д.ф.-м.н., Иркутск, ИДСТУ СО РАН; Зокальцев В.И., д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН; Москвичев В.В., д.т.н., Красноярск, ИВМ СО РАН; Петров А.В., д.т.н., Иркутск, Иркутск, ИрГТУ; Черкашин А.К., д.г.н., ИГ СО РАН; Воеводин В.В., чл.корр. РАН, Москва, НИВЦ МГУ; Мохор В.В., д.т.н., Украина (Киев); Карпенко А.П., д.ф.-м.н., Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана; Елисеев С.В., д.т.н., Иркутск, ИрГУПС; Кочегуров В.А., д.т.н., Томск, ТПУ; Мухопад Ю.Ф., д.т.н., Иркутск, ИрГУПС; Юсупова Н.И., д.т.н., Уфа, УГАТУ; Чубаров Л.Б., д.ф.-м.н., Новосибирск, ИВТ СО РАН.

Оргкомитет конференции

Председатель: Массель Л.В., д.т.н., ИСЭМ СО РАН, Иркутск.

Зам. Перседателя: Бахвалов С.В., к.т.н., ИрГТУ.

Ученый секретарь конференции: Макагонова Н.Н., к.т.н., ИСЭМ СО РАН.

Ученый секретарь школы научной молодежи: Черноусов А.В., к.т.н., ИСЭМ СО РАН.

Члены оргкомитета: Аршинский Л.В., д.т.н., ВСИ МВД РФ; Абасова Н.И., к.т.н., ИрГУПС; Копайгородский А.Н., к.т.н., ИСЭМ СО РАН; Ламперт А.А., к.ф.-м.н., ИДСТУ СО РАН; Курганская О.В., ИСЭМ СО РАН; Черноусова Е.С., ИрГТУ,

На конференции были представлены доклады сотрудников Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС):

Хоменко А.П., Елисеев С.В., Упырь Р.Ю. Математическое моделирование в задачах динамики механических колебательных систем с рычажными связями.

Елисеев С.В., Резник Ю.Н., Фомина И.В. Задачи управляемости и наблюдаемости в системах вибрационной защиты.

Елисеев С.В., Упырь Р.Ю., Ермошенко Ю.В. Динамическое гашение в виброзащитных системах с использованием Г-образных рычажных связей.

Хоменко А.П., Елисеев С.В., Соболев И.В. Численное моделирование нелинейных динамических процессов в составе поезда.

Упырь Р.Ю., Ермошенко Ю.В., Фомина И.В. Математические модели виброзащитных систем с дополнительными связями

Логунов А.В., Пермяков М.А. Переходные процессы пневмомеханических систем.

Готовский Д.С. Численное моделирование нестационарных колебательных процессов в упругопластических элементах, с учетом произвольного направления воздействия в пространстве.

Белокобыльский С.В., Ситов И.С., Упырь Р.Ю. Динамические гасители колебаний в технологических машинах вибрационного типа.

Быкова Н.М., Баранов Т.М., Резник И.Ю. Особенности использования метода конечных элементов. Упругий континуум.

Быкова Н.М., Зайнагабдинов Д.А., Дьяченко А.А. Дискретные модели мостовых сооружений на основе метода конечных элементов.

Быкова Н.М., Спорыхин М.А., Быкова А.М. Подходы к оценке напряженного деформированного состояния объектов при использовании метода конечных элементов.

Мухопад Ю.Ф., Комков А.З. Прграммно-перестраиваемые пневматические устройства управления.

Мухопад Ю.Ф., Мухопад А.Ю. Метод синтеза сложных автоматов.

Соболев В.И., Черниговская Т.Н. Численные аппроксимации стационарных колебательных процессов дискретно-континуальных систем, содержащих тонкие пластины.

Мухопад Ю.Ф., Суржик В.В. Интеграция евро-азиатских транспортных систем.

Петров Ю.И. Математическое моделирование процесса обучения.

Краковский Ю.М., Карнаухова В.К. Прогнозирование показателей объектов по разнородной информации.

Овдиенко Е.В. Разработка диалового интерфейса для согласования экспертных прогнозов грузоперевозок на ВСЖД.

Арбатский Е.В. Разработка ЕИС ИРГУПС.

Федотов В.В. Организация процесса разработки информационных систем на примере ИРГУПС.

Колодий К.Г. Обеспечение качества функционирования и надежности корпоративных информационных систем.

Макухин А.В. Автоматический подход к интеграции ИС предприятия.

Могутнов К.С. Проблема построения крупных ИС на примере городского портала «Твой Иркутск».

Доклады опубликованы: Информационные и математические технологии в науке и управлении/ Труды XIV Байкальской Всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении». Часть I. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2009. – 226с. ISBN 978-5-93908-075-0/

Раздел 1
Математическое моделирование в задачах динамики и управления

УДК 62.50

Бокмельдер Е.П., Горнов А.Ю., Дьякович М.П. Управляемая модель динамики смертности трудоспособного населения республики Бурятия // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №3(23). С. 8-13. 2 рис. Библиогр.: С. 13 (6 назв.).

Моделируется динамика изменения уровней смертности и первичной обращаемости за медицинской помощью в связи с заболеваниями – основными причинами смертности трудоспособного населения Республики Бурятия. Ставится и численно решается задача оптимального управления с целью снижения указанных уровней. Приводятся результаты численных экспериментов, сценарии изменений и оптимальные режимы. Даются рекомендации органам государственной власти по уменьшению уровней смертности и обращаемости.

Ключевые слова: математические модели, социальные процессы, оптимальное управление, вычислительные методы оптимизации.

УДК 681.142.2

Гаченко А.С., Бычков И.В., Хмельнов А.Е., Новицкий Ю.А.,. Ружников Г.М, Федоров Р.К., Фереферов Е.С., Шигаров А.О., Парамонов В.А., Попова А.К. Разработка геоинформационной системы "Адресный план" г. Иркутска // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №3(23). С. 14-19. 6 рис. Библиогр.: С. 19 (8 назв.).

Использование современных геоинформационных систем (ГИС) – одно из актуальных направлений повышения эффективности управления в муниципальных образованиях.

Муниципальная геоинформационная система (МГИС) – программно-аппаратный комплекс, решающий совокупность задач, которые позволяют сформировать единую топографически корректную карту городской территории. В статье авторами предложен и реализован подход к формированию муниципальной геоинформационной системы.

Ключевые слова: геоинформационная система, геопространственные данные, адресный план, объект адресации, публикация геоданных.

УДК 517.977.58

Горнов А.Ю., Зароднюк Т.С. Метод "криволинейного" поиска глобального экстремума в задаче оптимального управления // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №3(23). С. 19-27. 9 рис. Библиогр.: С. 26 (36 назв.).

Рассматривается эвристический алгоритм поиска глобального экстремума в нелинейной невыпуклой задаче оптимального управления. Предлагаемый метод основан на построении вариаций в пространстве управлений, позволяющих произвести сканирование множества достижимости системы, а также с большой вероятностью получить улучшение рекордного управления на каждой итерации. Приводятся результаты численных экспериментов на небольшой коллекции тестовых задач.

Ключевые слова: оптимальное управление, глобальный экстремум, вычислительный метод, коллекция тестовых задач

УДК 004.021

Малтугуева Г.С., Юрин А.Ю. Алгоритм коллективного выбора на основе обобщенных ранжировок для поддержки принятия решений // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №3(23). С. 57-62. 1 рис. Библиогр.: С. 61 (6 назв.).

Рассмотрен новый алгоритм коллективного выбора на основе обобщенных ранжировок, обеспечивающий разрешение ряда парадоксов, возникающих при использовании принципа Кондорсе и метода Борда. Описан пример применения данного алгоритма при поддержке принятия решений в задаче группового выбора на примере работы комиссии по расследованию причин аварии, в частности, при формировании набора мероприятий по исключению или снижению скорости коррозионного растрескивания гнутых труб реактора (калачей).

Ключевые слова: принцип Кондорсе, метод Борда, задача коллективного выбора.

УДК 519.685

Опарин Г.А., Богданова В.Г., Макеева Н.Г. Инструментальная среда параллельного решения систем булевых уравнений // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №3(23). С. 62-68. 2 рис. Библиогр.: С. 68 (8 назв.).

Рассматривается технология булева моделирования, принципы организации и архитектура интеллектуального солвера РЕБУС, предназначенного для параллельного решения систем булевых уравнений.

Ключевые слова: булево моделирование, параллельное решение, автоматизация программирования.

