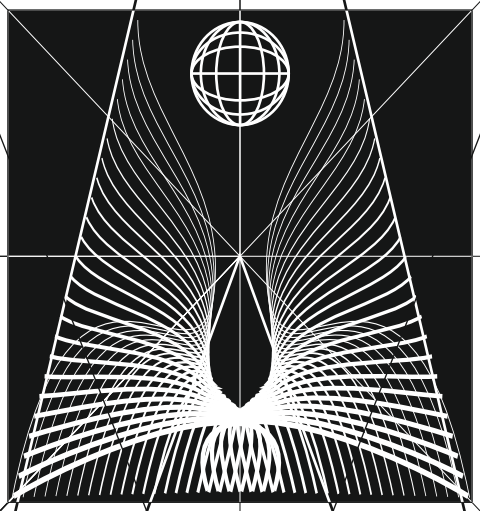
СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

МОДЕЛИРОВАНИЕ



НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

№1(29)
2011

© 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!

Редколлегия журнала представляет очередной выпуск №1(29), продолжая публикации по современным проблемам динамики машин, машиностроения и транспорта. По-прежнему серьезное внимание уделяется поддержке научных исследований, ориентированных на приложение аналитических методов в оценке динамических свойств технических объектов и систем.

Развитие научных контактов послужило основанием для включения в журнал результатов исследований, которые проводятся в вузовских, академических и отраслевых коллективах не только г. Иркутска, региона, но и Дальнего Востока и средней полосы России. Опыт общения с коллегами из других регионов может оказаться полезным во всех отношениях.

Сведения о журнале и контактную информацию можно найти в Интернете на сайте редакции: http://www.irgups.ru/

Редколлегия

Предисловие издателя

Адрес редакции: 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15
E-mail: irgups-journal@yandex.ru

Журнал издается с 2004 г.
Периодичность – 4 номера в год.
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

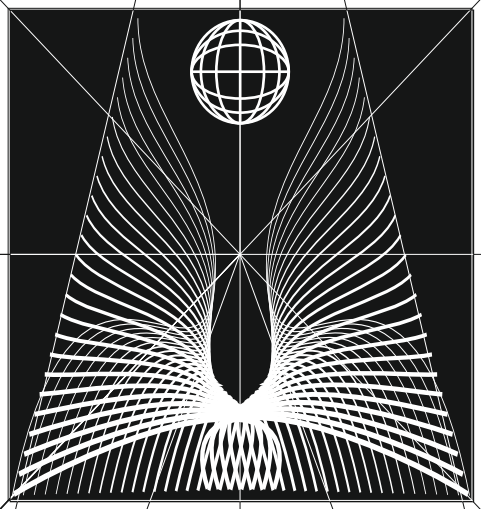
© Иркутский государственный университет путей сообщения

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

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование



НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

№1(29)
2011

Редакционная коллегия

А.П. Хоменко, д-р техн. наук, профессор, главный редактор, ректор ИрГУПС
В.Е. Гозбенко, д-р техн. наук, профессор, зам. главного редактора, ИрГУПС
С.В. Елисеев, д-р техн. наук, профессор, засл. деятель науки РФ, зам. главного редактора, ИрГУПС
Б.В. Базаров, член-корр. РАН, председатель Президиума Бурятского научного центра СО РАН
С.В. Белокобыльский, д-р техн. наук, профессор, ректор БрГУ
И.В. Бычков, член-корр. РАН, председатель Президиума ИНЦ СО РАН
Н.И. Воропай, член-корр. РАН, директор Института систем энергетики СО РАН
М.И. Кузьмин, академик РАН, директор Института геохимии СО РАН
А.А. Краснощек, канд. экон. наук, начальник ВСЖД – филиала ОАО «РЖД»
Ю.Н. Резник, д-р техн. наук, профессор, ректор ЧГУ

Редакционный совет

А.И. Артюнин, д-р техн. наук, профессор
В.Е. Гозбенко, д-р техн. наук, профессор
С.В. Елисеев, д-р техн. наук, профессор, засл. деятель науки РФ
С.К. Каргапольцев, д-р техн. наук, профессор
Ю.М. Краковский, д-р техн. наук, профессор
А.В. Крюков, д-р техн. наук, профессор
А.В. Лукьянов, д-р техн. наук, профессор
Ю.Ф. Мухопад, д-р техн. наук, профессор
В.А. Начигин, к.т.н., начальник службы технической политики Восточно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО «РЖД»
С.И. Носков, д-р техн. наук, профессор
В.А. Подвербный, д-р техн. наук, профессор

Журнал издается с 2004 г.

ISBN: 978-5-98710-157.5

Ответственный за выпуск В.Е. Гозбенко
Дизайн и макет издания: Е.В. Хохрин
Компьютерная верстка: А.В. Димов

© 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

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование

СОДЕРЖАНИЕ

Раздел 1. Современные технологии. Механика и машиностроение

Хоменко А.П., Елисеев С.В. О связи режимов динамического гашения колебаний со структурой системы внешних воздействий 8

Баденников А.В., Балакирев В.С., Истомин А.Л. Формализация задачи составления расписания учебных занятий в вузе 15

Орлов С.С. Начально-краевые задачи для неклассических уравнений математической теории упругости 21

Нижегородов А.И. Метод вибрационно-воздушного разделения вспученного вермикулита с высоким содержанием инертного материала 29

Русанов В.А., Антонова Л.В., Козырев В.А., Шарпинский Д.Ю. Структурно-параметрическая идентификация дифференциальных уравнений динамики упругого элемента спутника-гиростата 34

Елисеев С.В., Ермошенко Ю.В., Большаков Р.С. Обобщенная теория динамического гасителя колебаний в системе с несколькими степенями свободы 45

Старшев Д.В. Влияние механизма разрушения материала заготовки на силу резания при шлифовании 52

Федоров Р.К., Шигаров А.О. Логико-синтаксический подход к распознаванию изображений с учетом пространственных ограничений 56

Агрызков Л.Е., Власова Л.Г., Ивакин В.Л., Мусихин А.М., Черняк С.С. Механические свойства сталей 34ХН3М и 37ХН3А после одинарной и двойной закалки 60

Асламова В.С., Болоев Е.В. Численное решение нелинейных уравнений методом аппроксимации 63

Кудрявцев А.А. Контактная теплопроводимость и метод конечных элементов в задаче анализа теплонапряженности сборных конструкций 68

Евсевлеева Л.Г. О вероятности связности случайного графа 73

Свиридов Д.П., Семенов И.А., Ульянов Б.А. Закономерности и энергетическая эффективность кавитационного измельчения 76

Раздел 2. Информатика, вычислительная техника и управление. Приборостроение. Метрология. Информационно-измерительные приборы и системы

Паршин А.В., Руш Е.А., Спиридонов А.М. Автоматизация процесса обеспечения экологического мониторинга озера Байкал с применением современных ГИС и web-технологий 82

Базилевский М.П., Носков С.И. Алгоритм построения линейно–мульти пликативной регрессии 88

Дороничев А.В., Константинов К.В. Экспертная система вибродиагностики состояния и планирования ремонтов подшипников качения по текущему техническому состоянию на основе внедрения вейвлет-технологии в области объектов железнодорожного транспорта 92

Краковский Ю.М., Жарий Д.И. Исследование влияния неопределенности исходных данных на показатели пассажирских перевозок 96

Алексеенко В.А., Крюков А.В. Применение статистических методов для анализа повреждаемости устройств электроснабжения железных дорог 101

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. Информатика, вычислительная техника и управление. Приборостроение. Метрология. Информационно-измерительные приборы и системы (продолжение)

Истомин А.Л., Баденников А.В., Балакирев В.С. Математическое обеспечение системы принятия решений в планировании и организации учебного процесса в вузе 106

Башкуев Ю.Б., Аюров Д.Б., Буянова Д.Г. Система автоматизированной обработки и анализа данных спутника DEMETER 112

Обуздина М.В., Руш Е.А. Исследование закономерностей сорбционного извлечения органических загрязнителей из промышленных сточных вод цеолитами 117

Кулакова И.М., Жабей А.А., Кулаков А.Ю., Руш Е.А., Асламова В.С. Автоматизированная система исследования и технологического расчета пылеуловителей 123

Крылов А.А., Сизых В.Н., Чумак А.Г. Методика структурно-параметрического синтеза нейросетевой модели продольного движения воздушного транспортного средства 129

Раздел 3. Системный анализ. Моделирование. Транспорт. Энергетика. Строительство

Иванова Т.В., Налабордин Д.Г. Моделирование зависимости наработок грузовых вагонов на отказ и причин отказов 136

Шульгин М.С., Крюков А.В., Закарюкин В.П. Параметрическая идентификация линий электропередачи на основе фазных координат 140

Винокуров Д.И., Гозбенко В.Е. Создание и моделирование новых смазочных композиций из отходов химического производства 148

Мухачев Ю.С., Рябов Е.В., Корчевин Е.Н. Численное решение дифференциально-разностного уравнения первого порядка 157

Лыткина Е.М. Новая технология повышения ресурса тяговых двигателей электровозов 161

Семенов Р.М., Смекалин О.П. Геодинамика и сейсмическая опасность района мостового перехода через р. Селенгу 165

Соколов В.Ю. Моделирование жестких симметричных токопроводов 171

Мельниченко О.В. Повышение эффективности работы рекуперативного торможения электровозов переменного тока в зоне высоких скоростей движения 174

Краснощек А.А., Сольская И.Ю., Данилов В.А., Назаров С.Н. Оценка уровня экономической безопасности транспортного предприятия (ОАО «Трансконтейнер») 180

Нагуслаева И.Б., Башкуев Ю.Б., Хаптанов В.Б., Дембелов М.Г. Электромагнитное поле земной волны над узкими тектоническими разломами 185

Скворцов В.А. Моделирование физико-химических условий миграции ртути из снежного покрова вблизи предприятий химической промышленности 188

Булатов Ю.Н., Игнатьев И.В., Попик В.А. Методика выбора оптимальных настроек систем АРЧВ генераторов электростанций 192

Ульянов Б.А., Свиридов Д.П., Семенов И.А. Использование кавитационного измельчения в производстве молока кедрового 199

Говердовский В.Н., Бабенков В.В., Говердовский П.В., Смородин Ю.Н., Трофимов А.Н. Структурный синтез виброзащитных систем железнодорожного Подвижного состава 204

Третьяков В.Г. Исторические предпосылки возникновения и развития железнодорожного вуза в Иркутске в 1932–1934-х гг. 213

Новые монографии 228

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. Modern technologies. Mechanics and mechanical engineering

A.P. Khomenko, S.V. Eliseev About connection between regimes of dynamical absorbtion and structures of systems of external force factors 8

A.V. Badenikov, V.S. Balakirev, A.L. Istomin Formalization of the occupation timetable scheduling in higher education institution 15

S.S. Orlov Initial boundary value problems for mathematical theory of elasticity non-classical equations 21

A.I. Nigegorodov Method of vibro-aerial division of vermiculite with high contant of inert material 29

V.A. Rusanov, L.V. Antonova, V.A. Kozyrev, D.Y. Sharpinsky Structural and parametric identification of the differential equations of the dynamics of the satellite-gyrostat elastic element 34

S.V. Eliseev, Yu.V. Ermoshenko, R.S. Bolshakov Generalized theory of dynamical absorbe of oscillation in systems with several degrees of freedom 45

D.V. Starshev Influence of the preparation material destruction mechanism on contact processes at grinding 52

R.K. Fedorov, A.O. Shigarov Logical approach to syntactic image recognition with spatial constraints 56

L.E. Agryzkov, L.G. Vlasova, V.L. Ivakin, A.M. Musikhin, S.S. Chernyak Mechanical properties of steels 34hnzm and 37hnza after single and double hardening 60

V.S. Aslamova, E.V. Boloev Numerical solution of the nonlinear equations by an approximation method 63

A.A. Kudryavcev The heat conduction and finite element method in problem of prefabricated elements contact heat intension analysis 68

L.G. Evsevleeva On probability of random graph connectivity 73

D.P. Sviridov, I.A. Semenov, B.A. Ulyanov Energy performance of cavitation grinding 76

Part 2. Computer science, computer facilities and management. Instrument making. Metrology. Information-measuring devices and systems

A.V. Parshin, E.A. Rush, A.M. Spiridonov Automation of providing process for lake Baikal ecological monitoring on the base of modern GIS and web technologies 82

M.P. Bazilevskiy, S.I. Noskov The algorithm for a linearmultiplicative regression construction 88

A.V. Doronichev, K.V. Konstantin Expert system for vibrodiagnosting rotating bearings status and repair planning in connection with current technical conditions on the basis of wavelet-technologies introduction in the field railway transportation objects 92

Y.M. Krakovsky, D.I. Zhariy Initial data uncertainty influence on passenger transportation values investigation 96

V.A. Alekseenko, A.V. Kryukov Application of statistical methods for the railway electrical power supply devices damageability analysis 101

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. Computer science, computer facilities and management. Instrument making. Metrology. Information-measuring devices and systems (continue)

A.L. Istomin, A.V. Badenikov, V.S. Balakirev System decision software in planning higher educational process 106

Yu.B. Bashkuev, D.B. Ayurov, D.G. Buyanova The demeter satellite data automated processing and analysing system 112

M.V. Obuzdina, E.A. Rush Investigation into conformity to sorption extraction laws of organic pollutants from inddustrial waste water by zeolits 117

I.M. Kulakova, A.A. Gabey, A.Yu. Kulakov, E.A. Rush, V.S. Aslamova Computer-aided system of dust extractor research and technological estimation 123

A.A. Krylov, V.N. Sizykh, A.G. Chumak Structured-parametric syntheses methods to neural networks longitudal moving models of air transport system 129

Part 3. The system analysis. Modelling. Transport. Power. Building

T.V. Ivanova, D.G. Nalabordin Wagon time to failure dependence on failure reasons modeling 136

V.P. Zakaryukin, M.S. Shul'gin, A.V. Kryukov Parametric identification of high-voltage power lines based on phase coordinates 140

D.I. Vinokurov, V.E. Gozbenko Creation and modelling of new lubricant compositions of chemical manufacture waste 148

Mukhachev, E.V. Ryabov , E.N. Korchevin The numerical solution of the differential-difference equation of the first order 157

E.M. Lytkina The new technology of the electric locomotives traction motors resource increase 161

R.M. Semenov, O.P. Smekalin Geodynamics and seismic hazard of the bridge crossing area over the Selenga river 165

V.Y. Sokolov Modeling of a rigid symmetrical wiring system 171

O.V. Melnichenko Enhance efficient to work of recuperative braking in alternating current locomotives in zone of high-speed traffic 174

A.A. Krasnoshok, I.U. Solskaya, V.A. Danilov, S.N. Nazarov The estimation of economic safety level of transport organization (OAO «Transcontainer») 180

I.B. Naguslaeva, Yu.B. Bashkuev, V.B. Khaptanov, M.G. Dembelov Electromagnetic field of a ground wave over narrow tectonic faults 185

V.A. Skvortsov Modeling the physico-chemical conditions of mercury transport from snow cover near chemical factory 188

U.N. Bulatov, I.V. Ignatyev, V.A. Popik Technique of sampling optimal settings of power stations generators ARRF systems 192

D.P. Sviridov, I.A. Semenov, B.A. Ulyanov Usage of cavitation grinding for cedar milk production 199

V.N. Hoverdovsky, V.V. Babenkov, P.V. Hoverdovsky, U.N. Smorodin, A.N. Trofimov Railway rolling stock vibration protecting systems structural synthesis 204

Tretyakov V G. Occurrence and activity of transporthigher education institution in Irkutsk in 1932–1934И. 213

New monographies 228

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.

1. 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. __–__. Рис. 5. Табл. 2. 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 аннотация предоставляются в виде файла с расширением *.doc.

2. **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 (210×297 мм) в две колонки, заверенной подписью авторов.

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

- параметры **страницы** и абзаца: отступы сверху и снизу – **2,5 см;** слева и справа – **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.

3. **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.

4. **Библиографический список** к статье оформляется **в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5-2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления».**

5. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взымается.

6. 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) 63-83-89.** Факс: **(8-3952) 38-76-72.** E-mail: **irgups-journal@yandex.ru.**
Гозбенко Валерий Ерофеевич

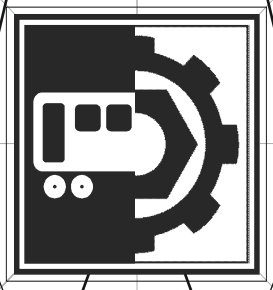
Министерство образования и науки Российской Федерации
Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта

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

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование



Раздел 1.

Современные технологии. Механика и машиностроение

ОСНОВНЫМИ НАУЧНЫМИ НАПРАВЛЕНИЯМИ ЖУРНАЛА ЯВЛЯЮТСЯ:

- математика и механика;
- электроника, измерительная техника, радиотехника и связь;
- энергетика, электрификация и энергетическое машиностроение;
- машиностроение;
- строительство и архитектура;
- транспорт;
- управление, вычислительная техника и информатика;
- экономика и управление.

УДК 621: 534; 833

Хоменко Андрей Павлович,
д. т. н., проф., ректор ИрГУПС, тел./факс: 83952638311
Елисеев Сергей Викторович,
д. т. н., проф., директор НИИ современных технологий, системного анализа и моделирования, тел./факс: 8-395-2-59-84-28, e-mail: eliseev_s@inbox.ru

О СВЯЗИ РЕЖИМОВ ДИНАМИЧЕСКОГО ГАШЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ СО СТРУКТУРОЙ СИСТЕМЫ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

A.P. Khomenko, S.V. Eliseev

ABOUT CONNECTION BETWEEN REGIMES OF DYNAMICAL ABSORBTION AND STRUCTURES OF SYSTEMS OF EXTERNAL FORCE FACTORS

Аннотация. *Рассматриваются дополнительные связи в системах динамического взаимодействия, которые могут быть получены путем введения нескольких внешних силовых факторов. Показано, что использование передаточных функций механической колебательной системы является эффективным средством оценки возможностей изменения статических и динамических свойств в задачах вибрационной защиты.*

Ключевые слова: *виброзащита, приведенные жесткости, режимы динамического гашения, устойчивость.*

Abstract. *Influence of additional ties which can be introduced by combination of several external force factors is considered. Using of transfer functions for mechanical oscillation systems for estimation and change of statical and dynamical properties in tasks of vibroprotection is offered.*

Keywords: *vibroprotection, generalized stiffness, regimes of dynamical absorbtion, stability.*

Введение

Динамическое гашение колебаний в виброзащитных системах можно отнести к вопросам, внимание к которым не ослабевает в течение многих лет, инициируя поиск и разработки новых способов и средств защиты машин, оборудования, приборов и аппаратуры от вибрационных воздействий [1–4]. В большинстве работ рассматриваются условия динамических взаимодействий между отдельными элементами системы, сопровождающихся компенсацией силовых факторов, что при фиксированных частотах гармонических внешних возмущений обеспечивает неподвижность по одной из координат механической системы. Однако такие подходы не исключают расширения представлений о формах динамических процессов, например одновременного гашения по двум и более координатам виброзащитной системы [5, 6]. Настройка динамических гасителей колебаний обеспечивается, как правило, соответствующим выбором параметров самой системы, состоящей из упругих и инерционных звеньев. Вместе с тем существуют и другие возможности, связанные с учетом особенностей построения самой системы внешних возмущений, что предполагает возможности использования эффектов взаимного силового уравновешивания всей системы динамических воздействий [7]. В предлагаемой статье развиваются подходы, позволяющие ввести в рассмотрение при определении свойств механических колебательных систем при статических и периодических нагрузках особенности внешнего возмущения. Предполагается возможность введения понятия о комбинационном внешнем воздействии, при котором несколько внешних силовых факторов могут быть объединены в одну структуру, отражающую одновременно и геометрические особенности внешних сил. Для оценки статических и динамических ситуаций используются передаточные функции системы (ПФ). В работах [4, 8] показано, что знаменатель передаточной функции – характеристическое уравнение является, в определенном смысле, инвариантным в отношении выбора пар точек «вход-выход» и учитывается для нахождения частот собственных колебаний, оценки устой-

чивости системы и др. Специфика задач виброзащиты и виброизоляции заключается в том, что, как правило, динамическое состояние связано с обобщенными координатами положения объекта, которые являются «выходными сигналами», а «вход» представляет собой смещение основания (кинематическое воздействие) или силу, прикладываемую к объекту защиты или фрагментам виброзащитной системы («силовое воздействие»). Отношения выходных и входных сигналов могут иметь различную физическую природу, а следовательно, и размерность: отношение выхода в виде смещения к силе, как входному сигналу, характеризует податливость виброзащитной системы (ВЗС) в данной точке, инверсия отношения определяет упругие свойства (жесткость). Последнее дает возможность ввести в рассмотрение понятия динамической и статической жесткостей. Динамическая жесткость определяется через соответствующую передаточную функцию системы и является комплексной величиной, а характеристики динамической жесткости зависят от частоты внешнего воздействия. По-существу, механическая система между основанием и выбранным объектом защиты, состоящая из различных звеньев, в том числе из расширенного набора типовых элементов [1], может рассматриваться как обобщенная пружина.

Аналогично может рассматриваться и ситуация в статике, когда в передаточной функции (ПФ) принимается $p = 0$ ($p = j\omega$ – переменная Лапласа) и оценивается статическая жесткость или коэффициент упругости для данной пары выбранных точек «вход-выход». Если в системе имеется несколько степеней свободы, то коэффициент упругости (или жесткости) может определяться не только в точке приложения силы, пару соответствия могут составить любые две точки, что предполагает в системе возможность оценивать различные виды коэффициентов упругости.

Методологические основы подхода. Постановка задачи исследования

Рассмотрим несколько примеров. На рис. 1 приведена расчетная схема цепной системы с двумя степенями свободы.

Система дифференциальных уравнений движения имеет вид [1]:

$$\begin{aligned} m_1\ddot{y}_1 + k_1 y_1 + k_2 y_1 - k_2 y_2 &= Q_1, \\ m_2\ddot{y}_2 + k_2 y_2 + k_2 y_1 &= Q_2. \end{aligned} \qquad (1)$$

Соответствующая (1) структурная схема представлена на рис. 2.

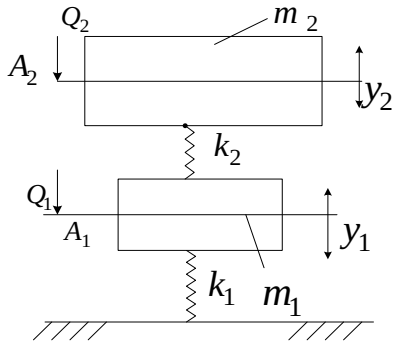
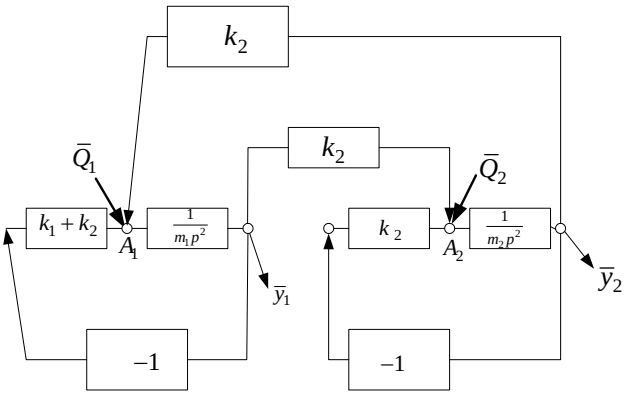


Рис. 1. Расчетная схема цепной виброзащитной системы (y_1, y_2 – обобщенные координаты; k_1, k_2 – упругости пружин; m_1, m_2 – массы элементов ВЗС)



Будем полагать, что особенность системы заключается в том, что между внешними силами Q_1 и Q_2 существует связь, определяемая соотношением

$$Q_1 = \alpha Q_2 \text{ или } Q_1 = Q,\ Q_2 = Q\alpha. \qquad (2)$$

Здесь α – коэффициент связи между силами (может быть положительным и отрицательным). Запишем передаточные функции системы для возможных пар «сила – смещение»:

$$W_1(p) = \frac{\bar{y}_1}{\bar{Q}_1} = \frac{\bar{y}}{\bar{Q}} = \frac{m_2 p^2 + k_2(1+\alpha)}{A_0}, \qquad (3)$$

$$W^2{}_2(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{Q}} = \frac{\alpha(m_1 p^2 + k_1 + k_2)}{A_0}, \qquad (4)$$

где

$$A_0 = (m_1 p^2 + k_1 + k_2)(m_2 p^2 + k_2) - k_2^2 \qquad (5)$$

характеристическое уравнение.

Полагая, что $p = 0$, $Q_1 = const$, $Q_2 = const$, α изменяется в пределах от 0 до некоторого значения Q. Точки приложения сил Q_1 и Q_2 на рис. 1 и 2 обозначены как точки A_1 и A_2. Если Q_1 приложена в точке A_1 и точка наблюдения совпадает с точкой приложения силы, то k_{11} определится из передаточной функции (3), тогда

$$k_{11} = \frac{k_1}{1+\alpha}. \qquad (6)$$

Если сила Q_1 приложена в т. A_1, а наблюдается точка A_2, то приведенная жесткость k_{12} может быть найдена из следующих соображений.

Система имеет два входных сигнала Q_1 и Q_2, поэтому

$$\bar{y}_2 = W_1' Q_1 + W_2'' Q_2, \qquad (7)$$

при этом

$$W_1' = \frac{\bar{y}_2}{\bar{Q}_1\ (\bar{Q}_2 = 0)} = \frac{k_2}{A_0}, \qquad (8)$$

$$W_1'' = \frac{\bar{y}_2''}{\bar{Q}_2\ (\bar{Q}_1 = 0)} = \frac{m_1 p^2 + k_1 k_2}{A_0}. \qquad (9)$$

Так как $\bar{y}_2 = \bar{y}_2' + \bar{y}_2''$, то

$$\bar{y}_2 = \frac{k_2 \bar{Q}_1 + \bar{Q}_2 (m_1 p^2 + k_1 + k_2)}{A_0}. \qquad (10)$$

I. Статические взаимодействия в цепных системах

С учетом соотношения (2) получим

$$\frac{\bar{y}_2}{\bar{Q}} = \frac{k_2 + \alpha(k_1 + k_2)}{k_1 k_2} \quad (\text{при } p = 0). \qquad (11)$$

Приведенная жесткость k_{12} в конечном итоге определится:

$$k_{12} = \frac{k_1 k_2}{k_2 + \alpha(k_1 + k_2)} = \frac{k_1 k_2}{2k_1 + (1+\alpha)k_2}. \qquad (12)$$

Если сила Q_2 приложена в точке A_2, то приведенная жесткость в точке A_2 имеет вид (при совпадении точки приложения силы и точки наблюдения), исходя из (4):

$$k_{22} = \frac{k_1 k_2}{k_2 + \alpha(k_1 + k_2)} = \frac{k_1 k_2}{k_1 \alpha - k_2(1+\alpha)}, \qquad (12')$$

то есть k_{22} и k_{12} совпадают. При силе Q_2, приложенной в точке A_2 и точке наблюдения A_1 аналогично, $\bar{y}_1 = y_1' + y_1''$, где $y_1' = W^{III} \bar{Q}_2 + W^{IV} \bar{Q}_1$; в свою очередь, $W^{III} = \frac{\bar{y}_1'}{\bar{Q}_2\ (\bar{Q}_1 = 0)} = \frac{k_2}{A_0}$; $W^{IV} = \frac{\bar{y}_1''}{\bar{Q}_1\ (Q_2 = 0)} = \frac{m_2 p^2 + k_2}{A_0}$; окончательно $\frac{\bar{y}_1}{\bar{Q}} = \frac{(mp^2 + k_2)\alpha + k_2}{A_0}$, откуда при $p = 0$ $k_{21} = \frac{k_1}{1+\alpha}$, что совпадает с выражением (6). Таким образом, в данном случае $k_{11} = k_{21}$, $k_{22} = k_{12}$. Полученные результаты, на первый взгляд, не совпадают с данными, приведенными в статье [7], однако, если в [7] принять, что для определения k_{11} и k_{12} было принято: $\alpha = 0$, а при вычислении k_{22} и k_{21} было взято $Q_1 = 0$, а $Q_2 = Q(\alpha = 1)$, то из (6) следует $k_{11} = k_1$; из выражения (12) – $k_{12} = k_1$; из (12'), с учетом того, что в знаменателе один член k_2 уходит, получим $k_{22} = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2}$, а $k_{21} = k_1$. Таким образом, если сравнить результаты с данными в [7], то с учетом одноканальности внешнего воздействия в [7] представленные в настоящей статье результаты можно рассматривать как обобщение, приводимое к ранее полученным данным.

II. Динамические свойства цепных систем

Из выражений (3) и (4) можно получить режимы динамического гашения колебаний:

по координате y_1

$$\omega_1^2 = \frac{(\alpha+1)k_2}{m_2}; \qquad (13)$$

по координате y_2

$$\omega_{2дин}^2 = \frac{\alpha k_1 + k_2(1+\alpha)}{\alpha m_1} = \frac{(k_1 + k_2) + k_2/\alpha}{m_1}; \qquad (14)$$

по координатам $y_2 - y_1$

$$\omega_{(y_2 - y_1)дин}^2 = \frac{k_1}{m_1 - \alpha m_2}. \qquad (15)$$

Таким образом, рассмотрение расчетной схемы на рис. 1 с учетом групповых или комбинационных связей между внешними силовыми воздействиями вносит существенные изменения в представления о динамических свойствах системы; в частности, частота динамического гашенияпо координате y_1 становится зависимой от α, которое, в свою очередь, может изменяться в пределах $(-\infty \le \alpha \le \infty)$ (во всяком случае, α может принимать положительные и отрицательные значения). Кроме того, при двухканальном возмущении появляется возможность получать и другие режимы динамического гашения. В этом плане использование или учет групповых или комбинационных свойств силового возмущения (в данном случае физический смысл заключается в реализации двухканального входа) представляет собой способ управления динамическим состоянием системы вибрационной защиты объекта. Ряд интересных исследований в этом направлении получил отражение в работах [9–10].

Если рассматривать цепные механические системы с большим числом степеней свободы, то методическая основа исследований остается той же, однако, исходная система может рассматриваться уже с тремя входными сигналами при соответствующем установлении связей с сигналом, который будет считаться основным; к примеру, при трех внешних воздействиях Q_1, Q_2, Q_3 можно

полагать, что рассматривается групповая или комбинационная система Q_1; $Q_2 = Q_1\alpha$; $Q_3 = Q_1\beta$. Коэффициенты α и β имеют особое значение при равенстве нулю, поскольку система в этом случае переходит в иное состояние – меняется число внешних каналов.

Система с двумя степенями свободы барачного типа

В транспортных подвесках в качестве базовой модели часто используется система с двумя степенями свободы. Рассмотрим схему на рис. 3, где точки наблюдения (т. A_1 и A_3) вынесены за пределы твердого тела.

Примем для дальнейших расчетов ряд обозначений: $OA_1 = l_1$, $OA_2 = l_2$, $OA = l'$, $OA_3 = l''$; y, φ, y_1, y_2 – обобщенные координаты объекта в неподвижной системе координат; k_1, k_2 – упругости, M, I – массоинерционные параметры. Используя обычные приемы, составим систему уравнений движения в координатах y_1 и y_2:

$$a_{11}y_1 + a_{12}y_2 = Q_1', \quad a_{21}y_1 + a_{22}y_2 = Q_2', \quad (16)$$

где Q_1', Q_2' – обобщенные силы, соответствующие координатам y_1, y_2;

$$a_{11} = (Ma^2 + Ic^2)p^2 + k_1, \quad a_{12} = (Mab - Ic^2)p^2, \quad (17)$$

$$a_{12} = a_{21}, \quad a_{22} = (Mb^2 + Ic^2)p^2 + k_2.$$

В выражении (17) приняты следующие обозначения и соотношения:

$$a = \frac{l_2}{l_1 + l_2}, \; b = \frac{l_1}{l_1 + l_2}, \; c = \frac{1}{l_1 + l_2},$$

$$y = y_1 a + y_2 b, \quad \varphi = c(y_2 - y_1), \quad (18)$$

$$y_1 = y - l_1\varphi, \; y_A = y - l_1'\varphi, \; y_{A_3} = y + l''\varphi.$$

Обобщенные силы Q_1' и Q_2' в (16) зависят от выбора системы обобщенных координат и мест приложения силовых факторов.

1. Выберем систему координат y и φ и используем подходы, изложенные в работе [7], перенесем в точку О (центр тяжести) параллельно самим себе силы Q_1 и Q_2, что сформирует силу $Q_0 = Q_1 + Q_2$; одновременно относительно точки может быть сформирован момент сил $M_0 = Q_1 l' - Q_2 l''$. Запишем суммы работ на виртуальных перемещениях для систем координат y_1 и y_2 (силы Q_1' и Q_2' соответственно) и для y и φ.

$$\delta y Q_0 + \delta\varphi M_0 = \delta y_1 Q_1' + \delta y_2 Q_2'. \quad (19)$$

Примем, $Q_0 = Q_1(1+\alpha)$; $(Q_1 = Q)$, при этом $Q_2 = \alpha Q_1$, $M = Q_1 l' - \alpha Q_1 l'' = Q(l' - \alpha l'') = Ql'(1 - \alpha\beta)$, где $\beta = \frac{l''}{l_1}$. Таким образом, в системе координат y и φ обобщенные силы определяются:

$$\begin{aligned} Q_0 &= Q(1+\alpha), \\ M_0 &= Ql'(1-\alpha\beta), \end{aligned} \quad (20)$$

где α, β – коэффициенты, которые изменяются в пределах от $-\infty$ до $+\infty$, переходя через 0. Отметим, что случай $\beta = 0$ и $\alpha = 0$ рассмотрен авторами в [7]. Используем (18) и (19) и получим

$$\delta y_1 aQ(1+\alpha) + \delta y_2 bQ(1+\alpha) + c\delta y_2 Ql'(1-\alpha\beta) -$$

$$-\delta y_1 cQl'(1-\alpha\beta) = \delta y_1\left[Qa(1+\alpha) - cl'Q(1-\alpha\beta) + \delta y_2\right] \times$$

$$\times\left[bQ(1+\alpha) + cQl'(1-\alpha\beta)\right] = \delta y_1 Q_1' + \delta y_2 Q_3',$$

откуда

$$Q_1' = Q(Q(1+\alpha)) = cl'(1-\alpha\beta), \quad (21)$$

$$Q_2' = Q\left[b(1+\alpha) + cl'(1-\alpha\beta)\right]. \quad (22)$$

В соответствии с [11], между обобщенными силами и координатами в (16) существуют зависимости

$$\bar{y} = \frac{\bar{Q}_0 a_{22} - \bar{M}_0 a_{12}}{A_0}, \quad (23)$$

$$\bar{\varphi} = \frac{-\bar{Q}_0 a_{12} + \bar{M} a_{11}}{A_0}, \quad (24)$$

$$\bar{y}_1 = \frac{Q_1' a_{22} - Q_2' a_{12}}{A_0'}, \quad (25)$$

$$\bar{y}_2 = \frac{-Q_1' a_{12} + Q_2' a_{11}}{A_0'}, \quad (26)$$

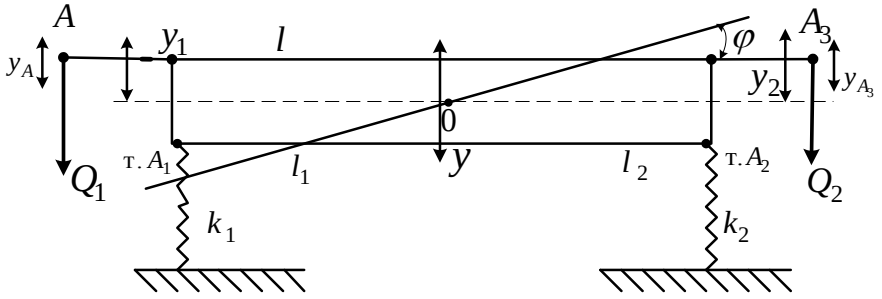


Рис. 3. Расчетная схема системы для определения её статической устойчивости

где a_{11}, a_{22}, $a_{12}=a_{21}$ для (25), (26) определяются из (17); для (23), (24) имеем соответственно

$$a_{11}=Mp^2+k_1+k_2,\ a_{12}=a_{21},\ a_{22}=Ip^2+k_1l_1^2+k_2l_2^2;$$

$$A_0=(Mp^2+k_1+k_2)(Ip^2+ +k_1l_1^2+k_2l_2^2)-(k_1l_1-k_2l_2)^2, \quad (27)$$

$$A_0'=\left[(Ma^2+Ic^2)+k_1\right]\times \times\left[(Mb^2+Ic^2)p^2+k_2\right]-\left(Ic^2-Mab\right)^2. \quad (28)$$

Структурные схемы эквивалентных в динамическом отношении систем автоматического управления приведены для систем обобщенных координат y_1, y_2 и φ соответственно на рис. 4 а, б.