УДК 519.68+004.272

Сидоров И.А., Опарин Г.А., Феоктистов А.Г. Технология организации распределенных вычислений в инструментальном комплексе DISCOMP // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №3(23). С. 69-74. 4 рис. Библиогр.: С. 73 (8 назв.).

Обсуждаются вопросы, связанные с организацией распределенных вычислений в инструментальном комплексе DISCOMP. В частности, описываются языковые средства для описания предметной области пакета прикладных программ и постановок исследовательских задач. Рассматривается подход к управлению процессом решения задачи в распределенной вычислительной среде.

Ключевые слова: пакеты прикладных программ, параллельные вычисления, управление процессом решения задачи.

УДК 517.929.4

Сурков А.В. Оптимальное демпфирование в задачах стабилизации и быстродействия систем с запаздыванием // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №3(23). С. 74-78. Библиогр.: С. 78 (8 назв.).

Рассматриваются задачи стабилизации и быстродействия для управляемых систем функционально-дифференциальных уравнений. Выделен класс управлений, при которых рассматриваемая управляемая система стабилизируется. Найдены условия, при которых управления являются оптимальными по быстродействию.

Ключевые слова: оптимальное демфирование, стабилизация, быстродействие, системы с запаздыванием.

УДК 517.977

Тятюшкин А.И., Моржин О.В. Методы оптимизации и программная система для решения прикладных задач оптимального управления // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №3(23). С. 78-82. 2 рис. Библиогр.: С. 82 (6 назв.).

Для численного решения сложных задач оптимального управления рассматривается подход, основанный на сведении их к конечномерной задаче, решение которой затем находится методами математи-

ческого программирования градиентного типа. Соответствующее программное обеспечение ориентировано на оптимизацию управления и параметров в управляемых системах с ограничениями на управление и фазовые координаты.

Ключевые слова: оптимальное управление, численные методы, программные средства.

УДК 681.142.2

Федоров Р.К., Хмельнов А.Е., Новицкий Ю.А., Ружников Г.М. Технология актуализации векторной карты зданий и сооружений города // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №3(23). С. 83-87. 5 рис. Библиогр.: С. 86 (7 назв.).

В городе регулярно ведется строительство новых объектов, производится снос существующих, происходят пожары и т.д. Требуется периодическое обновление цифровой топографической основы. В статье рассматривается технология актуализации векторной карты зданий и сооружений на основе космоснимка.

Ключевые слова: геоинформационные системы, цифровая топографическая основа (ЦТО), векторная карта.

УДК 517.9

Новицкий В.И., Финогенко И.А. Скользящие режимы управляемых систем с многозначными возмущениями // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №3(23). С. 87-91. 2 рис. Библиогр.: С. 91 (6 назв.).

Исследуется управляемые системы, в которые одновременно входят разрывные позиционные управления и многозначные или разрывные неуправляемые характеристики (возмущения, сухое трение). Изучаются вопросы существования решения и условия возникновения скользящих режимов методом эквивалентного управления. Рассматривается пример.

Ключевые слова: сухое трение, разрывные системы, скользящие режимы, эквивалентное управление, многозначное возмущение.

УДК 004.4'242

Черкашин Е.А., Ипатов С.А. Логический подход к обработке UML-моделей информационных систем // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №3(23). С. 91-97. 3 рис. Библиогр.: С. 96 (9 назв.).

Рассматривается методика обработки UML-модели программной системы, представленной в виде XML-документа. Основная стадия обработки представлена на логическом языке Prolog. Предлагаемая методика демонстрируется на примере анализа структуры XMI-представления UML-диаграммы в рамках направления проектирования программного обеспечения – MDA (Model Driven Architecture). Методика позволяет разрабатывать многоэтапные процедуры трансформации исходной UML-модели включающей, кроме структурных, также и семантические данные, управляющие процессом трансформации.

Ключевые слова: UML, XML-документ, трансляция, обработка.

УДК 004.932.2

Шигаров А.О. Технология извлечения табличной информации из электронных документов разных форматов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №3(23). С. 97-102. 2 рис. Библиогр.: С. 101 (24 назв.).

В данной работе предлагается технология извлечения табличной информации из электронных документов, в которой в качестве входных данных используются метафайлы. Это позволяет применять данную технологию к документам таких широко используемых форматов, как DOC, XLS, PDF, HTML, ASCII-текст. Данная технология включает в себя методы обнаружения, сегментации, функционального и структурного анализа таблиц, а также основанную на них программную систему. Предлагаемая технология показала высокую эффективность при извлечении табличной информации из научно-технических изданий, государственных, медицинских и финансовых статистических отчетов.

Ключевые слова: табличная информация, метафайлы, сегментация таблиц, функциональный анализ, структурный анализ.

Раздел 2
Системный анализ и его приложения

УДК 62.52

Елисеев С.В, Хоменко А.П., Упырь Р.Ю. Рычажные связи в задачах динамики вибрационных воздействий на машины и оборудование // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №3(23). С. 104-119. 25 рис. Библиогр.: С. 118 (20 назв.).

Рассматриваются особенности динамических свойств колебательных систем, в структуре которых имеются рычажные механизмы первого и второго рядов. Показаны возможности создания режимов динамического гашения. Определены условия устойчивости процессов в зависимости от параметров рычажных связей.

Ключевые слова: динамика виброзащитных систем, структурные схемы, рычажные связи.

УДК 519.6

Асламова В.С., Мусева Т.Н. Разностные схемы уравнений Навье-Стокса в переменных «Функция тока-вихрь» и их решение мотодом прогонки с использованием дробных шагов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №3(23). С. 120-127. 5 рис. Библиогр.: С. 127 (15 назв.).

Приведена постановка задачи о осесимметричном ламинарном течении несжимаемой вязкой жидкости с изменяющейся закруткой потока в прямоточном циклоне с промежуточным отбором пыли. Составлены дивергентные разностные схемы для функции тока, кольцевого вихря угловой скорости и момента импульса. Схемы были аппроксимированы центральными разностями со вторым порядком точности, решались методом прогонки с использованием метода дробных шагов. По результатам численного решения получены профили окружной и осевой составляющих скорости и функции тока, которые свидетельствуют о наличии вблизи стенки циклона возвратного течения.

Ключевые слова: динамика процессов сепарации, математические модели соударения, методы прогонки.

УДК 531.13

Ереско С.П., Шатохин С.Н. Функциональные возможности и проблематика применения адаптивных гидростатических опор в шпиндельных узлах металлорежущих станков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №3(23). С. 128-132. 2 рис. Библиогр.: С. 131 (15 назв.).

Рассмотрены функциональные возможности и проблемы возникающие при модернизации шпиндельных узлов металлорежущих станков путем применения адаптивных гидростатических опор. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния периодических погрешностей формы опорных поверхностей и пульсации давления нагнетаемой смазки на точность вращения, а также описание реализованных конструкций шпиндельных узлов в металлорежущих станках.

Ключевые слова: гидростатическая опора, шпиндель, податливость, смазка.

УДК 656.212+519.876.2:872.6

Казаков А.Л., Маслов А.М. Построение модели неравномерного транспортного потока на примере железнодорожной грузовой станции // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №3(23). С. 27-32. 9 рис. Библиогр.: С. 32 (5 назв.).

В работе проводится построение математической модели входящего транспортного потока на железнодорожной грузовой станции, существенно учитывающей неравномерность потока. С использованием метода наименьших квадратов и рядов Фурье определяется закон распределения случайной величины – числа поездов, прибывающих на станцию в единицу времени.

Ключевые слова: транспортный поток, метод наименьших квадратов, распределение случайной величины, методика Поттгоффа.

УДК 519.854.2

Климентова, К.Б. Приложение задачи о p -медиане с предпочтениями клиентов для кластерного анализа клеток рака // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №3(23). С. 33-38. 1 рис. Библиогр.: С. 37 (13 назв.).

Рассмотрено приложение задачи о p -медиане с предпочтениями клиентов к решению задачи кластерного анализа клеток рака по образцам экспрессии генов и действия медикаментов.

Ключевые слова: кластерный анализ, дискретная оптимизация.

УДК 004.94

Косов А.А., Овдиенко Е.В. Информационная система для анализа и прогнозирования грузоперевозок на ВСЖД на основе обработки статистических данных и экспертных оценок // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №3(23). С. 38-41. 5 рис. Библиогр.: С. 41 (3 назв.).

Предложен подход к разработке информационной системы для прогнозирования грузоперевозок на ВСЖД. Для прогнозирования привлекается статистическая информация, накопленная в базах данных, а также экспертные оценки, получаемые от соответствующих специалистов.