Полагая, что сила Q приложена в точке A, координата движения которой обозначается y_A, запишем, что

$$y_A=y-l'(\varphi) \quad (29)$$

и найдем y и φ из выражения (18).

Используем (23) и (29) и получим в более общем случае:

$$\overline{y}_A=\frac{Q(1+\alpha)a_{22}-Ql'(1-\alpha\beta)a_{12}+}{A_0}... ...\frac{+l'Q(1+\alpha)a_{12}-Q(l')^2(1-\alpha)^3a_{11}}{A_0}; \quad (29')$$

$$W_A(p)=\frac{y_A}{\overline{Q}}=\frac{-(l')^2(1-\alpha)^3a_{11}+}{A_0}... ...\frac{+l'\left[(1+\alpha)a_{12}-(1-\alpha\beta)a_{12}\right]+a_{22}(1+\alpha)}{...}. \quad \text{b} \quad (30)$$

Из числителя (30)

$$-(l')^2(1-\alpha\beta)(k_1+k_2)+l'\times \times\left[\alpha(1+\beta)(k_2l_2-k_1l_1)\right]+(1+\alpha)(k_1l_1^2+k_2l_1^2)=0 \quad (31)$$

или

$$(l')^2-l'\frac{\alpha(1+\beta)(k_2l_2-k_1l_1)}{(1-\alpha\beta)(k_1+k_2)}- -\frac{(1+\alpha)(k_1l_1^2+k_2l_2^2)}{(1-\alpha\beta)(k_1+k_2)}=0. \quad (32)$$

Решение квадратного уравнения (32) имеет вид:

$$l_{\hat{o}\partial}^2=(l')_{1,2}^2=\frac{\left[\alpha(1+\beta)(k_2l_2-k_1l_1)\right]}{2(1-\alpha\beta)(k_1+k_2)}\pm \pm\sqrt{\frac{\left[\ \right]^2(1-\alpha\beta)(k_1+k_2)L_1(1+\alpha)(k_1l_1^2+k_2l_2^2)}{\varphi(1-\alpha\rho)^2(k_1+k_2)^2}}. \quad (33)$$

Для $(l')^2$ получим одно положительное решение, то есть положительное число, откуда может быть найдено $\pm l_1$, которое можно назвать критическим. Если сила Q прикладывается в точке A, отстоящей от центра тяжести на величину l' или $-l'$, то податливость системы в этой точке будет равна нулю. В выражение (30) можно подставлять значения $l'=0$, $l'=l_1$, а также $l'=-l_2-$ и получать соответствующие значения податливостей и приведенных жесткостей в точках O, A_1, A_2.

Например, при $l'=0$ для определения податливости получим:

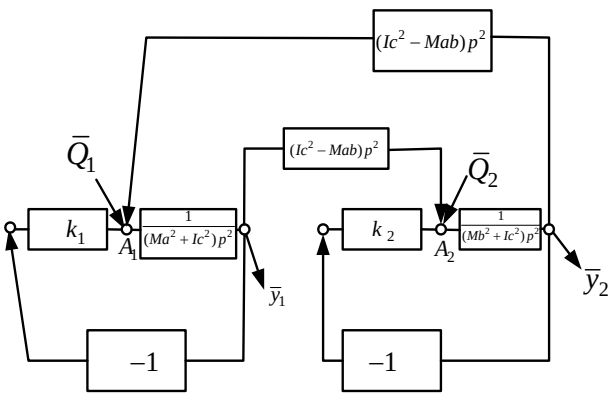
$$\frac{\overline{y}_A}{\overline{Q}\ (l'=Q)}=\frac{(1+\alpha)(k_1l_1^2+k_2l_2^2)}{k_1k_2(l_1+l_2)^2}, \quad (34)$$

а для приведенной жесткости соответственно

$$k_{np}=\frac{k_1k_2(l_1+l_2)^2}{(1+\alpha)(k_1l_1^2+k_2l_2^2)}. \quad (35)$$

В свою очередь, примем, что $l'=l_1$, используем (30):

а)



б)

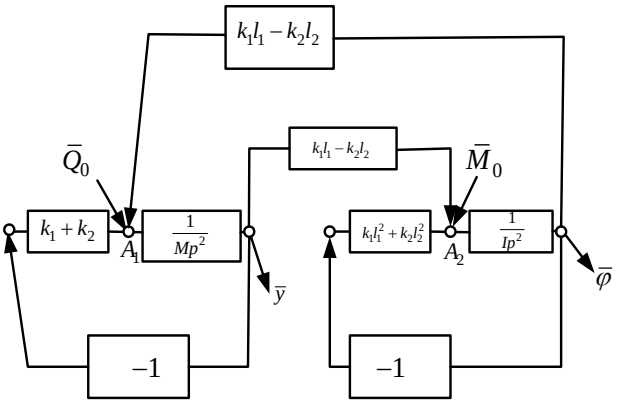


Рис. 4. Структурные схемы, соответствующие расчетной схеме системы на рис. 1: а) для системы координат y_1, y_2; б) для системы координат y и φ

$$W(p)\frac{\bar{y}_A}{\bar{Q}(l'=l_1)}=\frac{-l_1^2(1-\alpha\beta)(k_1+k_2)+}{k_1k_2(l_1+l_2)^2}\ldots$$
$$\ldots\frac{+l_1\left[\alpha(1+\beta)(k_2l_2-k_1l_1)\right]+(1+\alpha)(k_1l_1^2+k_2l_2)}{\ldots}= \quad (36)$$
$$=\frac{k_2l_1l_2\alpha(1+\beta)+\alpha(k_2l_2^2+\beta k_2l_1^2)}{k_1k_2(l_1+l_2)^2};$$

пусть $l=-l_2$:

$$\frac{y_A}{Q}=-\frac{(l_2)^2(k_1+k_2)(1-\alpha\beta)-l_2\alpha a_{12}-\alpha\beta a_{12}l_2}{A_0}=$$
$$=\frac{(k_1l_1^2+k_2l_2^2)(1+\alpha)}{A_0}=$$
$$=\frac{\alpha\beta(kl_2^2+k_1l_1l_2)+\alpha(k_1l_1^2+k_1l_1l_2)}{(k_1k_2)(l_1+l_2)^2}= \quad (37)$$
$$=\frac{k_1l_1l_2\alpha(1+\beta)+k_1\alpha(l_1^2+\beta l_2^2)}{(k_1k_2)(l_1+l_2)^2}.$$

Приведенная жесткость системы при приложении силы Q в т. l_1 будет определяться

$$k_{ïð}=\frac{k_1(l_1+l_2)^2}{\alpha l_1l_2(1+\beta)+\alpha(l_1^2\beta+l_2^2)}; \quad (38)$$

при $l=-l_2$

$$k_{ïð}=\frac{k_2(l_1+l_2)^2}{l_1l_2\alpha(1+\beta)+\alpha(l_1^2+\beta\alpha_2)}. \quad (39)$$

Если подставить в (30) $l'=l_{êð}$, определенное из уравнения (32), то приведенная жесткость в точках $l'=l_{êð}$ и $l'=-l_{êð}$ будет равна ∞. Для приближенного определения $l_{êð}$ можно записать условия, используя (32):

$$l'=l_{êð}>\frac{\alpha(1+\beta)(k_2l_2-k_1l_1)}{(1-\alpha\beta)(k_1+k_2)}.$$

Режимы динамического гашения могут быть получены при $p\neq 0$ из выражений (23)–(26) путем соответствующих преобразований. Например, по координате y из (23) общее выражение принимает вид:

$$\frac{\bar{y}}{Q}=\frac{(1+\alpha)(Ip^2+k_1l_1^2+k_2l_2^2)-}{k_1k_2(l_1+l_2)^2}\ldots$$
$$\ldots\frac{-(k_2l_2-k_1l_1)l'(1-\alpha\beta)}{\ldots.}, \quad (40)$$

при $l_1'=0$, когда сила прикладывается к центру тяжести,

$$\omega_{ãèí}^2=\frac{(k_1l_1^2+k_2l_2^2)(1+\alpha)}{I}. \quad (41)$$

Развивая аналогичный подход, можно получить необходимые соотношения и для других случаев приложения силовых факторов, когда силы будут ориентированы на точки приложения, определяемые $l'=l_1$ и $l'=l_2$. В табл. 1 приведены необходимые данные.

Приведенные жесткости (и приведенные податливости) определяются таким же образом, поскольку для расчетов частот динамического гашения и жесткостных параметров используется одна и та же передаточная функция (перемещение по силе). В этом случае предельное значение приведенной жесткости на плече $l_{êð}$ можно рассматривать как формирование состояния равновесия, при котором система проявляет возможность поворота вокруг точки. Отрицательное значение k_{np} связано с представлениями о потере статической устойчивости. Полученные соотношения определяют, как

Таблица 1

Сводная таблица формул для определения частот динамического гашения при разных точках приложения силы

		Квадратные частоты динамического гашения			
№ п/п	Расстояние	Центр тяжести (y)	Угол поворота (φ)	Координата y_1	Координата y_2
1.	$l'=0$	$\frac{k_1l_1^2+k_2l_2^2}{I}$	Режим отсутствует	$\frac{k_2}{Ic^2+Mb^2}$	$\frac{k_1}{Ma^2+Ic^2}$
2.	$l'=l_1$	$\frac{k_1l_1^2(1+\alpha)+l_1^2(1-\beta)+}{\ldots\frac{+k_2\left[l_2^2(1-\alpha)-l_1l_2(1-\alpha\beta)\right]}{I(1+\alpha)}}$	$\frac{k_1\left[l_1(1+\alpha)-l_2(1-\alpha\beta\right]-}{\ldots\frac{-k_2\left[l_3(1+\alpha)-l_2(1-\alpha\beta)\right]}{-Ml_2(1-\alpha\beta)}}$	$\frac{k_2\left[a(1+\alpha)-cl_1(1-\alpha\beta\right]}{Ic^2(1+\alpha)-Mbcl_1(1-\alpha\beta)}$	$\frac{k_1\left[b(1+\alpha)+cl_1(1-\alpha\beta\right]}{Ic^2(1+\alpha)+Macl_1(1-\alpha\beta)}$
3.	$l'=-l_2$	$\frac{k_1\left[l_1^2(1+\alpha)-l_1l_2(1-\alpha\beta\right]+}{\ldots\frac{+k_2\left[l_2^2(1+\alpha)+l^2{}_2(1-\alpha\beta)\right]}{I(1+\alpha)}}$	$\frac{k_1\left[l_1(1+\alpha)+l_1(1-\alpha\beta\right]-}{\ldots\frac{-k_2\left[l_2(1+\alpha)-l{}_2(1-\alpha\beta)\right]}{Ml_1}}$	$\frac{k_2\left[a(1+\alpha)+cl_2(1-\alpha\beta\right]}{Ic^2(1+\alpha)+Mb(1-\alpha\beta)}$	$\frac{k_1\left[b(1+\alpha)-cl_2(1-\alpha\beta\right]}{Ic^2(1+\alpha)-Mbcl_2(1-\alpha\beta)}$

показано на рис. 3, границы возможной области изменения параметров системы внешних воздействий.

Заключение

Таким образом, при действии на виброзащитную систему нескольких сил при установлении между ними некоторых соотношений между величинами сил и геометрическими параметрами их приложения могут возникать ситуации расширения возможностей настроечных процессов. Учет особенностей системы внешних воздействий находит отражение в соотношениях, которые определяют, в частности, режимы динамического гашения колебаний, позволяя тем самым изменения границ частотных интервалов для эффективной виброзащиты. Поскольку параметры внешних сил входят в числитель передаточных функций системы, то параметры внешних силовых факторов оказывают влияние и на форму амплитудно-частотных характеристик, создавая основу для решения задач динамического синтеза.

Расширение набора настроечных параметров обеспечивает возможности новых направлений синтеза, в которых определенные условия накладываются одновременно на режимы динамического гашения по нескольким координатам виброзащитной системы. Такие ситуации можно рассматривать как проявление групповых или связанных режимов динамического гашения, а также как и одну из форм в подходах рационального конструирования виброзащитных систем.

При нескольких одновременно действующих факторах часть из них является внешними возмущениями, параметры которых могут быть заранее определены путем соответствующих измерений. Другие факторы могут быть сформированы искусственным путем, что требует разработки специальных средств формирования дополнительных сил, прикладываемых в соответствующих точках виброзащитной системы. Отметим, что предлагаемый подход в задачах виброзащиты и виброизоляции машин, оборудования и аппаратуры по сущности своей очень близок к тем направлениям изменения динамического состояния механических колебательных систем, которые связаны с уравновешиванием и балансировкой вращающихся объектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ден-Гартог Дж. Механические колебания. М. : Наука. 1962. 530 с.
2. Коренев Б. Г., Резников П. М. Динамические гасители колебаний. Теория и технические приложения. М. : Наука, 1963. 535 с.
3. Елисеев С. В., Нерубенко Г. П. Динамические гасители колебаний. Новосибирск. : Наука. Сиб. отдние, 1982. 212 с.
4. Dynamics of Mechanical Systems with Additional Ties / Irkutsk State University of Railway Engineering ; Eliseev S. V., Lukyanov A. V., Reznik Yu. N., Khomenko A. P. Irkutsk, 2006. 310 p.
5. Ермошенко Ю. В. Управление вибрационным состоянием в задачах виброзащиты и виброизоляции : дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. – Иркутск: ИрГУПС, 2002. 185 с.
6. Елисеев С. В., Резник Ю. Н., Трофимов А. Н. Задачи динамического гашения колебаний как задачи введения обратных дополнительных связей в управлении состоянием // Информационные и математические технологии в науке и управлении : тр. XVI Байкал. Всерос. науч. конф. Т. 2. Иркутск, 2010. С. 7–16.
7. Елисеев С. В. Ермошенко Ю. В., Гордеева А. А. Приведенная жесткость и передаточная функция виброзащитной системы при стационарных и периодических воздействиях // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. № 1 (29). С. 74–80.
8. Динамический синтез в обобщенных задачах виброзащиты и виброизоляции технических объектов / С. В. Елисеев, Ю. Н. Резник, А. П. Хоменко, А. А. Засядко. Иркутск. : Изд-во Ирк. гос. ун-та, 2008. 523 с.
9. Банина Н. В. Структурные методы динамического синтеза колебательных систем с учетом особенностей физических реализаций обратных связей : дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. Иркутск : ИрГУПС, 2006. 196 с.
10. Пат. 56858 Российская Федерация, МПК^{6} A1, B 60, L 9/00. Устройство для управления состоянием объекта защиты / Хоменко А. П., Елисеев С. В., Гозбенко В. Е., Банина Н. В. ; заявитель и патентообладатель Иркут. гос. ун-т путей сообщ. № 200611367/22 ; заявл. 21.04.2006 ; опубл. 27.09.2006, Бюл. № 27. 5 с. : ил.
11. Дружинский И. А. Механические цепи. Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1977. – 242 с.

УДК 007, 519

Баденков Артем Викторович,
ректор Ангарской государственной технической академии,
кандидат технических наук, доцент, (3955) 67-89-06, rector@agta.irmail.ru
Балакирев Валентин Сергеевич,
профессор кафедры технической кибернетики и автоматики
Московского государственного университета инженерной экологии,
доктор технических наук, профессор, (495) 267-12-67
Истомин Андрей Леонидович,
проректор по учебной работе Ангарской государственной
технической академии, кандидат технических наук, доцент, (3955) 67-88-45, istomin@agta.irmail.ru

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ СОСТАВЛЕНИЯ РАСПИСАНИЯ УЧЕБНЫХ ЗАНЯТИЙ В ВУЗЕ

A.V. Badenikov, V.S. Balakirev, A.L. Istomin

FORMALIZATION OF THE OCCUPATION TIMETABLE SCHEDULING IN HIGHER EDUCATION INSTITUTION

Аннотация. *Предложена постановка задачи и методы формализованного составления расписания занятий в вузе.*

Ключевые слова: *вуз, расписание занятий, оптимизация.*

Abstract. *The statement of the problem and methods of the formalized formation occupation timetable scheduling in higher education institution are offered.*

Keywords: *higher education institution, occupation timetable, optimization.*

Введение

Анализ задачи составления расписания занятий в вузе показал, что ее размерность можно значительно сократить, если свести ее к классической задаче теории расписаний – задаче распределения конечного множества работ по конечному множеству станков. Действительно, в каждом вузе перед составлением расписания занятий, автоматически, либо лицом, принимающим решение (ЛПР), решается задача распределения учебных поручений среди преподавателей вуза, закрепляющая за каждым преподавателем установленный объем учебной работы, включающий перечень занятий каждого вида, по порученным дисциплинам с группами, подгруппами или потоками обучающихся. В этом случае задача формализованного составления расписания занятий сводится лишь к тому, чтобы наилучшим образом распределить конечное множество конкретных занятий по конечному множеству учебных помещений.