Ключевые слова: грузоперевозки, прогнозирование, экспертные оценки.

УДК 519.6

Лакеев А.В. Системы линейных интервальных уравнений с конечным множеством решений // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №3(23). С. 42-48. Библиогр.: С. 48 (11 назв.).

Получены необходимые и достаточные условия конечности объединенного множества решений системы линейных интервальных уравнений. Показано, что задача выяснения конечности этого множества co - NP -полна.

Ключевые слова: задача максимизации, линейное интервальное уравнение, разбиение, полиномиальный алгоритм.

УДК 681.3.06, 519.688, 004.891

Маджара Т.И., Горнов А.Ю. Тестовая коллекция задач оптимального управления с вычислительными особенностями // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №3(23). С. 49-56. 13 рис. Библиогр.: С. 56 (16 назв.).

В работе представлена созданная авторами коллекция тестовых задач оптимального управления с вычислительными особенностями, описаны основные принципы ее разработки. Приведены решения ряда задач из коллекции, полученные при помощи автоматизированного программного комплекса OPTCON/SMART.

Ключевые слова: оптимальное управление, вычислительные технологии, тестирование алгоритмов.

УДК 621.311:621.331

Крюков А.В., Закарюкин В.П., Кобычев Д.С. Моделирование электромагнитных влияний контактной сети на смежные линии электропередачи с учетом высших гармоник // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №3(23). С. 132-136. 7 рис. Библиогр.: С. 136 (5 назв.).

Предложен метод моделирования электромагнитных влияний контактной сети железных дорог переменного тока на отключенные смежные линии электропередачи напряжением 6-10-35 кВ. Показано, что при расположении отключенной ЛЭП на расстоянии 100 м и более от контактной сети наведенное напряжение, вызванное высшими гармониками, может достигать значений в сотни вольт.

Ключевые слова: контактные сети, наведенные напряжения, высшие гармоники.

УДК 621.646:621.891

Огар П.М., Тарасов В.А., Турченко А.В. Герметизирующая способность тяжелонагруженных уплотнительных стыков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №3(23). С. 136-142. 6 рис. Библиогр.: С. 142 (9 назв.).

Приведена методика определения герметизирующей способности уплотнительного стыка в зависимости от контактных характеристик – относительной площади контакта и плотности зазоров, которые определены с учетом взаимного влияния микронеровностей. При определении доли эффективных микроканалов учтено слияние отдельных пятен контакта и ширина зоны уплотнения.

Ключевые слова: уплотнительный стык, нагружение, микроканалы.

УДК 629.118.74

Рябов И.М., Чернышов К.В., Пылинская Т.В., Гасанов М.М., Абдулаев М.Ш., Гечекбаев Ш.Д. Математическое моделирование пневматической подвески транспортного средства с упругодемпфирующим приводом регулятора статического положения // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №3(23). С. 143-147.

Предложена математическая модель подвески транспортного средства с учетом реальных свойств пневматического амортизатора. Разработана методика оценки динамических свойств при действии возмущающих факторов. Произведена оценка смещения нейтрали и способы ее устранения.

Ключевые слова: виброзащитные системы, динамика, амортизация, регулирование.

УДК 621.8.031.4

Ереско Т.Т., Тубольцев А.А. Совершенствование конструкций и рабочего процесса гидропневмоударных агрегатов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №3(23). С. 148-153. 1 рис. Библиогр.: С. 152 (26 назв.).

Рассмотрены способы совершенствования вибробезопасности конструкций гидропневмоударных агрегатов. Предложена конструкция самобалансного адаптирующегося к параметрам разрабатываемой среды гидропневмомолота.

Ключевые слова: динамика агрегатов, регулирование, ударные процессы, испытания.

УДК 621.331

Бардушко В.Д. Закон регулирования мощности параллельной компенсирующей установки на посту секционирования контактной сети // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №3(23). С. 154-160. 4 рис. Библиогр.: С. 160 (3 назв.).

В статье изложен возможный принцип повышения энергетической эффективности тяговых сетей переменного тока. Решение этой задачи основывается на применении поперечного регулируемого компенсирующего устройства. Закон управления, формируется на основе информации о режиме ведения поезда с наибольшим электропотреблением и, следовательно, в наибольшей степени определяющим потери в тяговой сети.

Современные силовая электроника, системы измерения электрических величин, принципы передачи и обработки информации позволяют выйти на новый уровень управления устройствами электроснабжения, с привлечением законов регулирования, сформированных по заданным критериям оптимизации. Это позволит реализовать резервы системы тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ по энергоэффективности

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, регулируемая компенсация, реактивная мощность, тяговая сеть, потери электроэнергии, закон регулирования.

УДК 528:002.5:656.2

Алексеев В.А., Лукьянов А.В. Комплексная оценка технического состояния силовых маслонаполненных трансформаторов с помощью аппарата нечёткой логики // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №3(23). С. 160-166. 1 рис. Библиогр.: С. 166 (5 назв.).

Разработана методика комплексной оценки технического состояния силовых маслонаполненных трансформаторов с помощью аппарата нечёткой логики.

Ключевые слова: система обслуживания по фактическому состоянию, комплексная оценка технического состояния, нечёткая логика, силовой трансформатор.

УДК 681.51

Гоппе Г.Г. Динамическая математическая модель потока жидкости в комплексе турбомеханизм - трубопроводная магистраль при двух способах управления производительностью // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №3(23). С. 166-170. 5 рис. Библиогр.: С. 170 (8 назв.).

Получены математические модели динамики для потоков жидкости, транспортируемой по трубопроводным магистралям при двух способах управления производительностью комплекса: турбомеханизм-трубопроводная магистраль. Показано, что при управлении частотой вращения турбомеханизма динамические характеристики по сравнению с методом дросселирования более "благоприятны" для технологического оборудования.

Ключевые слова: математическая модель, трубопроводная магистраль, турбомеханизм, дросселирование, частота вращения, производительность.

УДК 681.3.01.(031)

Мухопад Ю.Ф., Пашков Н.Н., Пунсык-Намжилов Д.Ц. Адаптивные системы управления с динамической структурной организацией в режиме реального времени // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №3(23). С. 171-174. 7 рис. Библиогр.: С. 174 (7 назв.).

Рассмотрены методы проектирования систем реального времени на основе специализированных вычислительных преобразователей информации. Предложена адаптивная организация автомата управления с динамической перестройкой структуры. Практическим результатом является повышение быстродействия и многократное сокращение объема оперативной памяти автомата при одновременном увеличении точности вычислений.

Ключевые слова: автомат управления, режим реального времени, структурно адаптивные системы.

УДК 69.002.51.192:621.225.2

Кобзов Д.Ю., Усова С.В. «Экспресс-диагностика несущей способности гидроцилиндров машин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №3(23). С. 175-179. 5 рис. Библиогр.: С. 179 (19 назв.).

Предложен метод и средство экспресс-диагностики гидроцилиндра по несущей способности, основанные на контроле в процессе диагностирования прогиба гидроцилиндра до приложения эксплуатационного продольного сжимающего усилия.

Ключевые слова: диагностика, гидравлические механизмы, динамика.

УДК 621. 9.048.6

Шастин В.И. Ультразвуковой метод микроанализа эрозионной стойкости конструкционных материалов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №3(23). С. 180-183. 3 рис. Библиогр.: С. 183 (7 назв.).

Предлагается способ дифференционального микроанализа эрозионной стойкости различных материалов при воздействий ультразвуковой кавитации. Способ основан на анализе профиля поверхности микрошлифов после кавитационной обработки

Ключевые слова: Ультразвуковые технологии, поверхностные эффекты, кавитация.

УДК 622.342

Резник Ю.Н. Шумилова Л.В. Влияние физико-химических причин технологической упорности при извлечении дисперсного золота из минерального сырья // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №3(23). С. 184-188. Библиогр.: С. 188 (3 назв.).

Развиваются основы создания технологии извлечения из руд тонкодисперсионного золота. Предлагаются модели оценки физической упорности. Предлагаются рекомендации использования новых разделительных признаков.

Ключевые слова: технологии извлечения золота, тонкодисперсная отработка рудных тел.

УДК 622.342

Шумилова Л.В. Методы эффективной подготовки к цианированию упорных сульфидных руд и концентратов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №3(23). С. 188-192. 4 рис. Библиогр.: С. 191 (3 назв.).

Обсуждаются особенности технологий извлечения тонкодисперсного золота на основе методов цианирования. Предлагается ряд конкретных технологических решений.