Немаловажной задачей, связанной с построением расписания занятий является выбор критерия оптимальности расписания. Анализ рассмотренных моделей составления расписаний учебных занятий показал, что этот вопрос остается нерешенным. В целом, в большинстве работ отсутствует связь между формализацией задачи и принятым способом определения качества расписания (переменные, используемые для получения решения задачи, не используются при определении качества этого решения). После решения задачи нельзя ответить на вопросы, возможно ли устранить недостатки, имевшиеся в расписании, и насколько близко оно к оптимальному (хотя бы в вероятностном смысле). Кроме того, главный недостаток существующих моделей составления расписания занятий в том, что они не предусматривают обратной связи между расписанием занятий, ресурсами вуза и экономическими показателями его реализации.

Очевидно, что если расписание таково, что простои учебных помещений в нем минимальны, то это означает, что эти учебные помещения при одних и тех же затратах на их содержание загружены эффективнее, чем при другом расписании. Таким образом, правильно составленное расписание позволяет провести все занятия в меньшем количестве учебных помещений. При планировании расписания занятий семестра эти преимущества могут выразиться в существенном сокращении затрат на содержание учебных помещений вуза. Исходя из вышесказанного, актуальной ста-

новится такая формализация задачи нахождения расписания занятий в вузе, где в качестве критерия оптимальности используются затраты, связанные с использованием учебных помещений.

Кроме того, учитывая вычислительную сложность задач синтеза оптимальных расписаний уже для системы обслуживания, состоящей из двух станков, перспективным к составлению расписания занятий является подход, в котором используются те или иные приемы агрегирования, декомпозиции и локальной оптимизации.

Постановка задачи

Пусть имеется система занятий, которая определена как $\Im$, $\neq$, $[\tau_i]$, $\{\varpi_i\}$ следующим образом.

1. $\Im = \{T_1, T_2, ..., T_n\}$ есть общий список занятий, подлежащих назначению в учебные помещения.

2. $\neq$ обозначает заданные ограничения на одновременное выполнение занятий. Запись $T_i \neq T_j$ означает, что занятие T_i не может проводиться в одно время с занятием T_j. Данные ограничения позволяют исключить случаи назначения в одно время разных занятий с одними и теми же обучающимися или преподавателем.

3. $[\tau_i]$ есть продолжительность занятия T_i ($i = \overline{1, n}$). В большинстве вузов продолжительность занятия измеряется числом тактов времени двухчасовой длительности или в парах, т. е. двухчасовое занятие равно одной паре. Часть занятий, например, по физической культуре или лабораторные работы, могут иметь большую продолжительность, но кратную учебной паре.

4. $\{\varpi_i\}$ есть вес занятия T_i ($i = \overline{1, n}$). Если представить все занятия в виде вершин одного графа, а условия несовместимости занятий по времени отразить с помощью ребер так, чтобы между каждой парой несовместимых по времени занятий в графе присутствовало ребро, то количество ребер ϖ_i, входящих в i-ю вершину графа, соответствующую занятию T_i, и определяет вес занятия. Очевидно, что занятия с высокими весами должны назначаться в расписание раньше, поскольку с ростом t количество вариантов назначений для таких занятий резко уменьшается. Если вес занятия интерпретировать как удельный штраф от того, что занятие до сих пор не назначено в расписание, то штраф от назначения занятия T_i в момент времени t равен $\varpi_i t$.

Обозначим через $\Re$ множество имеющихся в вузе учебных помещений. Будем считать, что множество учебных помещений $\Re$ можно разбить на j-е количество подмножеств или групп ($j = \overline{1, m}$) либо автоматически, либо лицом, принимающим решение, в интерактивном режиме по соображениям близости обобщенных или усредненных первичных параметров (вместимость, специализация, место расположения и т. д.). При этом будем считать, что все учебные помещения j-й группы являются идентичными, например лекционные аудитории, вмещающие до одной группы обучающихся, двух групп и т. д. Группа учебных помещений может состоять и из одного учебного помещения, если оно отличается от всех остальных по функциональным признакам, вместимости и прочим характеристикам, например специализированная лаборатория по отдельной дисциплине.

Учебные помещения разных групп могут быть не вполне взаимозаменяемыми по отношению к некоторым занятиям, т. е. персональная совместимость учебных помещений j-й группы с занятиями из множества $\Im$ стеснена булевой $n \times m$-матрицей $\mathbf{E} = \|e_{ij}\|$, каждый элемент которой $e_{ij} = 1$ означает допустимость назначения занятия T_i в учебное помещение j-й группы, а элемент вида $e_{ij} = 0$ соответствует запрету на такое назначение ($i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$). Каждая строка матрицы $\mathbf{E}$ содержит не менее чем один отличный от нуля элемент, т. е. для каждого занятия множества $\Im$ подмножество совместимых с ним учебных помещений непусто.

Обозначим через B_j фонд времени (или крайний срок) использования учебных помещений j-й группы в неделю или две недели (зависит от типа расписания, принятого в вузе). Очевидно, что если нет запретов на назначения занятий в учебные помещения в отдельные временные отрезки, то фонд времени использования всех учебных помещений равен общему количеству пар в расписании занятий в неделю или две недели в зависимости от типа расписания, принятого в вузе.

Использование каждого учебного помещения j-й группы связано с затратами c_j на его содержание (эксплуатационные расходы, аренда, охрана и т. п.). Пусть y_j – количество учебных помещений j-й группы, $j = \overline{1, m}$. Необходимо найти такое количество учебных помещений каждой группы, чтобы могли быть выполнены все обязательные требования к расписанию занятий и чтобы затраты на использование учебных поме-

щений были минимальны.

Математическая формулировка задачи выглядит следующим образом:
минимизировать

$$f = \sum_{j=1}^{m} c_j y_j \qquad (1)$$

при условиях

$$\sum_{j=1}^{m} e_{ij} x_{ij} = 1,\ i = \overline{1, n}, \qquad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ij} \tau_i \le B_j \cdot y_j,\ j = \overline{1, m}, \qquad (3)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}. \qquad (4)$$

Поясним смысл интерпретации задачи. Величина $x_{ij} \in \{0,1\}$ есть показатель того, будет ли назначено занятие T_i в учебные помещения j-й группы. Так, если $x_{ij} = 1$, то в расписании занятие T_i будет проводиться в учебных помещениях j-й группы, если $x_{ij} = 0$, то занятие T_i не будет проводиться в учебных помещениях j-й группы. Условие (2) требует, чтобы все занятия были выполнены, а наложение условия целочисленности на x_{ij} означает, что занятие T_i может быть проведено только в одном учебном помещении, так как расписание реализуется без прерываний. Условие (3) означает ограничение на длину расписания или максимальный объем времени использования учебных помещений j-й группы.

Тогда (1) означает, что задача состоит в нахождении таких значений y_j, $j = \overline{1, m}$, при которых значение f (суммарные затраты на использование учебных помещений) минимально.

Отметим, что в данной формулировке участвует матрица **E** с элементами e_{ij}, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$.

Следует отметить, что постановка задачи (1)–(4) не учитывает взаимозависимость занятий. Действительно, если представить, например, что имеются два взаимозависимых занятия, каждое из которых имеет продолжительность, равную одной паре, а фонд использования всех учебных помещений не более одной пары, то никакое количество учебных помещений не позволит составить расписание. Поэтому необходимо, чтобы количество пар в расписании занятий было больше, чем максимально возможное количество взаимосвязанных занятий. Это, во-первых, позволит значительно сократить количество требуемых учебных помещений, а во-вторых, создает предпосылки для получения более качественного расписания занятий.

Общая практика составления расписаний занятий в вузах показывает, что общее число пар в расписании занятий в неделю или две недели в зависимости от расписания много больше, чем число взаимозависимых или взаимосвязанных занятий. Так, например, при шестидневной рабочей неделе и четырех парах двухчасовой длительности в любом рабочем дне общее количество пар в расписании составляет число, равное 24. В то же время максимально возможное число взаимозависимых занятий у одних и тех же обучающихся, в соответствии с ФГОС, не может быть больше 13–18, иначе будет нарушен ФГОС в части предельного числа часов аудиторных занятий в неделю на одного обучающегося, которые находятся в диапазоне от 26 до 36 часов в зависимости от направления или специальности.

В дальнейшем будем априори полагать, что общее количество пар или тактов времени двухчасовой длительности в расписании занятий много больше числа максимально взаимосвязанных занятий, что позволяет применить постановку задачи (1)–(4) для нахождения оптимальной структуры учебных помещений.

Задача нахождения оптимальной структуры учебных помещений (1)–(4) сформулирована как задача целочисленного линейного программирования с булевыми переменными, принимающими значения 0 или 1, и является классической задачей дискретной оптимизации.

К сожалению, задача (1)–(4) может быть решена методами целочисленного линейного программирования только для очень малых размеров n и m. Кроме того, задача целочисленного линейного программирования является NP-полной задачей, для которой нет эффективного решения, т. е. точного алгоритма, решающего задачу за полиномиальное время. Полный перебор имеет экспоненциальную сложность и может хорошо работать только для небольших размеров задачи. Следовательно, необходимы приближенные алгоритмы для решения задачи нахождения оптимальной структуры учебных помещений. Такие алгоритмы часто не подразумевают априорных оценок точности и не гарантированы от сколь угодно больших погрешностей.

Существует множество разновидностей этой задачи, широко используемых в практике, для которых были разработаны «хорошие» приближенные алгоритмы решения. Это задачи об упаковке в контейнеры, о ранце, о распределении файлов на съемных носителях и вообще такие задачи, в кото-

рых несколько «кусков» различной «длины» должны быть образованы из кусков, имеющих стандартную длину.

Действительно, если каждое занятие T_i представить в виде прямоугольника, имеющего длину τ_i, который следует уложить в полосу или контейнер единичной ширины в последовательные интервалы времени так, чтобы они не пересекались с прямоугольниками других занятий, а общая длина прямоугольников не превышала заданную длину контейнера, то задача нахождения минимального количества учебных помещений аналогична одномерной задаче упаковки в контейнеры [1], в которой необходимо упаковать заданную совокупность «весов» в минимальное число «контейнеров».

Получили распространение четыре алгоритма упаковки в контейнеры [1, 2]. В каждом из этих алгоритмов вес T_1 загружается первым, а вес T_k загружается раньше, чем T_{k+1}, для всех $k \geq 1$.

1. Загрузка в первый подходящий контейнер (или FF: first-fit). Каждый вес T_k помещается в контейнер, имеющий минимальный индекс из числа тех, которые подходят для размещения T_k.

2. Загрузка в лучший из подходящих контейнеров (или BF: best-fit). Каждый вес T_k помещается в такой контейнер, который после помещения T_k будет иметь наименьший неиспользованный объем.

3. Загрузка в первый подходящий контейнер по убыванию весов (или FFD: first-fit-decreasing). Множество весов (T_1, T_2, …, T_n) представляется в виде списка, упорядоченного по невозрастанию весов, и к нему применяется первый алгоритм.

4. Загрузка в лучший из подходящих контейнеров по убыванию весов (или BFD: best-fit-decreasing).

Каждый из алгоритмов может быть реализован за время $O(n\log m)$, где m – количество контейнеров, найденное этим алгоритмом.

В [2] приводятся теоремы, оценивающие точность решений, полученных указанными алгоритмами упаковки.

Разработаем в задаче нахождения структуры учебных помещений эвристический алгоритм.

Очевидно, что в первую очередь необходимо назначить те занятия, для которых количество вариантов назначений минимально. Так, лабораторные работы по химии могут быть проведены только в химической лаборатории. Или поток, включающий большое количество групп студентов, может быть назначен только в самую большую по вместимости лекционную аудиторию. Таким образом, реализуется принцип узкого места. Принцип узкого места означает, что на очередном шаге назначается то занятие, которое вызывает наибольшие трудности.

Для этого заново сформируем список из занятий, упорядоченный по возрастанию значений $\sum_{j=1}^{m} e_{ij}$, $i = \overline{1, n}$. Первым назначается занятие, имеющее наименьшее значение $\sum_{j=1}^{m} e_{ij}$. В случае, если несколько занятий имеют равные значения $\sum_{j=1}^{m} e_{ij}$, первым назначается занятие, имеющее большую продолжительность τ. В случае, если равны $\sum_{j=1}^{m} e_{ij}$ и τ, занятия назначаются в порядке возрастания их индексов.

Применим следующий алгоритм назначения занятий в учебные помещения.

1. Занятие T_k не назначается в «пустое» учебное помещение до тех пор, пока не будет установлено, что это занятие не может быть назначено ни в одно из частично занятых учебных помещений.

2. Если частично занятые учебные помещения есть и занятие T_k совместимо с ними, занятие T_k назначается в то частично занятое учебное помещение, затраты на использование которого наименьшие. Если частично занятых учебных помещений нет либо эти учебные помещения несовместимы с занятием T_k, занятие T_k назначается в пустое учебное помещение, затраты на использование которого наименьшие.

Решение, найденное эмпирическим алгоритмом, полностью совпало с оптимальным решением в части найденного количества учебных помещений и минимальных затрат на их использование, хотя распределение занятий по учебным помещениям получилось иным.

Результаты имитационного моделирования с различными значениями переменных n, m, B, τ и произвольными значениями матрицы $\mathbf{E} = \|e_{ij}\|$ подтвердили эффективность найденного эмпирического алгоритма нахождения наилучшей структуры учебных помещений.

Вычислительный эксперимент показал, что разработанный эмпирический алгоритм позволяет решать задачу нахождения оптимальной структуры учебных помещений для задач большой раз-

мерности.

В результате решения задачи найдена структура учебных помещений $\Re = \{P_1, P_2, ..., P_m\}$, устанавливающая необходимое для расписания количество учебных помещений P_j для каждой группы, при которой затраты вуза на использование учебных помещений минимальны.

Кроме того, в результате решения задачи установлено распределение, закрепляющее каждое занятие из системы $\Im = \{T_1, T_2, ..., T_n\}$ за той или иной группой учебных помещений, т. е. проведена декомпозиция системы занятий $\Im = \{T_1, T_2, ..., T_n\}$ на подмножества $\Im(1)$, $\Im(2)$, …, $\Im(m)$ $(m \le n)$, которые охватывают все множество $\Im$.

Таким образом, все занятия распределены по пакетам, каждый из которых обслуживается вполне конкретной группой учебных помещений, т. е.

$$\{\Im\} = \Im(1) \bigcup \Im(2) \bigcup ... \bigcup \Im(m). \qquad (5)$$

Каждое занятие относится к одному и только одному пакету, т. е.

$$\Im(q) \bigcap \Im(r) = \emptyset, \ (q \ne r, \ q, r = \overline{1, m}). \qquad (6)$$

Общая продолжительность занятий в каждом пакете $\Im(j)$ не превышает суммарного фонда времени использования учебных помещений j-й группы.

В таком случае задача составления расписания занятий, сгруппированных в пакет $\Im(j)$, может быть сведена к классической задаче теории расписаний – задаче распределения заданного множества требований по параллельно работающим идентичным приборам.

Учитывая вычислительную сложность задач синтеза оптимальных расписаний взаимозависимых требований уже для системы обслуживания, состоящей из двух приборов, проводится дальнейшая декомпозиция подмножеств занятий, сгруппированных в пакет, на подмножества, каждое из которых направлено для назначения к вполне определенному учебному помещению. Эта задача формулируется для каждой j-й группы учебных помещений:

$$f = \sum_{p=1}^{P_j} \sum_{i=1}^{n_j} p(\varpi_i x_{ip}) \to \min \qquad (7)$$

при условиях

$$\sum_{p=1}^{P_j} x_{ip} = 1, \ i = \overline{1, n_j}, \qquad (8)$$

$$\sum_{i=1}^{n_j} x_{ip} \tau_i \le B_p, \ p = \overline{1, P_j}, \qquad (9)$$

$$x_{ip} \in \{0, 1\}. \qquad (10)$$

Поясним смысл задачи. Условие (7) требует, чтобы все занятия из подмножества $\Im(j)$ были выполнены, а наложение условия целочисленности на x_{ip} означает, что занятие T_i может быть проведено только в одном учебном помещении. Условие (9) означает ограничение на максимальный объем времени использования p-го по порядку учебного помещения. Величина $x_{ip} \in \{0, 1\}$ есть показатель того, будет ли назначено занятие T_i в $q = \overline{1, h}$-е по порядку учебное помещение. Использование $f = \sum_{p=1}^{P_j} \sum_{i=1}^{n_j} p(\varpi_i x_{ip})$ в качестве критерия оптимальности означает то, что при разбиении подмножества занятий $\Im(j)$ на подмножества $\Im_1(j), \ldots, \Im_{P_j}(j)$ будут рассматриваться только те разбиения, при которых занятия с наибольшими весами закрепляются за учебными помещениями с наименьшими индексами, для которых расписания составляются раньше. Неформально говоря, элементы вектора $[1\varpi_i]$ представляют собой возможные вклады в функцию f при условии, что занятия назначаются в 1-е по порядку учебное помещение, для которого расписание занятий составляется первым, элементы $[2\varpi_i]$ представляют собой возможные вклады в f при условии, что эти занятия назначаются во 2-е по порядку учебное помещение и так далее.

В результате решения задачи формируется совокупность подмножеств занятий для каждого отдельного учебного помещения, т. е.

$$\{\Im\} = \Im_1(1) \bigcup ... \bigcup \Im_{P_1}(1) \bigcup ... \bigcup \Im_1(m) \bigcup ... \bigcup \Im_{P_m}(m). \qquad (11)$$

На следующем этапе решаются $\sum_{j=1}^{m} P_j$ независимых задач составления расписания для конечного множества занятий $\Im_l(j) = \{T_1, T_2, ..., T_{kl}\}$ в каждом l-м учебном помещении j-й группы. Известны продолжительность всех занятий $\tau_k > 0$ ($k = \overline{1, kl}$) и количество пар B_l использования l-го учебного помещения. Общая продолжительность занятий, назначенных в l-е учебное помещение $\tau_j^l = \sum_{k=1}^{kl} \tau_k \le B_l$ не превышает фонд использования помещения.