Ключевые слова: Технологии извлечения тонкодисперсного золота, сульфидные руды и концентраты.

УДК 629.118.74

Логунов А.С. Экспериментальные исследования пневматической виброзащитной системы // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №3(23). С. 192-196. 6 рис. Библиогр.: С. 196 (3 назв.).

Рассматриваются возможности пневматических виброзащитных систем на основе экспериментов, проводимых на опытной установке. Показаны возможности управления свойствами системы в низкочастотном диапазоне при различных законах обработки информации о динамическом состоянии.

Ключевые слова: виброзащита, виброизоляция, управляемые виброзащитные системы.

УДК 624.042:539.4

Дамбаев Ж. Г., Егодуров Г.С., Гришко Д. В. К оптимальному проектированию систем подрессоривания транспортной системы // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №3(23). С. 196-200. 4 рис. Библиогр.: С. 200 (2 назв.).

В настоящей статье предложено улучшение качества защиты транспортной системы от внешних воздействий при помощи направленного использования нелинейных эффектов на примере математической модели движения гусеничного транспортного средства, подверженного внешнему случайному кинематическому воздействию.

Ключевые слова: Системы подрессоривания, Подвеска, Гусеничное транспортное средство.

Раздел 3
Системный анализ и междисциплинарные подходы в исследованиях

УДК 630

Полюшкин Ю. В. Радиальный прирост деревьев как показатель динамики лесных экосистем // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №3(23). С. 202-214. 1 рис. Библиогр.: С. 214 (27 назв.).

В работе рассматриваются несколько следствий из сформулированного ранее автором принципа взаимной компенсация составляющих изменчивости наиболее информативного признака динамики лесных экосистем – прироста деревьев по диаметру - ,индицирующего изменения продуктивности экосистемы во времени.

Ключевые слова: изменчивость, прирост, экосистема.

УДК 006.354, 382.3

Лонцих П.А., Кононова Н.В. Принципы TQM, алгоритмы формирования и самооценка организации как инструмент реализации процессного подхода // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №3(23). С. 215-219. 1 рис. Библиогр.: С. 219 (6 назв.).

Рассматриваются особенности повышения эффективности, надежности и безопасности продукции в соответствии со стандартами ИСО-9000. Развиваются методы построения моделей и технологий самооценки.

Ключевые слова: Конкурентная способность, модели Премий качества, самооценка деятельности предприятия.

УДК 519.833.2

Зоркальцев В.И., Киселева М.А. Равновесие Нэша производственных планов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №3(23). С. 219-224. Библиогр.: С. 224 (11 назв.).

Рассматривается проблема согласования планов нескольких предприятий с линейными удельными затратами для отдельных технологий у каждого предприятия, зависимыми от суммарных интенсивностей использования этих технологии всеми предприятиями. Ограничения модели предприятий – линейные. Доказывается существование и единственность равновесия Нэша. Показано, что проблема поиска этого равновесия сводится к задаче квадратичного программирования.

Ключевые слова: равновесие по Нэшу, оптимизация, квадратичное программирование.

УДК 57.087

Романова Г.В., Чертенкова О.С. Математическая модель компонентов, обуславливающих вариативность сердечного ритма // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №3(23). С. 225-228. 2 рис. Библиогр.: С. 228 (5 назв.).

В статье описана математическая модель управления сердечным ритмом. Математический аппарат представлен разностными уравнениями. Его преимущество в большем соответствии импульсному характеру сердечных сокращений.

Ключевые слова: математические модели, сердечные ритмы.

УДК 14.07.07

Кирий В.Г., Чан Ван Ан Модель тестирования как система случайных величин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №3(23). С. 229-232. 1 рис. Библиогр.: С. 232 (2 назв.).

В статье предлагается вероятностная модель тестирования, как система случайных величин, где в качестве случайных величин рассматривается количество студентов, отвечающих правильно на вопросы теста и количество правильных ответов. В качестве эффективности процесса тестирования предлагается математическое ожидание числа правильных ответов при тестировании группы студентов. Находится аналитическая зависимость эффективности тестирования от сложности вопросов теста.

Ключевые слова: вероятностная модель, система случайных величин, тестирование, эффективность.

УДК 519.863:631.145:551.5

Белякова А.Ю., Бузина Т.С., Вашукевич Е.В., Иваньо Я.М. Модели кластеров сельскохозяйственных предприятий с учетом экстремальных природных явлений // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №3(23). С. 233-239. 3 рис. Библиогр.: С. 239 (6 назв.).

В работе на примере Иркутской области согласно минимизации расстояний между товаропроизводителями, состоянию дорог, видам продукции выделены сельскохозяйственные кластеры. Для их описания предложены различные варианты стохастических моделей с учетом влияния на производство экстремальных природных событий.

Ключевые слова: сельскохозяйственные кластеры, стохастические модели, экстремальные природные явления.

УДК 519.633.6

Анисимов М.М. Расширение сетей Ван-Хао для анализа «сложных» процессов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №3(23). С. 239-245. 7 рис. Библиогр.: С. 244 (16 назв.).

Рассматривается расширение сетей Ван-Хао с целью снятия ограничений по ацикличности, противоречивости и асинхронности. Рассматривается применение Joiner-алгебры как логической основы для событийных сетей. Вводятся понятие ситуационной сети, сопряженной с событийной. Рассматриваются способы установления отношения порядка в ситуационном пространстве.

Ключевые слова: сеть Ван-Хао, событийная сеть, ситуационная сеть, ацикличность, противоречивость, асинхронность

Part 1
Mathematical modelling at dynamics and management tasks

UDC 62.50

Bockmelder E.P., Gornov A.Yu. , Dyakovich M.P. Control model of mortality dynamics for able-bodied citizens of republic Buryatia // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #3(23). P. 8-13. Fig. - 2. Ref. - 6.

Dynamic of mortality of able-bodied citizens and medical aid appeal ability are modeled on account of diseases – principal causes of able-bodied population's mortality death in Republic of Buryatiya. Optimal control problem for decreasing these rates is stated and solved numerically. The results of calculating experiments, changing variants and optimal state and control variables are hold. The results of modeling can be used by representatives of power structures, experts in the field of public health, engages in problems of estimation and the forecast of a medicine-demographic situation.

Keywords: modeling, mathematic, social, optimal, control, methods, calculating, optimization.

UDC 681.142.2

Gachenko A.S., Buchkov I.V., Hmelnov A.E., Novitskii Y.A., Ruzhnikov G.M., Fedorov R.K., Fereferov E.S., Shigarov A.O., Paramonov V.A., Popova A.K. Development of Geoinformation system "Address plan" of Irkutsk // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #3(23). P. 14-19. Fig. - 6. Ref. - 8.

Using of modern Geoinformation systems (GIS) is one of actual directions to increase management effectiveness in municipal unions.

Municipal Geoinformation system (MGIS) is a firmware complex solving complex of problems that allow forming a unified typographically correct map of an urban area. Authors in the article offer and realize an approach for municipal Geoinformation system organization.

Keywords: geoinformation system, geospace data, address plan, address object, geodata publication.

UDC 517.977.58

Gornov A.Yu., Zarodnyuk T.S. The method of "curvilinear" search of algorithm of global of optimal control problem // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #3(23). P. 19-27. Fig. - 9. Ref. - 36.

Heuristic algorithm of global extremum search of non-linear non-convex optimal control problem is considered. Proposed method is based on constructing of variations in control's space. This variations make it possible to scan of system attainability set and to get an improvement of record control in every iteration with high probability. Results of numerical experiments are given by collection of test problems.

Keywords: Optimum control, global extremum, computing method, collection of test problems

UDC 656.212+519.876.2:872.6

Kazakov A.L., Maslov A.M. Construction of the nonuniform transport flow model with an example to the railroad cargo station // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #3(23). P. 27-32. Fig. - 9. Ref. - 5.

The construction of mathematical model for input transport flow on railroad cargo station, which substantially considers nonuniformity of flow is given. Using the least squares method and Fourier series, we define the distribution law of a random value for number of trains, which arrive at station per unit time.

Keywords: traffic, least-squares method, random distribution, Pottgoff method.

UDC 519.854.2

Klimentova, K.B. The application of p -median problem with clients' preferences for cluster analysis of cancer cell lines // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #3(23). P. 33-38. Fig. - 1. Ref. - 13.

The paper deals with an application of p -median problem with clients' preferences for cluster analysis of cancer cell lines based on gene expression profiles and drug activity patterns.