Сформулируем задачу о назначении применительно к задаче нахождения оптимального расписания для одного учебного помещения.

Пусть n занятий закреплены за одним учебным помещением. Предположим, что продолжительность каждого занятия составляет одну пару. Общее количество пар использования учебного помещения равно n. Если количество занятий неравно количеству пар или длительность некоторых занятий больше одной пары, то это не нарушает общности задачи, поскольку всегда можно ввести фиктивные занятия или фиктивные пары, чтобы привести задачу к виду $n \times n$.

Персональная совместимость занятий с каждой парой стеснена булевой $n \times n$-матрицей назначения $\mathbf{A} = \|a_{ij}\|$, каждый элемент которой $a_{ij} > 0$ означает допустимость назначения занятия T_i в j-ю пару, а элемент вида $a_{ij} = 0$ соответствует запрету на такое назначение ($i = \overline{1,\ n}$, $j = \overline{1,\ n}$).

Задача заключается в том, чтобы назначить в каждую пару одно и только одно занятие таким образом, чтобы были выполнены все занятия.

Математическую модель задачи о назначении n занятий n парам можно представить в виде задачи линейного программирования.

Определим переменные x_{ij} как

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{åñëè } O_i \text{ íàçíà÷åíî â } j\text{-þ ïàðó,} \\ 0, & \text{â ïðîòèâíîì ñëó÷àå.} \end{cases} \qquad (12)$$

Получаем следующую задачу линейного программирования

$$f = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_{ij} \to \max \qquad (13)$$

при условиях

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij} = 1, \quad i = \overline{1, n}, \qquad (14)$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ij} = 1, \quad j = \overline{1, n}, \qquad (15)$$

$$x_{ij} = \{0, 1\},\ i = \overline{1, n},\ j = \overline{1, n}. \qquad (16)$$

Для решения задачи о назначении используется алгоритм решения, названный венгерским методом.

Очевидно, что в найденном расписании для одного учебного помещения все занятия выполняются в разных парах, и это означает то, что никакие два взаимосвязанные занятия не могут быть назначены в одну пару. В то же время решение задачи (13)–(16) связано с определением элементов матриц назначения $\mathbf{A} = \|a_{ij}\|$ для каждого учебного помещения. Обозначим через параметр ξ_{ij} возможность преподавателя провести занятие T_i в j-ю пару. Так если $\xi_{ij} > 0$, то преподаватель может провести занятие T_i в j-ю пару, а $\xi_{ij} = 0$ соответствует запрету на такое проведение. Чем больше число ξ_{ij}, тем предпочтительнее для преподавателя провести занятие T_i в j-ю пару. Аналогично, показатель ψ_{ij} отражает возможность группы, подгруппы или потока обучающихся прослушать занятие T_i в j-ю пару. Чем больше ψ_{ij} нуля, тем предпочтительнее для обучающихся прослушать занятие T_i в j-ю пару, а $\psi_{ij} = 0$ соответствует запрету на проведение занятия. Очевидно, что значения показателей ξ_{ij} и ψ_{ij} зависят не только от пожеланий преподавателя и студентов по времени проведения занятия, но и от того, было ли до этого назначено в ту же самую пару другое занятие с той же группой или с тем же преподавателем. Тогда элементы матрицы назначений $\|a_{ij}\|$ находятся как $a_{ij} = \xi_{ij} \cdot \psi_{ij}$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, n}$.

Если представим все занятия множеством вершин $\{T_1, T_2, ..., T_n\}$, а пары – множеством вершин $\{t_1, t_2, ..., t_n\}$ двудольного графа G, в котором вершина T_i смежна с вершиной t_j тогда и только тогда, когда занятие T_i может быть проведено в t_j-ю пару, т. е. $a_{ij} > 0$, то ясно, что задача о назначении сводится к задаче определения, имеет ли граф G совершенное паросочетание. В случае отсутствия совершенного паросочетания (может иметь место на последних этапах составления расписания) проводится ослабление требований, исключаются пожелания преподавателей и обучающихся о времени проведения занятия, либо вводится дополнительная пара занятий в данное учебное помещение для окончательного размещения занятия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Теория расписаний и вычислительные машины / под ред. Э. Г. Коффмана. – М. : Наука, 1984. 332 с.
2. Johnson D. S. Fast Algorithms for Bin Packing // Journal of Computer and System Sciences. 1974. V. 8, no. 3. P. 272–314.

УДК 517.958:539.3, 517.983.5

Орлов Сергей Сергеевич,
аспирант, Институт математики, экономики и информатики
Иркутского государственного университета, e-mail: orlov_sergey@inbox.ru

НАЧАЛЬНО-КРАЕВЫЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ НЕКЛАССИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ

S.S. Orlov

INITIAL BOUNDARY VALUE PROBLEMS FOR MATHEMATICAL THEORY OF ELASTICITY NON-CLASSICAL EQUATIONS

Аннотация. *Рассмотрены задачи Коши – Дирихле для трех линейных уравнений соболевского типа, описывающих процессы в упругих, термоупругих и вязкоупругих средах. Получены достаточные условия существования и единственности классического решения каждой из этих задач, а также явные формулы для восстановления решений. Исходные задачи сведены к начальной задаче для интегро-дифференциального уравнения в банаховых пространствах. Последняя исследована методами теории фундаментальных оператор-функций вырожденных интегро-дифференциальных операторов.*

Ключевые слова: *банахово пространство, жорданов набор, фундаментальная оператор-функция, фредгольмов оператор.*

Abstract. *Cauchy – Dirichlet problems for three linear Sobolev type equations, describing the processes in elastic, thermoelastic and viscoelastic media, are considered. Sufficient conditions of every problem classical solution existence and uniqueness as well as explicit formulas for its restoration are obtained. Primary problems are reduced to the initial problem for integro-differential equation in Banach spaces. The last problem is studied by the methods fundamental operator-functions of degenerated integro-differential operators theory.*

Keywords: *Banach space, Jordan set, fundamental operator-function, Fredholm operator.*

Введение

Исследование некоторых динамических моделей механики сплошных сред сопряжено с необходимостью решать уравнения в частных производных с особенностью, состоящей в наличии при старшей производной по времени оператора, который при определенных предположениях, не противоречащих физическому смыслу, является необратимым. Такие уравнения называют уравнениями соболевского типа. Известно, что начально-краевые задачи для них не всегда имеют классические (достаточно гладкие) решения. Таким образом, при исследовании этих нетривиальных математических объектов, прежде всего, актуально выяснение условий, которые гарантировали бы однозначную разрешимость.

В настоящей работе изучается вопрос существования и единственности классических решений задач Коши – Дирихле для трех линейных уравнений в частных производных [1–3], возникающих в математической теории упругости [4]. Рассматриваемые динамические модели сводятся к задаче Коши для интегро-дифференциального уравнения в банаховых пространствах и исследуются в единой для всех операторной постановке.

Постановка задачи

Пусть Ω – ограниченная область вещественного векторного пространства $\mathbf{R}^N$ с границей $\partial\Omega$ класса C^∞, переменная t принимает положительные вещественные значения, т. е. $t \in \mathbf{R}_+$. В цилиндре

$$\mathbf{R}_+ \times \Omega = \left\{ (t,\bar{x}):\ t \in \mathbf{R}_+,\ \bar{x} \in \Omega \right\}$$

рассмотрим интегро-дифференциальное уравнение

$$(\alpha - \Delta)\frac{\partial^2}{\partial t^2}u(t,\bar{x}) - \beta\Delta\frac{\partial}{\partial t}u(t,\bar{x}) - \Delta u(t,\bar{x}) + \int_0^t g(t-\tau)\Delta u(\tau,\bar{x})d\tau = f(t,\bar{x}), \qquad (1)$$

и дифференциальные уравнения

$$(\gamma - \Delta)\frac{\partial^2}{\partial t^2}u(t,\bar{x}) - \Delta\frac{\partial}{\partial t}u(t,\bar{x}) + \Delta^2 u(t,\bar{x}) = f(t,\bar{x}), \qquad (2)$$

$$(\lambda-\Delta)\frac{\partial^2}{\partial t^2}u(t,\bar{x})-a(\Delta-\lambda')\frac{\partial}{\partial t}u(t,\bar{x})-$$
$$-b(\Delta-\lambda'')u(t,\bar{x})=f(t,\bar{x}). \quad (3)$$

Здесь α, β, γ, λ, λ', λ'', a, b – отличные от нуля вещественные параметры, причем $\lambda\neq\lambda'$, ядро $g(t):\mathbf{R}_+\to\mathbf{R}$ – аналитическая функция. В случае $N=3$ и $f(t,x_1,x_2,x_3)\equiv 0$ уравнение (1) моделирует вязкоупруго-динамическое состояние среды [1], при этом функция $u=u(t,x_1,x_2,x_3)$ определяет смещение, числовые параметры α и β представляют собой нелинейные соотношения между постоянными характеристиками среды, а функция $g=g(t)$ отражает ее реологические свойства (ползучесть). При $N=2$ и $f(t,x_1,x_2)\equiv 0$ уравнение (2) описывает поперечные колебания диссипативной пластины с учетом тепловых эффектов [2], где функция $u=u(t,x_1,x_2)$ задает прогиб пластины, вызванный массовыми силами, а коэффициент γ обратно пропорционален квадрату толщины пластины. В случае одной пространственной переменной уравнение (3), называемое уравнением Буссинеска – Лява, моделирует продольные колебания упругого стержня с учетом инерции при изменяющейся во времени внешней нагрузке $f=f(t,x)$ [3], причем функцией $u=u(t,x)$ определяется прогиб стержня, а постоянными λ, λ', λ'', a, b – неизменные характеристики процесса.

Для каждого из уравнений (1), (2) и (3) зададим начальные

$$u(t,\bar{x})\big|_{t=0}=u_0(\bar{x}),\ \frac{\partial}{\partial t}u(t,\bar{x})\bigg|_{t=0}=u_1(\bar{x}),\ \bar{x}\in\Omega \quad (4)$$

и однородное граничное

$$u(t,\bar{x})\big|_{\bar{x}\in\partial\Omega}=0,\ (t,\bar{x})\in\mathbf{R}_+\times\partial\Omega \quad (5)$$

условия, т. е. поставим задачи Коши – Дирихле. Здесь функции $u_0(\bar{x})$, $u_1(\bar{x})$ для уравнений (1) и (3) имеют на множестве Ω порядок гладкости $k+2$, для второго уравнения – $k+4$, $k\in\{0\}\cup\mathbf{N}$, причем $u_0(\bar{x})\big|_{\bar{x}\in\partial\Omega}=u_1(\bar{x})\big|_{\bar{x}\in\partial\Omega}=0$.

Цель настоящей работы – исследовать вопрос существования и единственности классических решений начально-краевых задач (1), (4), (5); (2), (4), (5); (3)–(5) и построить эти решения в замкнутом виде. При этом отдельно будут рассмотрены два принципиально разных случая α, γ, $\lambda\notin\sigma(\Delta)$ и α, γ, $\lambda\in\sigma(\Delta)$, где $\sigma(\Delta)$ – спектр однородной задачи Дирихле вида

$$\Delta\phi(\bar{x})=\mu\phi(\bar{x}),\ \phi(\bar{x})\big|_{\bar{x}\in\partial\Omega}=0. \quad (6)$$

Редукция к начальной задаче для интегро-дифференциального уравнения в банаховых пространствах

Пусть E_1, E_2 – вещественные банаховы пространства. Рассмотрим интегро-дифференциальное уравнение

$$Bu''(t)=A_1u'(t)+A_0u(t)+\int_0^t k(t-s)u(s)ds+f(t) \quad (7)$$

с начальными условиями

$$u(0)=u_0,\ u'(0)=u_1, \quad (8)$$

где B, A_1, A_0 – замкнутые линейные операторы, действующие из E_1 в E_2, $k(t)$ – однопараметрическое семейство класса $C^\infty(\mathbf{R}_+)$ операторов с аналогичными свойствами и областью определения $D(k)$, не зависящей от аргумента t, причем

$$\overline{D(B)}=\overline{D(A_1)\cap D(A_0)\cap D(k)}=E_1,$$
$$D(B)\subset D(A_1)\cap D(A_0)\cap D(k),$$

оператор-функция $k(t)$ сильно непрерывна на $D(k)$.

Начально-краевые задачи (1), (4), (5); (2), (4), (5) и (3)–(5) могут быть сведены к задаче Коши (7), (8), если положить

$$E_1\equiv\overset{\circ}{L}_2(\Omega)=\left\{v(\bar{x})\in L_2(\Omega):v(\bar{x})\big|_{\bar{x}\in\partial\Omega}=0\right\},$$
$$E_2\equiv L_2(\Omega),$$
$$B=\alpha-\Delta,\ A_1=\beta\Delta,\ A_0=\Delta,\ k(t)=-g(t)\Delta,$$
$$D(B)=D(A_1)=D(A_0)=D(k)\equiv\overset{\circ}{H}{}^{k+2}(\Omega)=$$
$$=\left\{v(\bar{x})\in W_2^{k+2}(\Omega):v(\bar{x})\big|_{\bar{x}\in\partial\Omega}=0\right\};$$

$$E_1\equiv\overset{\circ}{H}{}^{k+4}(\Omega),\ E_2\equiv H^k(\Omega),$$
$$B=\gamma-\Delta,\ A_1=\Delta,\ A_0=-\Delta^2,\ k(t)=\mathbf{O},$$
$$D(B)=D(A_1)=D(A_0)=D(k)\equiv E_1$$

и

$$E_1\equiv\overset{\circ}{L}_2(\Omega),\ E_2\equiv L_2(\Omega),$$
$$B=\lambda-\Delta,\ A_1=a(\Delta-\lambda'),\ A_0=b(\Delta-\lambda''),\ k(t)=\mathbf{O},$$

$$D(B)=D(A_1)=D(A_0)=D(k)\equiv\overset{\circ}{H}{}^{k+2}(\Omega)$$

соответственно, $k\in\{0\}\cup\mathbf{N}$. При этом случаю α, γ, $\lambda\notin\sigma(\Delta)$ отвечает непрерывная обратимость оператора B, а для α, γ, $\lambda\in\sigma(\Delta)$ при указанном выборе E_1 и $D(B)$ в каждой из рассматриваемых задач оператор B является фредгольмовым, т. е. $\overline{R(B)}=R(B)$ и $dimN(B)=dimN(B^*)=n<+\infty$.

Исследование исходных начально-краевых задач удобно проводить в операторной постановке (7), (8). Этому и посвящен следующий пункт.

Классическое и обобщенное решения начальной задачи (7), (8): условия существования и единственности, методы построения

Далее выясним условия существования и единственности *классического* решения задачи Коши (7), (8), под которым понимается функция $u(t)$ класса $C^2(\mathbf{R}_+, E_1)$, обращающая в тождество уравнение (7) и удовлетворяющая начальным условиям (8). Исследования будем проводить с помощью аппарата обобщенных функций (распределений) в банаховых пространствах [5, 6], который имеет общую идеологическую и методологическую основу с классической теорией обобщенных функций Соболева – Шварца [7] и в дальнейшем изложении будет использоваться без дополнительных пояснений.

В обобщенных функциях задача Коши (7), (8) принимает вид сверточного уравнения

$$L_2(\delta(t)) * \tilde{u}(t) = \tilde{g}(t). \qquad (9)$$

Здесь обобщенная оператор-функция [5, 6]

$$L_2(\delta(t)) = B\delta''(t) - A_1\delta'(t) - A_0\delta'(t) - k(t)\theta(t)$$

соответствует интегро-дифференциальному оператору уравнения (7), а обобщенная функция $\tilde{g}(t)$ класса $K'(\mathbf{R}_+, E_2)$ распределений с ограниченным слева носителем имеет вид

$$\tilde{g}(t) = f(t)\theta(t) + (Bu_1 - A_1u_0)\delta(t) + Bu_0\delta'(t).$$

Решение уравнения (9) в классе $K'(\mathbf{R}_+, E_1)$ (*обобщенное* решение задачи Коши (7), (8)) задается формулой

$$\tilde{u}(t) = \varepsilon(t) * \tilde{g}(t), \qquad (10)$$

где обобщенная оператор-функция $\varepsilon(t)$ удовлетворяет следующим двум условиям

$$L_2(\delta(t)) * \varepsilon(t) * v(t) = v(t), \ \forall v(t) \in K'(\mathbf{R}_+, E_2),$$

$$\varepsilon(t) * L_2(\delta(t)) * w(t) = w(t), \ \forall w(t) \in K'(\mathbf{R}_+, E_1)$$

и называется *фундаментальной оператор-функцией интегро-дифференциального оператора* $L_2(\delta(t))$. Эта конструкция введена М. В. Фалалеевым в [5, 6] как расширение понятия фундаментального решения (функции влияния) дифференциальных операторов [7] на случай дифференциальных (в том числе и с частными производными [8]), интегральных и интегро-дифференциальных операторов в банаховых пространствах.

Существование решения вида (10) уравнения (9) объясняется существованием свертки обобщенной оператор-функции $\varepsilon(t)$ с распределением $\tilde{g}(t) \in K'(\mathbf{R}_+, E_2)$ [5, 6], а единственность нетрудно показать с использованием второго равенства из определения фундаментальной оператор-функции и свойства ассоциативности бинарной операции $*$ по схеме, изложенной в [7, с. 86].

Введем в рассмотрение оператор-функцию

$$F(t) = A_1 + A_0 t + \int_0^t (t-s)k(s)ds. \qquad (11)$$

Теорема 1. Пусть оператор B непрерывно обратим, тогда интегро-дифференциальный оператор $L_2(\delta(t))$ имеет на классе $K'(\mathbf{R}_+, E_2)$ фундаментальную оператор-функцию вида

$$\varepsilon_1(t) = B^{-1}t\theta(t) * (\mathbf{I}_2\delta(t) + R_1(t)\theta(t)),$$

где $R_1(t)$ – резольвента ядра $F(t)B^{-1}$ (см. (11)).