Keywords: clustering analysis, discrete optimization, coefficient of correlation

UDC 004.94

Kosov A.A., Ovdienko E.V. Information system for analysis and forecasting of cargo transportations on ESRW based on statistical data processing and expert estimations // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #3(23). P. 38-41. Fig. - 5. Ref. - 3.

Approach to development of information system for forecasting of cargo transportations on ESRW is offered. For forecasting statistical information is involved, accumulated in databases, and also appropriate expert estimations.

Keywords: cargo transportations, forecasting, expert evaluations.

UDC 519.6

Lakeyev A.V. Systems of linear interval equations with the finite set of solution // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #3(23). P. 42-48. Ref. - 11.

The necessary and sufficient conditions of finiteness for united solution set of the system of linear interval equations are obtained. It is shown that the finiteness explaining problem of this set is co - NP -complete.

Keywords: linear interval equation, split task, polynomial algorithm, maximization task.

UDC 681.3.06, 519.688, 004.891

Madzhara T.I., Gornov A.Yu. The test collection of the optimal control problems with the computational peculiarities // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #3(23). P. 49-56. Fig. - 13. Ref. - 16.

In the report the original test collection of the optimal control problems with the computational peculiarities is represented, the basic principles of its development are described. The solutions of number of problems from the collection, obtained with the aid of the automated software OPTCON/SMART are given.

Keywords: optimal control, technique of optimization, algorithm test.

UDC 004.021

Maltugueva G.S., Yurin A.Yu Collective choice Algorithm on the basis of generalized rankings for decision support // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #3(23). P. 57-62. Fig. - 1. Ref. - 6.

A new algorithm of the collective choice is considered. The algorithm is based on the generalized rankings and provides solution for a number of paradoxes which appear when applying the Condorcet principle and the Borda method. An example of application of the algorithm to decision support in the problem of collective choice is given: a work of the committee investigating an accident, in particular, the committee is expected to present a set of preventive actions for reducing the corrosion cracking velocity in bent pipes of reactors is considered.

Keywords: collective selection task, Condorse principle, Borda method.

UDC 519.685

Oparin G.A., Bogdanova V.G., Makeeva N.G. Toolkit for the the parallel solving of systems Boolean equations // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #3(23). P. 62-68. Fig. - 2. Ref. - 8.

The technology of Boolean modelling, principles of the organization and the architecture of the intellectual solver REBUS designed for the parallel solving of systems Boolean equations is considered.

Keywords: Boolean modeling, parallel solving, soft automation.

UDC 519.68+004.272

Sidorov I.A., Oparin G.A., Feoktistov A.G. A technology of distributed computing organizing in the software tool DISCOMP // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #3(23). P. 69-74. Fig. - 4. Ref. - 8.

The questions connected to distributed computing organizing in the software tool DISCOMP are discussed. Specifically, the language for description of a problem domain of a package of applied programs and statements of research problems is described. The approach to process control of problem solving in the distributed computing environment is considered.

Keywords: packages of applied programs, distributed computing, process control of problem solving.

UDC 517.929.4

Surkov A.V. Optimal decrement for stabilization and speed of response problems of systems with delay // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #3(23). P. 74-78. Ref. - 8.

We consider stabilization and speed of response problems for control systems of functional differential equations. The class of controls stabilizing the considered system is selected and conditions determining control is optimal with respect to speed of response are found.

Keywords: optimal decrement, stabilization, speed of response, systems with delay.

UDC 517.977

Tyatyushkin A.I., Morzhin O.V. Optimization methods and program system for solution of applied optimal control problems // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #3(23). P. 78-82. Fig. - 2. Ref. - 6.

It's considered the approach for numerical solution of difficult optimal control problems. The approach is based on the reduction of these problems to finite-dimensional problem, which solution can be computed with help of optimization methods of gradient type. The corresponded software is oriented to optimization of control functions and parameters in controlled systems with constraints at control and state coordinates.

Keywords: optimal control, numerical methods, program tools.

UDC 681.142.2

Fedorov R.K., Hmelnov A.E., Novitskii Y.A., Rugnikov G.M. The technology of digital map actualization on a basis satellite image // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #3(23). P. 83-87. Fig. - 5. Ref. - 7.

To use municipal geoinformation systems it is required a digital map of city. The digital map of city is always changing, new buildings appear, old houses are taken down etc. Therefore periodical updating digital map is required. In the article the technology of digital map actualization on a basis satellite image is considered.

Keywords: geoinformation system, digital terrain base, vector map.

UDC 517.9

Novitsky V.I., Finogenko I.A. Sliding modes of controlled systems with multiple-valued perturbations // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #3(23). P. 87-91. Fig. - 2. Ref. - 6.

It is investigated controlled systems which simultaneously include discontinuous position controls and multiple-valued or discontinuous uncontrolled characteristics (perturbations, dry friction). Problems of existence of the solution and a condition of occurrence of sliding modes are studied by a method of equivalent control. It is given an example.

Keywors: discontinuous system, slide mode, equivalent control, polysemic control, polysemic indignation, unlubricated friction

UDC 004.4'242

Cherkashin E.A., Ipatov S.A. A logical approach to processing UML-models of information systems // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #3(23). P. 91-97. Fig. - 3. Ref. - 9.

A technique for processing UML-models of software is considered. The UML-models are represented in XMI-format, which obeys the XML standards. The main stage of the processing is denoted in the logical language Prolog. The proposed technique is explained on an example of XMI-document structure analysis in the

framework of a new software design approach MDA (Model driven architecture). The technique allows one to develop multistage procedures of transformation of an initial UML-model. The model includes both the structural and semantic data affecting the transformation process.

Keywords: UML, XML-document, transmission, machining.

UDC 004.932.2

Shigarov A.O. A technology for the extraction of tabular information from digital documents of various formats // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #3(23). P. 97-102. Fig. - 2. Ref. - 24.

The paper proposes the technology for the extraction of tabular information from digital documents. The technology uses metafiles as input data. It allows one to apply the system to documents of various formats, for example, DOC, XLS, PDF, HTML, ASCII-text. The proposed technology includes methods of table detection, table segmentation, functional and structural analysis of table, and also the program system based on them. The technology has demonstrated high performance the extraction of tabular information from scientific papers, government, medical and financial statistical reports.

Keywords: table information, metafile, cleavage, functional analysis, structured analysis.

Part 2
The system analysis and their appendices

UDC 62.52

Eliseev S.V., Khomenko A.P., Upir' R.Yu. Lever ties in problems of dynamics of vibrating influences on machine and the equipment // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #3(23). P. 104-119. Fig. - 25. Ref. - 20.

There are features of oscillatory systems dynamic properties in which structure there are lever mechanisms of the first and second numbers are considered. Opportunities of creation of modes of dynamic clearing are shown. Conditions of stability of processes depending on parameters of lever ties are certain.

Keywords: dynamic of vibroprotection system, block scheme, lever ties.

UDC 519.6

Aslamova V.S., Museva T.N. Difference schemes for Navier-Stokes equations in variables "flow function-whirlwind" and sweep method solution with the use of rhythmic steps // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #3(23). P. 120-127. Fig. - 5. Ref. - 15.

The article states a problem of axial-symmetric laminar flow of incompressible viscous fluid with variable flow twist in a direct-flow cyclone with intermediate dust extraction. Difference schemes for flow function, ring whirl of angular velocity and angular momentum have been diagrammed. Schemes have been approximated with central difference with the second order of accuracy and have been solved by a sweep method with the use of rhythmic steps. As a result of numerical solution, profiles of circle and axial components of flow function and velocity have been taken which indicate the presence of backward flow near the cyclone wall.

Keywords: Dynamics of separation processes, mathematical models of impact, methods of pass

UDC 531.13

Eresko S.P., Shatohin S. N. Function possibilities and problems of application adaptive hydrostatic supports in spindle knots of metal-cutting lathes // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #3(23). P. 128-132. Fig. - 2. Ref. - 15.

Functional possibilities and problems, appears at modeling spindle knots of metal-cutting lathes via using an adaptive hydrostatic supports is considered. Results of theoretical and experimental researches of influence periodic form errors of support surfaces and pulsation of pressure of forced greasing on accuracy of rotating, and also description of realized constructions spindle knots in metal-cutting lathes are shown.

Keywords: hydrostatic support, spindle, pilability, greasing.

UDC 621.311:621.331

Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Kobichev D.S. Modeling of contact net high harmonics influence on transmission lines // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #3(23). P. 132-136. Fig. - 7. Ref. - 5.

There is proposed the method of modeling of contact net high harmonics influence on nearby transmission lines 6-10-35 kV. It is shown that high harmonics influence voltage from 100 m railway may be up to hundreds volts.

Keywords: railway contact net, influence voltage, high harmonics

UDC 621.646:621.891

Ogar P.M., Tarasov V.A., Turchencko A.V. Geometrize ability of heavy duty sealing joints // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #3(23). P. 136-142. Fig. - 6. Ref. - 9.

The technique of definition of pot abilities of a sealing joint depending on contact characteristics - the relative area of contact and density of backlashes which are certain in view of mutual influence of microroughnesses is resulted. There is at definition of a share of effective pinholes merge of separate spots of contact and width of a zone of condensation is considered.

Keywords: seal joint, loading, percolating model, pinhole.

UDC 629.118.74

Ryabov I.M, Chernishov K.V., Pilinskaya T.V., Gasanov M.M., Abdulaev M.S., Gechekbaev S.D. Mathematical modelling of a pneumatic suspension bracket of a vehicle with elastic-damp drive of static position regulator // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #3(23). P. 143-147.

The mathematical model of vehicle suspension bracket in view of real properties of the pneumatic shock-absorber is offered. The technique of an estimation of dynamic properties is developed at action of revolting factors. The estimation of displacement of a neutral and ways of its elimination is made.

Keywords: vibroprotection system, dynamic, amortization, control.

UDC 621.8.031.4

Eresko T.T., Tubolcev A.A. Design and workflow perfection of hydro-pneumatic-shocking units // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #3(23). P. 148-153. Fig. - 1. Ref. - 26.

In this article is considered the ways of perfection of vibration safety of designs of hydro-pneumatic-shocking units. Proposed design of self-balancing adapting for parameters of developed environment of hydro-pneumatic-shocking unit.

Keywords: unit dynamic, control, shock making, test.

UDC 621.331

Bardushko V.D. The rule of capacity regulation of parallel compensating installation on a post of a contact network sectioning // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #3(23). P. 154-160. Fig. - 4. Ref. - 3.

The paper presents a possible principle of improving the energy efficiency of AC traction networks. The problem is solved by using the shunt controlled compensator. The control law is formulated based on the information about the mode of train run with the highest electricity consumption and hence, causing the greatest losses in the traction network.

The present-day power electronics, the systems for measuring electric quantities, the principles of information transfer and processing make it possible to reach a new level of control of power supply facilities with attraction of the control laws worked out on the basis of the given optimization criteria. As a result the reserves of the traction AC 25 kV electricity supply system in terms of energy efficiency will be realized.

Keywords: system of traction power supply, controlled compensation, reactive power, traction network, power losses, control law.

UDK 528:002.5:656.2

Alekseev V.A., Luk`yanov A.V. The complex estimation of a technical condition power of oil-filled transformers by device of not precise logic // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #3(23). P. 160-166. Fig. - 1. Ref. - 5.

There was devised the technique of integrated structural assessment of power oil-filled transformer, with the help of fuzzy logic apparatus.

Keywords: condition-monitored maintenance, integrated structural assessment, fuzzy logic, power transformer.

UDC 681.51

Goppe G.G. Mathematic models of fluid dynamics for fluid flow in pipe lines-turbo mechanism using two complex control production methods // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #3(23). P. 166-170. Fig. - 5. Ref. - 8.

Mathematic models of fluid dynamics for the fluid flowing in pipelines was obtained using two methods for complex control production: Turbo mechanism – pipe lines. Showing that using of angular velocity to control the flow will be better than using control valves for mechanical techniques.

Keywords: mathematic models, Turbo mechanism, pipe lines, control valves, angular velocity, productivity.

UDC 681.3.01. (031)

Muhopad J. F., Pashkov N.N., Punsyk-Namjilov D.C. Adaptive control systems with dynamic structural organization in a mode of real time // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #3(23). P. 171-174. Fig. - 7. Ref. - 7.

The methods of designing of systems of real time are considered on the basis of the specialized computing converters of the information. The adaptive organization of the automatic device of management with dynamic reorganization of structure is offered. Practical result is the increase of speed and repeated reduction of volume of operative memory of the automatic device at simultaneous increase of accuracy of calculations.

Fig. - 7. Ref. - 6.

Keywords: the automatic device of management, mode of real time, structurally adaptive systems.

UDC 69.002.51.192:621.225.2

Kobzov D.Y., Usova S.V. The instant exclusion of bearing value of machines hydrocylinders // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #3(23). P. 175-179. Fig. - 5. Ref. - 19.

The method and means the express train-diagnostics of the hydrocylinder on the bearing ability, based on the control over diagnosing a deflection of the hydrocylinder up to the appendix of operational longitudinal compressing effort is offered.

Keywords: diagnostics, hydraulic unit, dynamic.

UDC 621. 9.048.6

Shastin V.I. Ultrasonic method of the microanalysis of kavitations erosion of the Construetive materials // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #3(23). P. 180-183. Fig. - 3. Ref. - 7.

There is in offered avtiele the way of the micro analysis of kovitruction erosion of the materials, who are using in different construction. Of the ground surface ofter kavitation manufacture.

Keywords: Ultrasonic, Kelvin effect, cavitation.

UDC 622.342

Reznik Y.N. Shumilova L.V. The physical and chemical reasons influence of technological persistence at extraction of disperse gold from mineral raw material // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #3(23). P. 184-188. Ref. - 3.

There are bases of technology creation of extraction from fine gold develop. Physical evaluation model are offered persistence. Recommendations of use of new dividing attributes are offered.

Keywords: technology of gold drawing, fine waste of ores.

UDC 622.342

Shumilova L.V. The methods of effective preparation cianidation persistent sulphidic ores and concentrates // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #3(23). P. 188-192. Fig. - 4. Ref. - 3.

There are features of extraction fine gold technologies at the basis of methods cianide are discussed. A number of concrete technological decisions are offered.

Keywords: mine fine gold technology, sulphide ore and concentrate.

UDC 629.118.74

Logunov A.S. Experimental researches of pneumatic vibroprotection systems // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #3(23). P. 192-196. Fig. - 6. Ref. - 3.

There are opportunities of pneumatic vibroprotection systems on the basis of the experiments spent on skilled installation are considered. Opportunities of management by properties of system in a low-frequency range are shown at various laws of processing of the information on a dynamic condition.

Keywords: vibroprotection, vibroisolation, vibroprotection controlled systems.

UDC 624.042:539.4

Dambaev Z.G, Egodurov G.S, Grishko D.V. Optimum designing of spring systems transport system // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #3(23). P. 196-200. Fig. - 4. Ref. - 2.

In the present article improvement of quality of protection of transport system from external influences by means of directed use of nonlinear effects on an example of mathematical model of movement of the caterpillar vehicle subject to external casual kinematic influence is offered.

Fig. – 3, Ref – 2.

Keywords: Spring systems; Suspension bracket; Caterpillar vehicle.

Part 3
System analysis and intersubject approaches in researches

UDC 630

Polyushkin Y.V. The radial increment of the trees as index of the forest ecosystem dynamic // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #3(23). P. 202-214. Fig. - 1. Ref. - 27.

The rule of interdependence and indemnity of basal agents of increment volatility was stated by author earlier. This attribute is most significant by study of dynamics of forest ecosystems. Several effects of stated rule in this article are think over.

Keywords: volatility, increment, ecosystem.

UDC 006.354, 382.3

Lontsikh P.A., Kononova N.V. Principles TQM, algorithms of formation and self-estimation of the organization as the tool of realization of the process approach // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #3(23). P. 202-219. Fig. - 1. Ref. - 6.

There are features of efficiency increase, reliability and safety of production in conformity with standards ISO-9000 are considered. There are methods of models construction and technologies of a self-estimation develop.

Keywords: competitive ability, Prize quality models, self-estimation of industry effort

UDC 519.833.2

Zorkaltsev V.I., Kiseleva M.A. Nash equilibrium of production plans // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #3(23). P. 219-224. Ref. - 11.

The paper deals with the problem of coordinating production plans of several economic units (suppose firms) that use shared resource (suppose technology). Costs per unit of every firm are linearly depended on total intensity of all other firms using this technology. Nash equilibrium is proposed as solution of this problem. It is shown that problem of Nash equilibrium search for concerned problem leads to solving convex quadratic programming problem. Electric networks, pipeline systems, railway transport can be used as applications.

Keywords: Nash balance, optimization, square-law programming.

UDC 57.087

Romanova G.V., Chertenkova O.S. Mathematical model of the components causing variability of an intimate rhythm // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #3(23). P. 225-228. Fig. - 2. Ref. - 5.