Доказательство. В соответствии с определением фундаментальной оператор-функции, требуется проверить два сверточных равенства

$$L_2(\delta(t)) * \varepsilon_1(t) = \mathbf{I}_2\delta(t), \ \varepsilon_1(t) * L_2(\delta(t)) = \mathbf{I}_1\delta(t).$$

Здесь и далее $\mathbf{I}_1$ и $\mathbf{I}_2$ – тождественные операторы в пространствах E_1 и E_2 соответственно.

Используя очевидное соотношение

$$R_1(t)\theta(t) = F(t)B^{-1}\theta(t) + F(t)B^{-1}\theta(t) * R_1(t)\theta(t)$$

для резольвенты $R_1(t)$, непосредственными вычислениями в первом равенстве получим

$$L_2(\delta(t)) * \varepsilon_1(t) = L_2(\delta(t)) * B^{-1}t\theta(t) * (\mathbf{I}_2\delta(t) + R_1(t)\theta(t)) =$$

$$= (\mathbf{I}_2\delta(t) - F(t)B^{-1}\theta(t)) * (\mathbf{I}_2\delta(t) + R_1(t)\theta(t)) =$$

$$= \mathbf{I}_2\delta(t) + R_1(t)\theta(t) -$$

$$- (F(t)B^{-1}\theta(t) + F(t)B^{-1}\theta(t) * R_1(t)\theta(t)) =$$

$$= \mathbf{I}_2\delta(t) + R_1(t)\theta(t) - R_1(t)\theta(t) = \mathbf{I}_2\delta(t),$$

а во втором, с учетом

$$R_1(t)\theta(t) = F(t)B^{-1}\theta(t) + R_1(t)\theta(t) * F(t)B^{-1}\theta(t),$$

справедлива цепочка равенств

$$\varepsilon_1(t) * L_2(\delta(t)) =$$

$$= B^{-1}t\theta(t) * (\mathbf{I}_2\delta(t) + R_1(t)\theta(t)) * L_2(\delta(t)) =$$

$$= B^{-1}t\theta(t) * (\mathbf{I}_2\delta(t) + R_1(t)\theta(t)) *$$

$$* (\mathbf{I}_2\delta(t) - F(t)B^{-1}\theta(t)) * B\delta''(t) =$$

$$= B^{-1}t\theta(t) * \big(\mathbf{I}_2\delta(t) + R_1(t)\theta(t) -$$

$$- (F(t)B^{-1}\theta(t) + R_1(t)\theta(t) * F(t)B^{-1}\theta(t))\big) * B\delta''(t) =$$

$$= B^{-1}t\theta(t) * B\delta''(t) = \mathbf{I}_1\delta(t).$$

Теорема доказана.

Замечание 1. В развернутом виде решение (10) представляет собой регулярную обобщенную функцию

$$\tilde{u}(t) = u(t)\theta(t) = \Bigg[u_0 + \int_0^t B^{-1}R_1(s)Bu_0 ds +$$

$$+ \int_0^t B^{-1}(\mathbf{I}_2 + (t-s)R_1(s))(Bu_1 - A_1u_0)ds +$$

$$+\int_0^t\int_0^{t-s} B^{-1}(\mathbf{I}_2+(t-s-\tau)R_1(\tau))f(s)d\tau ds\Big]\theta(t), \quad (12)$$

где $u(t)\in C^2(\mathbf{R}_+,E_1)$ в случае $f(t)\in C(\mathbf{R}_+,E_2)$ удовлетворяет уравнению (7) и начальным данным (8), т. е. является классическим решением задачи Коши (7), (8). Таким образом, справедлива

Теорема 2. Пусть выполнены условия теоремы 1 и $f(t)\in C(\mathbf{R}_+,E_2)$, тогда задача Коши (7), (8) имеет единственное классическое решение, которое задается формулой (12).

Рассмотрению случая необратимого оператора B (*вырожденного* или *сингулярного* интегродифференциального уравнения (7)) предпошлем некоторые вспомогательные сведения.

Пусть B – фредгольмов оператор, т. е. $\overline{R(B)}=R(B)$ и $dimN(B)=dimN(B^*)=n<+\infty$, $\{\varphi_i\}_{i=1}^n$ – базис в $N(B)$, $\{\psi_i\}_{i=1}^n$ – базис в $N(B^*)$, $\{\gamma_i\}_{i=1}^n\subset E_1^*$, $\{z_i\}_{i=1}^n\subset E_2$ – биортогональные им системы элементов: $\langle\varphi_i,\gamma_j\rangle=\delta_{ij}$, $\langle z_i,\psi_j\rangle=\delta_{ij}$, $i,j=1,...,n$.

Введем в рассмотрение проекторы $P:E_1\to N(B)$, $Q:E_2\to span\{z_i\}_{i=1}^n$, действия которых задаются формулами

$$P=\sum_{i=1}^n P_i=\sum_{i=1}^n\langle\cdot,\gamma_i\rangle\varphi_i,\ Q=\sum_{i=1}^n Q_i=\sum_{i=1}^n\langle\cdot,\psi_i\rangle z_i,$$

и ограниченный оператор $\Gamma:E_2\to N(P)\cap D(B)$,

$$\Gamma=\widetilde{B}^{-1}=(B+\sum_{i=1}^n\langle\cdot,\gamma_i\rangle z_i)^{-1},$$

называемый *оператором Треногина – Шмидта* [9]. Справедливы следующие равенства:

$$\varphi_i=\Gamma z_i,\ \psi_i=\Gamma^*\gamma_i,\ i=1,...,n,$$
$$\Gamma B=\mathbf{I}_1-P,\ B\Gamma=\mathbf{I}_2-Q.$$

Обобщенной жордановой цепочкой длины $p_i\in\mathbf{N}$ элемента φ_i относительно оператор-функции $F(t)$ (см. (11)) (или короче $F(t)$ – *жордановой цепочкой*) будем называть конечное множество $\{\varphi_i^{(1)}\equiv\varphi_i,\varphi_i^{(2)},...,\varphi_i^{(p_i)}\}\subset E_1$ элементов, удовлетворяющих уравнениям

$$B\varphi_i^{(1)}=0,\ B\varphi_i^{(j+1)}=l_j(\varphi_i),\ j=1,...,p_i-1,$$

которые, в соответствии с альтернативой Фредгольма [9], разрешимы, если выполнены условия

$$\langle l_k(\varphi_i),\psi_j\rangle=0,\ k=1,...,p_i-1,\ j=1,...,n,$$

где введено обозначение $l_k(\varphi_i)=\sum_{q=1}^k F^{(k-q)}(0)\varphi_i^{(q)}$.

Вектор $\varphi_i^{(j+1)}$, $j=1,...,p_i-1$ принято называть $F(t)-$ *присоединенным элементом* j-го порядка элемента φ_i. Условие обрыва жордановой цепочки присоединенных элементов на p_i-м шаге состоит в том, что не все числа $\langle l_{p_i}(\varphi_i),\psi_j\rangle$, $j=1,...,n$, равны нулю. Построив по описанному правилу для каждого базисного элемента $\varphi_i\in N(B)$ свою обобщенную $F(t)$-жорданову цепочку, получим множество

$$\{\varphi_i^{(j)},\ i=1,..,n,\ j=1,...,p_i\}\subset E_1,$$

называемое *обобщенным* $F(t)$*-жордановым набором оператора* B, элементы которого могут быть восстановлены по формулам

$$\varphi_i^{(j+1)}=\Gamma l_j(\varphi_i),\ i=1,...,n,\ j=1,...,p_i-1. \quad (13)$$

$F(t)$-жорданов набор назовем *полным*, если

$$det\left\|\langle l_{p_i}(\varphi_i),\psi_j\rangle\right\|_{i,\,j=1,...,n}\neq 0.$$

В этом случае $\{\psi_i\}_{i=1}^n$ можно выбрать таким, что

$$\langle l_{p_i}(\varphi_i),\psi_j\rangle=\delta_{ij},\ i,j=1,...,n,$$

тогда $z_i=l_{p_i}(\varphi_i)$, $i=1,...,n$.

В работах Б. В. Логинова (см., например, статью [10] и библиографию к ней) показано, что, если фредгольмов оператор B имеет полный $F(t)$-жорданов набор, то существует и полный $F^*(t)$-жорданов набор оператора B^*, который строится по тем же правилам, причем базисы в $N(B)$ и $N(B^*)$ можно выбрать так, что элементы φ_i и ψ_i с одинаковыми номерами имеют обобщенные жордановы цепочки одинаковой длины.

Полным $F^*(t)$*-жордановым набором* оператора B^* называется система элементов $\psi_i^{(j)}\in E_2^*$, $i=1,...,n$, $j=1,...,p_i$, удовлетворяющих уравнениям

$$B^*\psi_i^{(1)}=0,\ B^*\psi_i^{(j+1)}=l_j^*(\psi_i),$$
$$i=1,...,n,\ j=1,...,p_i-1,$$

условиям разрешимости

$$\langle\varphi_i,l_k^*(\psi_j)\rangle=0,\ i,j=1,...,n,\ k=1,...,p_j-1,$$

и полноты

$$\langle\varphi_i,l_{p_j}^*(\psi_j)\rangle=\delta_{ij},\ i,j=1,...,n.$$

Здесь $l_k^*(\psi_j)=\sum_{q=1}^{k}\left(F^{(k-q)}(0)\right)^*\psi_j^{(q)}$. Для восстановления присоединенных элементов справедливы формулы

$$\psi_i^{(j+1)}=\Gamma^* l_j^*(\psi_i),\ i=1,...,n,\ j=1,...,p_i-1, \quad (14)$$

а из условия полноты $F^*(t)$-жорданова набора следует, что $\gamma_i=l_{p_i}^*(\psi_i),\ i=1,...,n$.

Условия разрешимости уравнений для определения $F(t)$- и $F^*(t)$-присоединенных элементов, в силу равенств (13) и (14), могут быть записаны в следующем эквивалентном виде:

$$\left\langle \varphi_i^{(k+1)},\gamma_j\right\rangle=\left\langle z_j,\psi_i^{(k+1)}\right\rangle=0, \quad (15)$$

$$i,\ j=1,...,n,\ k=1,...,p_i-1.$$

Теорема 3. Пусть фредгольмов оператор B имеет полный обобщенный жорданов набор относительно оператор-функции $F(t)$ (см. (11)), тогда интегро-дифференциальный оператор $L_2(\delta(t))$ имеет на классе $K'(\mathbf{R}_+,E_2)$ фундаментальную оператор-функцию вида

$$\varepsilon_2(t)=\Gamma t\theta(t)*(\mathbf{I}_2\delta(t)+R_2(t)\theta(t))*$$
$$*(\mathbf{I}_2\delta(t)+N(t)\theta(t))*G(t),$$

где Γ – оператор Треногина – Шмидта, $R_2(t)$ – резольвента ядра $F(t)\Gamma$, $N(t)$ – резольвента ядра $\left(-\sum_{i=1}^{n}Q_iR_2^{(p_i)}(t)\right)$, обобщенная оператор-функция $G(t)$ задается формулой

$$G(t)=\left((\mathbf{I}_2-Q)\delta(t)-\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{p_i}\left\langle\cdot,\psi_i^{(j)}\right\rangle z_i\delta^{(p_i+1-j)}(t)\right),$$

в которой Q – введенный выше проектор, а элементы $\psi_i^{(j)},\ i=1,...,n,\ j=1,...,p_i$, составляют полный $F^*(t)$-жорданов набор оператора B^*.

Приведем вспомогательную лемму.

Лемма 1. Пусть выполнены условия теоремы 3, тогда справедливы следующие равенства:

$$Q_iR_2^{(k-1)}(0)=\begin{cases}\left\langle\cdot,\psi_i^{(k+1)}\right\rangle z_i, & k=1,...,p_i-1,\\ Q_i, & k=p_i;\end{cases} \quad (16)$$

$$(\mathbf{I}_2-Q)\delta(t)*(\mathbf{I}_2\delta(t)+N(t)\theta(t))*G(t)=$$
$$=(\mathbf{I}_2-Q)\delta(t), \quad (17)$$

$$(Q_iR_2^{(p_i)}(t)\theta(t)+Q_i\delta(t))*(\mathbf{I}_2\delta(t)+N(t)\theta(t))=$$
$$=Q_i\delta(t), \quad (18)$$

$$QR_2(t)\theta(t)*(\mathbf{I}_2\delta(t)+N(t)\theta(t))*G(t)=$$
$$=-Q\delta(t), \quad (19)$$

$$G(t)*L_2(\delta(t))=(\mathbf{I}_2\delta(t)+\sum_{i=1}^{n}Q_iR_2^{(p_i)}(t)\theta(t))*$$
$$*(\mathbf{I}_2\delta(t)-F(t)\Gamma\theta(t))*\tilde{B}\delta''(t). \quad (20)$$

Доказательство леммы 1. Последовательно докажем пять этих равенств.

Исходя из соотношения

$$R_2(t)=F(t)\Gamma+\int_0^t F(t-s)\Gamma R_2(s)ds \quad (21)$$

и равенства (14), при $k=1$ и $k=2$ получим

$$Q_iR_2(0)=\left\langle\cdot,\psi_i^{(1)}\right\rangle z_iF(0)\Gamma=\left\langle\cdot,\Gamma^*F^*(0)\psi_i^{(1)}\right\rangle z_i=$$
$$=\left\langle\cdot,\Gamma^*l_1^*(\psi_i)\right\rangle z_i=\left\langle\cdot,\psi_i^{(2)}\right\rangle z_i$$

и

$$Q_iR_2'(0)=\left\langle\cdot,\psi_i^{(1)}\right\rangle z_i\left(F'(0)\Gamma+(F(0)\Gamma)^2\right)=$$
$$=\left\langle\cdot,\Gamma^*\left(F^*(0)\psi_i^{(2)}+F'^*(0)\psi_i^{(1)}\right)\right\rangle z_i=$$
$$=\left\langle\cdot,\Gamma^*l_2^*(\psi_i)\right\rangle z_i=\left\langle\cdot,\psi_i^{(3)}\right\rangle z_i$$

соответственно. Затем с помощью равенства

$$R_2^{(k-1)}(0)=F^{(k-1)}(0)\Gamma+F^{(k-2)}(0)\Gamma R_2(0)+$$
$$+F^{(k-3)}(0)\Gamma R_2'(0)+...+F(0)\Gamma R_2^{(k-2)}(0),$$

которое можно получить из (21), индукцией по k доказывается, что $QR_2^{(k-1)}(0)=\left\langle\cdot,\Gamma^*\,l_k^*(\psi_i)\right\rangle z_i$, откуда, в силу (14) и $\psi_i^{(1)}=\Gamma^*l_{p_i}^*(\psi_i)$, следует требуемое равенство (16).

Так как $(\mathbf{I}_2-Q)z_i=0$, имеют место соотношения

$$(\mathbf{I}_2-Q)\delta(t)*N(t)\theta(t)=\mathbf{O},$$

$$(\mathbf{I}_2-Q)\delta(t)*\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{p_i}\left\langle\cdot,\psi_i^{(j)}\right\rangle z_i\delta^{(p_i+1-j)}(t)=\mathbf{O},$$

которые в совокупности со свойством идемпотентности проектора $\mathbf{I}_2-Q$ доказывают справедливость равенства (17).

С учетом $Q_iQ_j=\delta_{ij}Q_i$ и

$$-N(t)\theta(t)=\sum_{k=1}^{n}Q_kR_2^{(p_k)}(t)\theta(t)*(\mathbf{I}_2\delta(t)+N(t)\theta(t)),$$

нетрудно убедиться, что

$$(Q_iR_2^{(p_i)}(t)\theta(t)+Q_i\delta(t))*(\mathbf{I}_2\delta(t)+N(t)\theta(t))=$$
$$=Q_i\delta(t)*\left(\sum_{k=1}^{n}Q_kR_2^{(p_k)}(t)\theta(t)+\mathbf{I}_2\delta(t)\right)*$$
$$*(\mathbf{I}_2\delta(t)+N(t)\theta(t))=$$
$$=Q_i\delta(t)*(\mathbf{I}_2\delta(t)+N(t)\theta(t)-N(t)\theta(t))=Q_i\delta(t),$$

т. е. равенство (18) верно.

Используя последовательно (16), (18), а затем (15) и легко проверяемые соотношения $Q_i(\mathbf{I}_2 - Q) = \mathbf{O}$, $Q_i z_j = \delta_{ij} z_j$, тождественными преобразованиями, а именно

$$QR_2(t)\theta(t) * (\mathbf{I}_2\delta(t) + N(t)\theta(t)) * G(t) =$$

$$= \sum_{i=1}^{n} Q_i R_2(t)\theta(t) * \delta^{(p_i)}(t) *$$

$$* (\mathbf{I}_2\delta(t) + N(t)\theta(t)) * \frac{t^{p_i-1}}{(p_i-1)!}\theta(t) * G(t) =$$

$$= \sum_{i=1}^{n} Q_i \left(R_2^{(p_i)}(t)\theta(t) + \sum_{j=2}^{p_i+1} R^{(j-2)}(0)\delta^{(p_i+1-j)}(t) \right) *$$

$$* (\mathbf{I}_2\delta(t) + N(t)\theta(t)) * \frac{t^{p_i-1}}{(p_i-1)!}\theta(t) * G(t) =$$

$$= \sum_{i=1}^{n} \Big(Q_i R_2^{(p_i)}(t)\theta(t) + Q_i\delta(t) +$$

$$+ \sum_{j=2}^{p_i} \left\langle \cdot, \psi_i^{(j)} \right\rangle z_i \delta^{(p_i+1-j)}(t) \Big) *$$

$$* (\mathbf{I}_2\delta(t) + N(t)\theta(t)) * \frac{t^{p_i-1}}{(p_i-1)!}\theta(t) * G(t) =$$

$$= \sum_{i=1}^{n} \left(Q_i\delta(t) + \sum_{j=2}^{p_i} \left\langle \cdot, \psi_i^{(j)} \right\rangle z_i \delta^{(p_i+1-j)}(t) \right) *$$

$$* \left((\mathbf{I}_2 - Q)\frac{t^{p_i-1}}{(p_i-1)!} - \sum_{k=1}^{n}\sum_{j=1}^{p_i} \left\langle \cdot, \psi_k^{(j)} \right\rangle z_i \delta^{(p_k-p_i+1-j)}(t) \right) =$$

$$= \sum_{i=1}^{n} \left(\sum_{j=2}^{p_i} \left\langle \cdot, \psi_i^{(j)} \right\rangle z_i \frac{t^{j-1}}{(j-1)!}\theta(t) - \left\langle \cdot, \psi_i^{(1)} \right\rangle z_i \delta(t) - \right.$$

$$\left. - \sum_{j=2}^{p_i} \left\langle \cdot, \psi_i^{(j)} \right\rangle z_i \frac{t^{j-1}}{(j-1)!}\theta(t) \right) = -Q\delta(t),$$

устанавливаем, что (19) верно.