The mathematical model for the cardiac rate control has been described. Difference equations are used as a mathematical apparatus. Such approach as this is more adequate to impulse character of cardiac beats.

Keywords: mathematical models, cardiac rhythms

UDC 14.07.07

Kiriy V. G., Chan Van An Model of testing as system of random variables // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #3(23). P. 229-232. Fig. - 1. Ref. - 2.

In article it is offered probabilistic model of testing, as the system of random variables, where quality of random variables is examined quantity of the students answering correctly to questions of the test and quantity of the correct answers. As efficiency of process of testing the mathematical expectation of number of the correct answers is offered at testing of group of the students. There is an analytical dependence of efficiency of testing on complexity of questions of the test.

Keywords: probabilistic model, system of random variables, testing, efficiency.

UDC 519.863:631.145:551.5

Beljakova A.J., Buzina T.S., Vashukevich E.V., Ivanyo Y.M. Models of clusters of the agricultural enterprises in view of the extreme natural phenomena // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #3(23). P. 233-239. Fig. - 3. Ref. - 6.

Agricultural clusters were allocated on the example of Irkutsk region in accordance with minimization of distances between commodity producers, state of roads, and kinds of production in the study. Various variants of stochastic models were offered for their description in view of influence on manufacture of extreme natural events.

Keywords: Agricultural clusters, stochastic models, extreme natural events.

UDC 519.633.6

Anisimov M.M. The extension of Wan-Hao networks for complicated processes analysis // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. #3(23). P. 239-245. Fig. - 7. Ref. - 16.

In the article it is considered the extension of Wan-Hao networks. The ultimate goal was to remove the restrictions of acyclicity, asynchronism and contradictions in behavior. Joiner-algebra implementation was analyzed as a logic basis for event networks. The concept of situational network is introduced. The ways to establish relation order are considered in situational space.

Keywords: Wan-Hao network, event networks, situational network, acyclicity, asynchronism and contradictions in behavior.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Абдулаев Магомед Шарабуддинович, к.т.н., доцент, Махачкалинский филиал МАДИ

Алексеев Виктор Алексеевич, студент, Иркутский государственный университет путей сообщения; т. 8-904-132-0369; E-mail: Azar-VA@yandex.ru

Анисимов Михаил Михайлович, соискатель, Московский физико-технический институт (государственный университет) , e-mail: Mikhail.Anisimov@vtbcapital.com

Асламова Вера Сергеевна, к.т.н, доцент, профессор кафедры автоматизации технологических процессов Ангарской государственной технической академии, тел.: (3955)-55-25-66(дом.); (3955)-67-89-15 (сл.); (3955)-67-18-32 (факс); 8-9086431412 (сот.); e-mail: maxp@irmail.ru, veras@pisem.net

Бардушко Валерий Данилович, д.т.н, профессор кафедры "Электроснабжение железнодорожного транспорта", Иркутский государственный университет путей сообщения.

Белякова Анна Юрьевна, к.т.н., доцент ФГОУ ВПО «Иркутская государственная сельскохозяйственная академия», тел: (3952)23-74-91, (3952)-23-74-25, e-mail: iymex@rambler.ru

Богданова Вера Геннадьевна, к.т.н., с.н.с., Институт динамики систем и теории управления СО РАН, тел: – (3952)-45-30-93, e-mail: bvg@icc.ru

Бокмельдер Елена Петровна, к.ф.-м.н., доцент ИМЭИ ИГУ, Иркутск; bokme@math.isu.ru

Бузина Татьяна Сергеевна, старший преподаватель ФГОУ ВПО «Иркутская государственная сельскохозяйственная академия», тел: (3952)-23-74-91, (3952)-23-74-25, e-mail: iymex@rambler.ru

Бычков Игорь Вячеславович, чл.-к. РАН, директор Института динамики систем и теории управления СО РАН; bychkov@icc.ru; (3952)-42-71-00.

Вашукевич Елена Валерьевна, старший преподаватель ФГОУ ВПО «Иркутская государственная сельскохозяйственная академия», тел: (3952)-23-74-91, (3952)-23-74-25, e-mail: iymex@rambler.ru

Гасанов Мерза Муртузалиевич, ст. перподаватель, Махачкалинский филиал МАДИ

Гаченко Андрей Сергеевич, к.т.н., н.с., Институт динамики систем и теории управления СО РАН; gachenko@icc.ru; (3952)-45-31-03.

Гечекбаев Шихмагомед Джаналдинович, ст. преподаватель, Махачкалинский филиал МАДИ

Гоппе Гарри Генрихович, к.т.н., профессор кафедры электропривода и электрического транспорта ИрГТУ, тел.: (8-3952)-38-90-95, (8-3952)-40-51-28; e-mail: elprivod@istu.edu

Горнов Александр Юрьевич, д.т.н., зам. директора по научной работе, Институт динамики систем и теории управления СО РАН, тел: (3952)-45-30-04, e-mail: gornov@ok.ru

Гришко Дмитрий Васильевич, аспирант, инженер Центра Технической Экспертизы Иркутского Государственного Университета Путей Сообщения, тел: 89021729011; (3952)-63-83-91; e-mail: grishko@irgups.ru

Дамбаев Жаргал Гомбоевич, д.т.н., профессор, директор Центра Технической Экспертизы Иркутского Государственного Университета Путей Сообщения; тел: 89149098023, (3952)-63-83-91.

Дьякович М.П., д.б.н., АФ-НИИ МТ и ЭЧ ГУ НЦ МЭ ВСНЦ СО РАМН, Ангарск; marik914@rambler.ru

Егодуров Георгий Сагадарович, к.т.н., профессор, член УМО МО РФ, заведующий кафедрой «Сопротивление материалов» Восточно-Сибирского Государственного Технологического Университета, тел.: (3012)-21-61-65

Елисеев Сергей Викторович, д.т.н., профессор, директор НИИ современных технологий, системного анализа и моделирования Иркутского государственного университета путей сообщения, тел.:(3952)-59-84-28, e-mail: eliseev_sv@irgups.ru ; eliseev_s@inbox.ru

Ереско Сергей Павлович, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Проектирование и эксплуатация строительно-дорожных и транспортно-технологических машин» Сибирского федерального университета, e-mail: eresko07@mail.ru

Ереско Татьяна Трофимовна, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Основы конструирования машин», Сибирского госу-

дарственного аэрокосмического университета, e-mail: eresko07@mail.ru

Закарюкин Василий Пантелеймонович, к.т.н., доцент кафедры электроснабжения железнодорожного транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения, тел.: (395)-63-83-45; e-mail: zakarukin_vp@irgups.ru

Зароднюк Татьяна Сергеевна, м.н.с., Институт динамики систем и теории управления СО РАН, тел: (3952)-45-30-45, e-mail: tz@icc.ru

Зоркальцев Валерий Иванович, д.т.н., проф.**,** г.н.с., Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, тел. (3952)-42-88-27, e-mail: zork@isem.sei.irk.ru

Иваньо Ярослав Михайлович, д.т.н., профессор ФГОУ ВПО «Иркутская государственная сельскохозяйственная академия», тел. (3952)-23-74-91, (3952)-23-74-25, e-mail: iymex@rambler.ru

Ипатов Степан Анатольевич, аспирант, Институт динамики систем и теории управления СО РАН, тел: (3952)-45-30-73, e-mail: steve@icc.ru

Казаков Александр Леонидович, в.н.с., Институт динамики систем и теории управления СО РАН, тел: +7914 004 33 91, e-mail: kazakov@icc.ru

Кирий Виктор Георгиевич, к.т.н., доцент, зав. кафедрой вычислительной техники Иркутского государственного технического университета

Киселева Марина Александровна, аспирант, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутский государственный университет, тел. (3952)-42-97-64, e-mail: marinee@mail.ru

Климентова Ксения Борисовна, аспирант, Институт динамики систем и теории управления СО РАН, тел.: +7 (3952)-45-31-06, e-mail: Xenia.Klimentova@icc.ru

Кобзов Дмитрий Юрьевич, к.т.н., доцент, доцент кафедры «Подъёмно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование» Братского государственного университета, тел.: (3953)-32-54-93 (раб.), (3953)- 37-79-92 (дом.)

Кобычев Дмитрий Сергеевич, программист, кафедра «ЭЖТ» Иркутского государственного университета путей сообщения

Кононова Наталья Васильевна, аспирант ИрГТУ

Косов Александр Аркадьевич, к.ф.-м.н., доцент, в.н.с. Института динамики систем и теории управления СО РАН, e-mail: kosov_idstu@mail.ru.