Справедлива цепочка равенств

$$G(t) * L_2(\delta(t)) =$$

$$= \left((\mathbf{I}_2 - Q)\delta(t) - \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{p_i} \left\langle \cdot, \psi_i^{(j)} \right\rangle z_i \delta^{(p_i+1-j)}(t) \right) *$$

$$* (B\delta(t) - F(t)\theta(t)) * \delta''(t) =$$

$$= (B\delta(t) - (\mathbf{I}_2 - Q)F(t)\theta(t) -$$

$$- \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{p_i} \left\langle \cdot, B^* \psi_i^{(j)} \right\rangle z_i \delta^{(p_i+1-j)}(t) +$$

$$+ \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{p_i} \left\langle \cdot, \psi_i^{(j)} \right\rangle z_i \delta^{(p_i+1-j)}(t) * F(t)\theta(t)) * \delta''(t),$$

в последнее из которых подставим выражение

$$\delta^{(p_i+1-j)}(t) * F(t)\theta(t) = \frac{d^{\,p_i+1-j}}{dt^{\,p_i+1-j}} F(t)\theta(t) =$$

$$= F^{(p_i+1-j)}(t)\theta(t) + F^{(p_i-j)}(0)\delta(t) + F^{(p_i-j-1)}(0)\delta'(t) + \ldots +$$

$$+ F'(0)\delta^{(p_i-j-1)}(t) + F(0)\delta^{(p_i-j)}(t),$$

а затем приведем подобные слагаемые относительно производных $\delta(t)$. В результате этих преобразований, с учетом уравнений для определения $F^*(t)$ -присоединенных векторов, получим

$$G(t) * L_2(\delta(t)) = \Big(\tilde{B}\delta(t) - (\mathbf{I}_2 - Q)F(t) +$$

$$+ \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{p_i} \left\langle \cdot, \psi_i^{(j)} \right\rangle z_i F^{(p_i+1-j)}(t)\theta(t) \Big) * \delta''(t) =$$

$$= \big(\mathbf{I}_2\delta(t) - F(t)\Gamma\theta(t) + QF(t)\Gamma\theta(t) +$$

$$+ \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{p_i} \left\langle \cdot, \psi_i^{(j)} \right\rangle z_i F^{(p_i+1-j)}(t)\Gamma\theta(t) \big) * \delta''(t).$$

Но, в силу (16),

$$QF(t)\Gamma\theta(t) + \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{p_i} \left\langle \cdot, \psi_i^{(j)} \right\rangle z_i F^{(p_i+1-j)}(t)\Gamma\theta(t) =$$

$$= \sum_{i=1}^{n} Q_i \Big(F^{(p_i)}(t)\Gamma + R_2(0)F^{(p_i-1)}(t)\Gamma +$$

$$+ R_2'(0)F^{(p_i-2)}(t)\Gamma + \ldots + R_2^{(p_i-2)}(0)F'(t)\Gamma +$$

$$+ R_2^{(p_i-1)}(0)F(t)\Gamma + \int_0^t R_2^{(p_i)}(t-s)F(s)\Gamma ds \Big)\theta(t) -$$

$$- \sum_{i=1}^{n} Q_i R_2^{(p_i)}(t)\theta(t) * F(t)\Gamma\theta(t) =$$

$$= \sum_{i=1}^{n} Q_i \left(R_2^{(p_i)}(t)\theta(t) - R_2^{(p_i)}(t)\theta(t) * F(t)\Gamma\theta(t) \right) =$$

$$= \sum_{i=1}^{n} Q_i R_2^{(p_i)}(t)\theta(t) * (I_2\delta(t) - F(t)\Gamma\theta(t)),$$

что и завершает доказательство равенства (20).

Лемма 1 доказана.

Теперь проведем

Доказательство теоремы 3. Требуется установить равенства

$$L_2(\delta(t)) * \varepsilon_2(t) = \mathbf{I}_2\delta(t),\ \varepsilon_2(t) * L_2(\delta(t)) = \mathbf{I}_1\delta(t).$$

Вычисляя первую свертку, получаем

$$L_2(\delta(t)) * \varepsilon_2(t) =$$

$$= ((\mathbf{I}_2 - Q)\delta(t) - F(t)\Gamma\theta(t)) * (\mathbf{I}_2\delta(t) + R_2(t)\theta(t)) *$$

$$* (\mathbf{I}_2\delta(t) + N(t)\theta(t)) * G(t) =$$

$$= \big((\mathbf{I}_2\delta(t) - Q\delta(t) * (\mathbf{I}_2\delta(t) + R_2(t)\theta(t)) \big) *$$

$$* (\mathbf{I}_2\delta(t) + N(t)\theta(t)) * G(t) =$$

$$= \big((\mathbf{I}_2 - Q)\delta(t) - QR_2(t)\theta(t) \big) *$$

$$* (\mathbf{I}_2\delta(t) + N(t)\theta(t)) * G(t),$$

отсюда, в силу (17) и (19),

$$L_2(\delta(t))*\varepsilon_2(t)=(\mathbf{I}_2-Q)\delta(t)+Q\delta(t)=\mathbf{I}_2\delta(t).$$

Для доказательства второго равенства воспользуемся соотношением (20) из леммы 1.

$$\varepsilon_2(t)*L_2(\delta(t))=$$
$$=\Gamma t\theta(t)*(\mathbf{I}_2\delta(t)+R_2(t)\theta(t))*$$
$$*(\mathbf{I}_2\delta(t)+R_2(t)\theta(t))*G(t)*L_2(\delta(t))=$$
$$=\Gamma t\theta(t)*(\mathbf{I}_2\delta(t)+R_2(t)\theta(t))*(\mathbf{I}_2\delta(t)+N(t)\theta(t))*$$
$$*(\mathbf{I}_2\delta(t)+\sum_{i=1}^{n}Q_iR_2^{(p_i)}(t)\theta(t))*$$
$$*(\mathbf{I}_2\delta(t)-F(t)\Gamma\theta(t))*\widetilde{B}\delta''(t)=$$
$$=\Gamma t\theta(t)*\widetilde{B}\delta''(t)=\mathbf{I}_1\delta(t).$$

Теорема 3 доказана.

Замечание 2. В условиях теоремы 3 обобщенное решение задачи Коши (7), (8) имеет вид

$$\widetilde{u}(t)=u(t)\theta(t)+\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{p_i-2}\sum_{k=1}^{p_i-j-1}c_{i[k+j+1]}\varphi_i^{(k)}\delta^{(j-1)}(t), \quad (22)$$

где функция $u(t)$, в предположении

$$\left\langle f(t),\psi_i^{(j)}\right\rangle\in C^{p_i-j+1}(\mathbf{R}_+),\ i=1,...,n,\ j=1,...,p_i,$$

принадлежит классу $C^2(\mathbf{R}_+,E_1)$, удовлетворяет уравнению (7) и начальным данным

$$u(0)=u_0+\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{p_i-1}c_{i[j+1]}\varphi_i^{(j)},$$

$$u'(0)=u_1+\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{p_i}c_{i[j]}\varphi_i^{(j)}.$$

Здесь числа $c_{i[j]}\in\mathbf{R}$, $i=1,...,n$, $j=1,...,p_i$, определяются единственным образом по формулам

$$c_{i[j]}=\sum_{k=1}^{p_i-j+1}\left\langle h^{(p_i-j-k+1)}(0),\psi_i^{(k)}\right\rangle,$$

а функция $h(t):\mathbf{R}_+\to E_2$ имеет следующий вид:

$$h(t)=f(t)+A_1u_1+A_0(u_0+u_1t)+\int_0^t k(t-s)(u_0+u_1s)ds$$

Связь между обобщенным и классическим решениями начальной задачи (7), (8) устанавливается естественным образом. Положим $c_{i[j]}=0$ для всех $i=1,...,n$, $j=1,...,p_i$, тогда сингулярная составляющая решения (22) зануляется и $\widetilde{u}(t)=u(t)\theta(t)$, где $u(t)\in C^2(\mathbf{R}_+,E_1)$ совпадает с классическим решением задачи Коши (7), (8).

Таким образом, справедлива следующая

Теорема 4. Пусть выполнены условия теоремы 3 и

$$\left\langle f(t),\psi_i^{(j)}\right\rangle\in C^{p_i-j+1}(\mathbf{R}_+),\ i=1,...,n,\ j=1,...,p_i,$$

тогда, если

$$\sum_{k=1}^{p_i-j+1}\left\langle h^{(p_i-j-k+1)}(0),\psi_i^{(k)}\right\rangle=0,\ i=1,...,n,\ j=1,...,p_i,$$

то задача Коши (7), (8) имеет единственное классическое решение.

Замечание 3. Полученные в теореме 4 условия описывают множество правых частей уравнения (7) и начальных данных (8), при которых рассматриваемая задача Коши (7), (8) однозначно разрешима в указанном классе функций.

Исследование начально-краевых задач. Введем обозначения. Пусть $\sigma(\Delta)=\{\lambda_i\}_{i=1}^{+\infty}$ – спектр однородной задачи Дирихле (6) для оператора Лапласа, где собственные числа λ_i занумерованы в порядке убывания с учетом кратности, $\{\phi_i(\bar{x})\}_{i=1}^{+\infty}$ – система собственных функций, ортонормированная в смысле скалярного произведения пространства $L_2(\Omega)$. Как было отмечено выше, случаям α, γ, $\lambda\notin\sigma(\Delta)$ соответствует непрерывная обратимость операторов в главных частях уравнений (1), (2) и (3). Если же α, γ, $\lambda\in\sigma(\Delta)$, то эти операторы фредгольмовы и размерности их ядер совпадают с конечными порядками кратности собственных чисел α, γ, λ.

Пусть собственные функции $\phi_i(\bar{x})$, $\lambda_i=\alpha$ соответствуют $\alpha\in\sigma(\Delta)$, т. е. являются базисными элементами ядра оператора $B=\alpha-\Delta$. В качестве базиса в $N(B^*)$ выберем систему функций $\psi_i(\bar{x})=\frac{1}{\alpha\beta}\phi_i(\bar{x})$. Тогда имеет место соотношение

$$\left\langle l_1(\varphi_i),\psi_j\right\rangle=\int_\Omega\beta\Delta\phi_i(\bar{x})\psi_j(\bar{x})d\bar{x}=\delta_{ij},$$

которое означает отсутствие присоединенных элементов у $\phi_i(\bar{x})$, $\lambda_i=\alpha$, т. е. все $p_i=1$. В аналогичных обозначениях то же самое можно показать для операторов $B=\gamma-\Delta$ и $B=\lambda-\Delta$ из уравнений (2) и (3) соответственно, выбирая базисные элементы в $N(B^*)$ следующим образом:

$$\psi_i(\bar{x})=\frac{1}{\gamma}\phi_i(\bar{x})\in\overset{\circ}{H}{}^{k+4}(\Omega),\ \lambda_i=\gamma,$$

$$\psi_i(\bar{x})=\frac{1}{\omega'}\phi_i(\bar{x})\in\overset{\circ}{H}{}^{k+2}(\Omega),\ \lambda_i=\lambda.$$

Здесь и далее $\omega'=a(\lambda-\lambda')$, $\omega''=b(\lambda-\lambda'')$.

В качестве следствий теорем 2 и 4 сформулируем утверждения об однозначной разрешимости рассматриваемых начально-краевых задач.

Теорема 5. Справедливы утверждения:

А. Пусть $\alpha\notin\sigma(\Delta)$ и $f(t,\bar{x})\in C(\mathbf{R}_+,L_2(\Omega))$, тогда задача Коши – Дирихле (1), (4), (5) имеет един-

ственное решение класса $C^2(\mathbf{R}_+, \overset{\circ}{L}_2(\Omega))$, которое определяется формулой

$$u(t,\bar{x}) = u_0(\bar{x}) + tu_1(\bar{x}) + \\ + \sum_{i=1}^{+\infty} \frac{1}{\alpha - \lambda_i} \int_0^t \int_0^{t-s} (1 + (t-s-\tau) p_i(\tau)) a_i(s) d\tau ds \phi_i(\bar{x}).$$

B. Пусть $\alpha \in \sigma(\Delta)$ и

$$\int_\Omega f(t,\bar{x}) \phi_i(\bar{x}) d\bar{x} \in C^1(\mathbf{R}_+), \ \lambda_i = \alpha,$$

тогда, если

$$\int_\Omega (f(0,\bar{x}) + \alpha\beta u_1(\bar{x}) + \alpha u_0(\bar{x})) \phi_i(\bar{x}) d\bar{x} = 0, \ \lambda_i = \alpha,$$

то задача Коши – Дирихле (1), (4), (5) имеет единственное решение класса $C^2(\mathbf{R}_+, \overset{\circ}{L}_2(\Omega))$, которое определяется формулой

$$u(t,\bar{x}) = u_0(\bar{x}) + tu_1(\bar{x}) + \\ + \sum_{\lambda_i \neq \alpha} \frac{1}{\alpha - \lambda_i} \int_0^t \int_0^{t-s} (1 + (t-s-\tau) p_i(\tau)) a_i(s) d\tau ds \phi_i(\bar{x}) - \\ - \sum_{\lambda_i = \alpha} \int_0^t \left(1 + \int_0^{t-s} p(\tau) d\tau\right) q_i(s) ds \phi_i(\bar{x}).$$

Здесь $p(t)$ и $p_i(t)$ – резольвенты ядер

$$-\frac{1}{\beta} + \frac{1}{\beta} \int_0^t g(\tau) d\tau \quad \text{и} \quad \frac{\lambda_i}{\alpha - \lambda_i} \left(\beta + t - \int_0^t (t-\tau) g(\tau) d\tau\right)$$

соответственно, а функции $a_i(t)$ и $q_i(t)$ задаются следующим образом:

$$a_i(t) = \int_\Omega \Big(f(t,\bar{x}) + \lambda_i \big(\beta u_1(\bar{x}) + u_0(\bar{x}) + tu_1(\bar{x}) - \\ - \int_0^t g(t-\tau)(u_0(\bar{x}) + \tau u_1(\bar{x})) d\tau \big) \Big) \phi_i(\bar{x}) d\bar{x},$$

$$q_i(t) = \frac{1}{\alpha\beta} \int_\Omega \Big(f(t,\bar{x}) + \alpha \big(\beta u_1(\bar{x}) + u_0(\bar{x}) + tu_1(\bar{x}) - \\ - \int_0^t g(t-\tau)(u_0(\bar{x}) + \tau u_1(\bar{x})) d\tau \big) \Big) \phi_i(\bar{x}) d\bar{x}.$$

Теорема 6. Справедливы утверждения:

A. Пусть $\gamma \notin \sigma(\Delta)$ и $f(t,\bar{x}) \in C(\mathbf{R}_+, H^k(\Omega))$, тогда задача Коши – Дирихле (2), (4), (5) имеет единственное решение класса $C^2(\mathbf{R}_+, \overset{\circ}{H}^{k+4}(\Omega))$, которое определяется формулой

$$u(t,\bar{x}) = u_0(\bar{x}) + tu_1(\bar{x}) + \\ + \sum_{i=1}^{+\infty} \frac{1}{\gamma - \lambda_i} \int_0^t \int_0^{t-s} (1 + (t-s-\tau) r_i(\tau)) b_i(s) d\tau ds \phi_i(\bar{x}).$$

B. Пусть $\gamma \in \sigma(\Delta)$ и

$$\left\langle f(t,\bar{x}), \phi_i(\bar{x}) \right\rangle_{H^k(\Omega)} \in C^1(\mathbf{R}_+), \ \lambda_i = \gamma,$$

тогда, если

$$\left\langle f(0,\bar{x}) + \gamma u_1(\bar{x}) - \gamma^2 u_0(\bar{x}), \phi_i(\bar{x}) \right\rangle_{H^k(\Omega)} = 0, \ \lambda_i = \gamma,$$

то задача Коши – Дирихле (2), (4), (5) имеет единственное решение класса $C^2(\mathbf{R}_+, \overset{\circ}{H}^{k+4}(\Omega))$, которое определяется формулой

$$u(t,\bar{x}) = u_0(\bar{x}) + tu_1(\bar{x}) + \\ + \sum_{\lambda_i \neq \gamma} \frac{1}{\gamma - \lambda_i} \int_0^t \int_0^{t-s} (1 + (t-s-\tau) r_i(\tau)) b_i(s) d\tau ds \phi_i(\bar{x}) - \\ - \sum_{\lambda_i = \gamma} \frac{1}{\gamma} \int_0^t e^{\gamma(t-s)} \left\langle f(s,\bar{x}) - \gamma^2 u_0(\bar{x}), \phi_i(\bar{x}) \right\rangle_{H^k(\Omega)} ds \phi_i(\bar{x}) - \\ - t \sum_{\lambda_i = \gamma} \left\langle u_1(\bar{x}), \phi_i(\bar{x}) \right\rangle_{H^k(\Omega)} \phi_i(\bar{x}).$$