Крюков Андрей Васильевич, д.т.н., профессор кафедры электроснабжения железнодорожного транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения, тел.: (3952)-63-83-45; e-mail: avk@irgups.ru

Лакеев Анатолий Валентинович, д.ф.-м.н., зав. отделом ИДСТУ СО РАН, тел: (3952)-45-30-21, e-mail: lakeyev@icc.ru

Логунов Александр Сергеевич, ст. преподаватель кафедры «Теоретическая и прикладная механика» Иркутского государственного университета путей сообщения

Лонцих Павел Абрамович, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Управление качеством и механики» ИрГТУ, тел: (3952)-40-51-79

Лукьянов Анатолий Валерьянович, д.т.н., профессор, ИрГУПС

Маджара Тарас Игоревич, Институт динамики систем и теории управления СО РАН, без ученой степени и звания, научный сотрудник, тел: (3952)-40-56-66, e-mail: taras@icc.ru

Макеева Надежда Геннадьевна, аспирант, Институт динамики систем и теории управления СО РАН, тел: (3952)-45-30-93, e-mail: necvi@mail.ru

Малтугуева Галина Станиславовна, Институт динамики систем и теории управления СО РАН, программист, +7 (3952)-45-30-85, gama@icc.ru

Маслов Александр Михайлович, ассистент, ГОУ ВПО Уральский государственный университет путей сообщения, г. Екатеринбург, maslove@mnm.ru

Моржин Олег Васильевич, аспирант Институт динамики систем и теории управления СО РАН, тел: 8 914 635 09 77, e-mail: oleg-morzhin@yandex.ru

Мусева Татьяна Николаевна, к.т.н., доцент кафедры высшей математики Ангарской государственной технической академии**,** тел.: (3955)-55-25-66(дом.); (3955)-67-89-15 (сл.); (3955)-67-18-32 (факс); 8-9086431412 (сот.)

Мухопад Юрий Федорович, д.т.н., профессор, зав. каф. «Управление техническими системами» Иркутского государственного университета путей сообщения, тел.: (3952) 63-83-64, (3952) 59-86-64, 8-950-050-02-91; e-mail: bezproz@irgups.ru

Новицкий Вадим Иванович, студент ИМЭИ ИГУ, тел. (3952) 45-30-51, mail: novvad@gmail.com

Новицкий Юрий Александрович, программист, Институт динамики систем и теории управления СО РАН; novitskiy@icc.ru; (3952) 45-31-02

Овдиенко Екатерина Васильевна, аспирант Иркутского государственного университета путей сообщения, тел. (3952)-45-30-14

Огар Петр Михайлович, д.т.н., профессор, проректор БрГУ

Опарин Геннадий Анатольевич, д.т.н., профессор, зам. директора ИДСТУ СО РАН, тел.: (3952) 42-89-25, e-mail: oparin@icc.ru

Парамонов Вячеслав Владимирович, м.н.с., Институт динамики систем и теории управления СО РАН; slv@icc.ru; (3952)-45-31-02

Пашков Николай Николаевич, к.т.н., доцент, зав. кафедрой «Вагоны и вагонное хозяйство» ИрГУПС, тел: (3952)-63-83-53

Полюшкин Юрий Васильевич, к.б.н., доцент кафедры технологии деревообработки Сибирской академии права, экономики и управления, тел.: (3952)-70-61-09

Попова Анастасия Константиновна, н.с., Институт динамики систем и теории управления СО РАН; chudnenko@icc.ru; (3952)-45-31-04

Пунсык-Намжилов Даба-Цыренович, к.т.н., доцент, Директор ООО Химтех Юкос, соискатель, кафедра «Управление техническими системами» (УТС) ИрГУПС, тел.: (3822)-44-17-22, 8- (3822) 51-15-45, 8 9039554507, e-mail: dabat@sibmail.com

Пылинская Татьяна Викторовна, ст. преподаватель каф. Прикладной математики, ВолГТУ

Резник Юрий Николаевич, д.т.н., профессор, ректор ЧитГУ, тел: (3822)-41-64-44

Романова Галина Вениаминовна, к.т.н., доцент каф. информатики и прикладной математики Тверского государственного технического университета, тел. (822)-70-52-60

Ружников Геннадий Михайлович, к.т.н., зам. директора, Институт динамики систем и теории управления СО РАН; тел: (3952)-45-30-06, e-mail: rugnikov@icc.ru

Рябов Игорь Михайлович, д.т.н., профессор кафедры автомобильных перевозок Волгоградского государственного технического университета, тел.: (8442)-38-57-29, e-mail: ap@vstu.ru

Сидоров Иван Александрович, аспирант ИДСТУ СО РАН, тел: (3952)-51-14-14

Сурков Александр Владимирович, м.н.с., Институт динамики систем и теории управления, тел: +7 9021772202, e-mail: surkov.alexander@gmail.com

Тарасов Вячеслав Анатольевич, доцент, ГОУ «БрГУ»

Тубольцев Анатолий Анатольевич, аспирант, кафедра «Основы конструирования машин» Сибирского государственного аэрокосмического университета

Турченко Алексей Владимирович, аспирант, ГОУ «БрГУ»

Тятюшкин Александр Иванович, д.т.н., проф., г.н.с., Институт динамики систем и теории управления СО РАН, тел: (3952)-51-11-07, e-mail: tjat@icc.ru

Упырь Роман Юрьевич, младший научный сотрудник Иркутского государственного университета путей сообщения, тел.: 8-9246032895; e-mail: msxp@list.ru

Усова Светлана Викторовна, аспирант кафедры «Подъёмно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование» ГОУ ВПО «БрГУ». Иркутская обл., г. Усть-Илимск, ул. Мечтателей, д. 46, кв. 44, тел. домашний - (3953)-55-91-29

Федоров Роман Константинович, к.т.н., с.н.с., Институт динамики систем и теории управления СО РАН; e-mail: fedorov@icc.ru; тел: (3952)-45-31-04

Феоктистов Александр Геннадьевич, к.т.н., доцент, с.н.с. ИДСТУ СО РАН, e-mail: agf@icc.ru

Фереферов Евгений Сергеевич, н.с., Институт динамики систем и теории управления СО РАН; fereferov@icc.ru; (3952)-45-30-71.

Финогенко Иван Анатольевич, д.ф.-м.н., зав. отделом ИДСТУ СО РАН, тел. раб. 45-30-51, тел. сот. 89148763182, mail: fin@icc.ru

Хмельнов Алексей Евгеньевич, к.т.н., н.с., зав. отд., Институт динамики систем и теории

управления СО РАН; e-mail: alex@icc.ru; тел: (3952) 45-30-71

Хоменко Андрей Павлович, д.т.н., профессор, ректор Иркутского государственного университета путей сообщения, тел.:(3952)-63-83-11, e-mail: homenko@irgups.ru

Чан Ван Ан, аспирант ИрГТУ, тел: 89148747908, e-mail: anbeo12a3@yahoo.com

Черкашин Евгений Александрович, к.т.н., с.н.с., Институт динамики систем и теории управления СО РАН, тел: (3952)-45-30-13, e-mail: eugeneai@icc.ru

Чернышов Константин Владимирович, к.т.н., доцент ВолГТУ, тел: (8442)47-70-62

Чертенкова Ольга Сергеевна, аспирант Тверского государственного технического университета.

Шастин Владимир Иванович, к.т.н., доцент, зав. кафедрой технологии деревообработки Сибирской академии права, экономики и управления, тел.: (3952) – 706109, 8-9149440995

Шатохин Станислав Николаевич, профессор кафедры «Технология машиностроения» Сибирского федерального университета

Шигаров Алексей Олегович, научный сотрудник, Институт динамики систем и теории управления СО РАН, тел. (3952) 45-31-02, e-mail: shigarov@icc.ru

Шумилова Лидия Владимировна, к.т.н., докторант ЧитГУ, тел: (3822) 41-69-08

Юрин Александр Юрьевич, Институт динамики систем и теории управления СО РАН, к.т.н., доцент, старший научный сотрудник, +7 (3952) 45-30-19, iskander@icc.ru

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

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование

№3(23)
2009

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Ответственный за выпуск **С.В.Елисеев**

Подписано в печать 17.08.2009. Формат 60x84/8.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. Печ. л. 19.
Уч.-изд. л. 19,5. Тираж 500 экз. Заказ № 3125
Подписной индекс по каталогу «Почта России»: 64556
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 ООО "Бланкиздат" объединения "Облмашинформ"
г. Иркутск, ул. Советская, 109. Тел. (3952) 21-44-60

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