Здесь $r_i(t)$ – резольвента ядра $\frac{\lambda_i}{\gamma - \lambda_i}(1 - \lambda_i t)$, а функция $b_i(t)$ задается следующим образом:

$$b_i(t) = \left\langle f(t,\bar{x}) + \lambda_i u_1(\bar{x}) - \lambda_i^2 u_0(\bar{x}) - \\ - \lambda_i^2 t u_1(\bar{x}), \phi_i(\bar{x}) \right\rangle_{H^k(\Omega)}.$$

Теорема 7. Справедливы утверждения:

A. Пусть $\lambda \notin \sigma(\Delta)$ и $f(t,\bar{x}) \in C(\mathbf{R}_+, L_2(\Omega))$, тогда задача Коши – Дирихле (3)–(5) имеет единственное решение класса $C^2(\mathbf{R}_+, \overset{\circ}{L}_2(\Omega))$, которое определяется формулой

$$u(t,\bar{x}) = u_0(\bar{x}) + tu_1(\bar{x}) + \\ + \sum_{i=1}^{+\infty} \frac{1}{\lambda - \lambda_i} \int_0^t \int_0^{t-s} (1 + (t-s-\tau) s_i(\tau)) c_i(s) d\tau ds \phi_i(\bar{x}).$$

B. Пусть $\lambda \in \sigma(\Delta)$, причем $\lambda \neq \lambda'$ и

$$\int_\Omega f(t,\bar{x}) \phi_i(\bar{x}) d\bar{x} \in C^1(\mathbf{R}_+), \ \lambda_i = \lambda,$$

тогда, если

$$\int_\Omega (f(0,\bar{x}) + \omega' u_1(\bar{x}) + \omega'' u_0(\bar{x})) \phi_i(\bar{x}) d\bar{x} = 0, \ \lambda_i = \lambda,$$

то задача Коши – Дирихле (3)–(5) имеет единственное решение класса $C^2(\mathbf{R}_+, \overset{\circ}{L}_2(\Omega))$, которое определяется формулой

$$u(t,\bar{x}) = u_0(\bar{x}) + tu_1(\bar{x}) + \\ + \sum_{\lambda_i \neq \lambda} \frac{1}{\lambda - \lambda_i} \int_0^t \int_0^{t-s} (1 + (t-s-\tau) s_i(\tau)) c_i(s) d\tau ds \phi_i(\bar{x}) - \\ - \sum_{\lambda_i = \lambda} \frac{1}{\omega'} \int_0^t \int_\Omega e^{-\frac{\omega''}{\omega'}(t-s)} \left(f(s,\bar{x}) + \omega'' u_0(\bar{x})\right) \phi_i(\bar{x}) d\bar{x} ds \phi_i(\bar{x}) -$$

$$-t\sum_{\lambda_i=\lambda}\int_{\Omega}u_1(\bar{x})\phi_i(\bar{x})d\bar{x}\phi_i(\bar{x}).$$

Здесь $s_i(t)$ – резольвента ядра $\frac{1}{\lambda-\lambda_i}(\omega_i'+\omega_i''t)$, а функция $c_i(t)$ задается следующим образом:

$$c_i(t)=\int_{\Omega}\big(f(t,\bar{x})+\omega_i'u_1(\bar{x})+$$
$$+\omega_i''u_0(\bar{x})+\omega_i''tu_1(\bar{x})\big)\phi_i(\bar{x})d\bar{x},$$
$$\omega_i'=a(\lambda_i-\lambda'),\ \omega_i''=a(\lambda_i-\lambda''),\ \lambda_i\neq\lambda.$$

В заключение автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю профессору М. В. Фалалееву за ряд ценных замечаний, касающихся представленных здесь результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, госконтракт № П696, и гранта для поддержки аспирантов и молодых сотрудников ИГУ, тема № 091-08-04 (приказ № 370 от 24.12.2010).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Cavalcanti M. M., Domingos Cavalcanti V. N., Ferreira J. Existence and Uniform Decay for a Non-Linear Viscoelastic Equation with Strong Damping // Math. Meth. Appl. Sci. 2001. Vol. 24. P. 1043–1053.
2. On Exponential Stability for Von Karman Equations in the Presence of Thermal Effects / E. Bisognin, V. Bisognin, G. Perla Menzala, E. Zuazua // Math. Meth. Appl. Sci. 1998. Vol. 21. P. 393–416.
3. Уизем Дж. Линейные и нелинейные волны. М. : Мир, 1977.
4. Ляв А. Математическая теория упругости. М.–Л. : ОНТИ НКТП СССР, 1935.
5. Фалалеев М. В. Фундаментальные оператор-функции сингулярных дифференциальных операторов в банаховых пространствах // Сиб. мат. журн. 2000. Т. 41, № 5. С. 1167–1182.
6. Lyapunov-Schmidt Methods in Nonlinear Analysis and Applications / N. Sidorov, B. Loginov, A. Sinitsyn, M. Falaleev. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 2002.
7. Владимиров В. С. Обобщенные функции в математической физике. М. : Наука, 1979.
8. Фалалеев М. В. Фундаментальная оператор-функция вырожденного уравнения теплопроводности в банаховых пространствах // Доклады РАН. 2007. Т. 416, № 6. С. 745–749.
9. Вайнберг М. М., Треногин В. А. Теория ветвления решений нелинейных уравнений. М. : Наука, 1969.
10. Логинов Б. В., Русак Ю. Б. Обобщенная жорданова структура в теории ветвления // Прямые и обратные задачи для дифференциальных уравнений в частных производных и их приложения. Ташкент : ФАН, 1978. С. 133–148.

УДК 658.231

Нижегородов А.И.,
канд. техн. наук, доцент Иркутского государственного технического университета (г. Иркутск),
e-mail: nastromo_irkutsk@mail.ru

МЕТОД ВИБРАЦИОННО-ВОЗДУШНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ВСПУЧЕННОГО ВЕРМИКУЛИТА С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ИНЕРТНОГО МАТЕРИАЛА

A.I. Nigegorodov

METHOD OF VIBRO-AERIAL DIVISION OF VERMICULITE WITH HIGH CONTANT OF INERT MATERIAL

Аннотация. *Предложен метод и агрегат для переработки отходов обогащения вермикулитовой руды с извлечением высококачественного вермикулита. Приведены результаты исследования процесса вибрационно-воздушного разделения компонентов вермикулито-песочной смеси.*

Ключевые слова: *вермикулит, вибропривод, вибрационно-воздушное разделение, дообогащение.*

Abstract. *Method and aggregate for recycling of waste products of vermiculite ore for getting vermiculite are proposed. Results of research of vibrational separation vermiculite mix components are given.*

Keywords: *vermiculite, components vibrational separation, waste products.*

Технологические процессы обогащения вермикулитовых руд не обеспечивают полного отделения частиц вермикулитового концентрата от инертного материала (песка) [2]. Частицы вермикулита плоские, а песок обладает кубоподобной формой, поэтому их разделение основано на различии аэродинамических коэффициентов.

Однако в потоке руды присутствуют и «толстые» частицы. При равной плотности с песком такие частицы не выделяются и уходят в «хвосты», анализ которых на массовое содержание вермикулита показывает, что его доля колеблется в пределах 27…52 %.

Очевидно, что переработка таких отходов является экономически выгодной и актуальной ресурсосберегающей задачей [3, 4].

После обжига «хвостов» в электрической модульно-спусковой печи [3], образуется вермикулито-песочная смесь. Для выделения вермикулита из общей массы материала применяется агрегат вибрационно-воздушного разделения, схема которого показана на рис. 1.

Разряжение, создаваемое вентилятором, формирует движение воздуха в каналах днища 2 наклонного лотка 1 и патрубках 4. Лоток, снабженный гидравлическим виброприводом, удерживается двухсторонними упругими связями 3.

Плунжер цилиндра 6 возбуждает колебания лотка за счет пульсации замкнутого объема жидкости W_1, создаваемого гидравлическим генератором, рабочим органом которого является предварительно поджатая винтом 9 упругая оболочка (рукав высокого давления) 8. Вращением эксцентрикового вала 7 вибропривод запускается в работу и выходит на резонансный режим. С помощью ручного насоса 13, снабженного клапаном 14, создается начальное давление P_0, которое поддерживается гидро-аккумулятором 11 с дросселем 12 и контролируется манометром 10.

Особенность вибропривода, показаного на рис. 1, заключается в возможности управления амплитудой A, скоростью $A\omega$ и ускорением $A\omega^2$ за счет изменения поджатия оболочки.

Динамика вибропривода описывается дифференциальным уравнением:

$$m\frac{d^2x}{dt^2}+\alpha\frac{dx}{dt}+c_1x+c_2x_1x+c_3x_1^2x-c_4x^2 = H_1x_1+H_2x_1^2, \quad (1)$$

где: m – масса вибролотка, x_1 и x – входное воздействие ($x_1 = eSin\omega t$) и координата вибролотка соответственно, α – приведенный коэффициент сопротивления движению, c_1, c_2, c_3, c_4, H_1 и H_2 – параметры, характеризующие объемно-упругие и конструктивные характеристики элементов вибропривода:

$$c_1 = c + \kappa_1 f^2 + 2\,\kappa_2\,\Delta W_0\,f^2,$$
$$c_2 = 2\,\kappa_2\,a_1\,f^2,$$
$$c_3 = 2\,\kappa_2\,a_2\,f^2,\quad c_4 = \kappa_2 f^3,$$
$$H_1 = a_1\,f\,(\kappa_1 + 2\,\kappa_2\,\Delta W_0),$$
$$H_2 = f\,(\kappa_1\,a_2 + 2\,\kappa_2\,\Delta W_0\,a_2 + \kappa_2\,a_1^2),$$

где κ_1 и κ_2 – эмпирические коэффициенты объемной характеристики рукавов высокого давления с внутренним диаметром 20 мм и длиной 245 мм при рабочем давлении P:

$$P = \kappa_1\Delta W + \kappa_2\,\Delta W^2, \quad (2)$$

c – приведенный коэффициент жесткости упругих связей вибролотка, f – площадь плунжера, a_1 и a_2 – коэффициенты кинематической характеристики вибропривода, зависящие от внешнего диаметра оболочки d, ширины ее поджатия B и параметра поджатия h, определяющие диапазон регулирования амплитуды вибрации:

$$W_1 = a_1x_1 + a_2x_1^2,$$

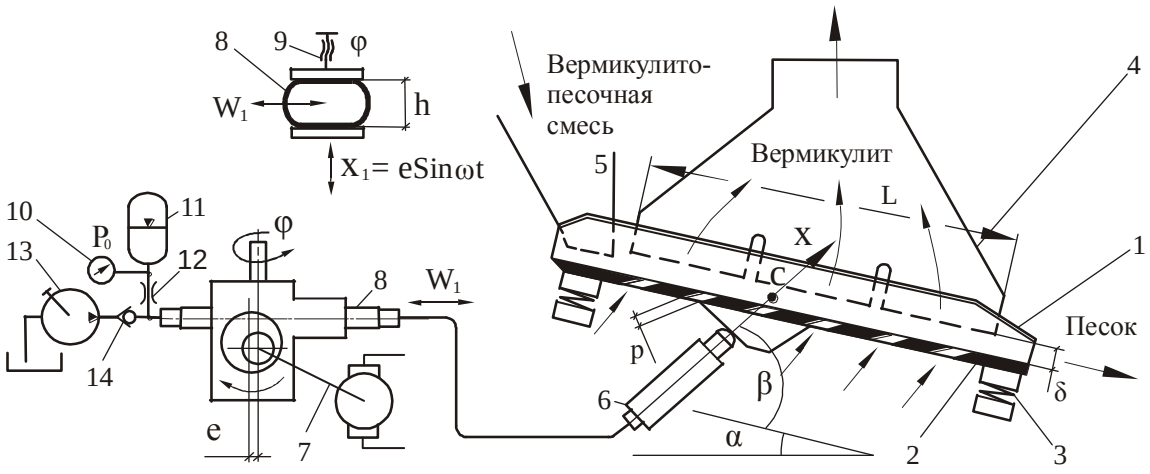


Рис. 1. Схема вибрационно-воздушного разделения вермикулито-песочной смеси

$$a_1 = \pi\left[\frac{B}{2}(d-h)+\frac{1}{4}(d-h)^2\right],$$

$$a_2 = \frac{\pi}{4}(B+d-h).$$

Пределы изменения параметра h имеют конструктивные ограничения:

$$h_{max} = d - e, \qquad h_{min} = d - 0{,}5d_0 + e,$$

где d_0 – внутренний диаметр оболочки.

При величине эксцентриситета e = 0,2 мм, уравнение (1) можно записать в виде

$$m\frac{d^2x}{dt^2}+\alpha\frac{dx}{dt}+c_1x+c_2x_1x-c_4x^2 = H_1x_1,$$

что упрощает решение и позволяет получить амплитудо-частотную характеристику для первого и второго резонансных режимов, рис. 2.

При ω / ω_1 = 1, где ω_1 – частота возбуждения и ω – частота вибрации лотка (f = 25 Гц), наступает первый резонансный режим с коэффициентом динамичности $\kappa_д$ ~ 11:

$$\kappa_д = A_x(\omega) / A_{x(ст)},$$

где $A_{x(ст)}$ – амплитуда статического смещения лотка при $\omega_1 \approx 0$, $A_x(\omega)$ – амплитуда на пике резонансной кривой.

При ω / ω_1 = 0,5 происходит «захват» частоты возбуждения ω_1 частотой второго резонансного режима ω. Этот эффект, формально соответствующий параметрическому резонансу, здесь обусловлен не симметричной схемой возбуждения колебаний вибропривода и проявляется в значительном повышении амплитуды колебаний при коэффициенте динамичности $\kappa_д$ ~ 15. Поэтому рабочие точки гидравлического вибропривода представляют семейство точек на нисходящей ветви второго резонансного режима, рис. 2.

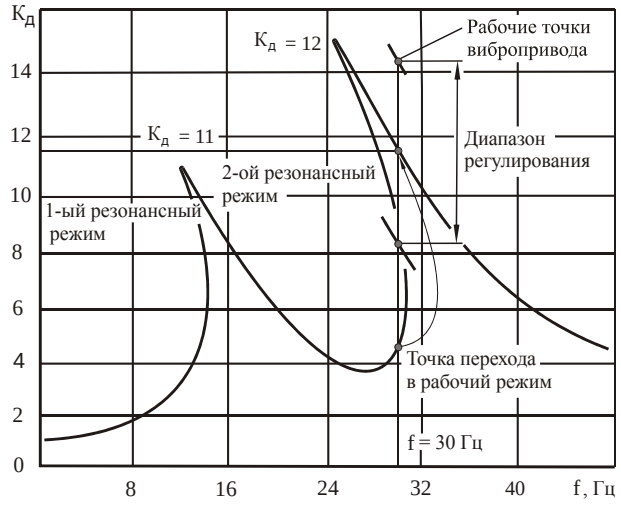


Рис. 2. АЧХ вибропривода

Регулировочная характеристика вибропривода для второго резонансного (основного) режима описывается выражением

$$A(x) = ef\left[\frac{B}{2}(d-h)+\frac{1}{4}(d-h)^2\right]\cdot \frac{\pi(\kappa_1+2\kappa_2\Delta W_0)}{2\xi\left[f^2(\kappa_1+2\kappa_2\Delta W_0)+c\right]}, \quad (3)$$

где ξ – коэффициент демпфирования, отражающий энергетические потери в силовом контуре «оболочка – плунжер», c – приведенный коэффициент жесткости упругих связей вибролотка, W_0 – объем начальной деформации полости оболочки при начальном давлении в силовом контуре, определяемый по выражению (2) при $P = P_0$.

Настройка вибропривода на резонансный режим заданной частоты ω производится изменением начального давления P_0 с помощью ручного насоса 13, рис. 1. Регулировочной характеристикой (3) опиисывается зависимость амплитуды вибрации в основном резонансном режиме и определяется диапазон ее изменения на амплитудо-частотной характеристике, рис. 2.

Поток вермикулито-песочной смеси, поступающий по лотку 5, рис. 1, не оказывает заметного влияния на динамику вибропривода, так как суммарная масса движущегося материала не превышает 0,5…1 % массы вибролотка 4 и в вышеприведенных расчетах опущена.

Для определения оптимальных параметров работы агрегата вибрационно-воздушного разделения рассмотрим движение вспученного вермикулитового зерна по поверхности вибролотка, рис. 3.

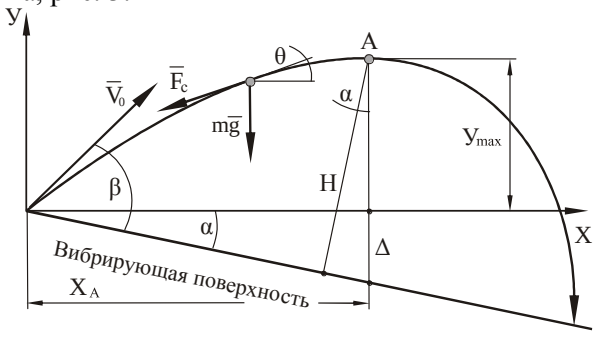


Рис. 3. Расчетная схема к определению параметров вибрационно-воздушной сепарации

Система координат совмещена с поверхностью вибролотка, а начало координат соответствует положению частицы на вибрирующей поверхности в момент отрыва.

Движение одиночной частицы с учетом сопротивления воздуха описывается уравнениями:

$$\frac{d^2x}{dt} = -\lambda\frac{dx}{dt}, \quad (4)$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = -\lambda\frac{dy}{dt} - g, \quad (5)$$

где λ – коэффициент, характеризующий сопротивление воздуха, равный:

$$\lambda = \frac{18\zeta}{d^2\rho},$$

где ζ – коэффициент динамической вязкости воздуха, ρ – истинная плотность вспученного вермикулита ($\rho \sim 165$ кг/м^3), d – диаметр зерна.

Решение уравнений (4 и 5) с учетом начальных условий $x_0 = 0$, $y_0 = 0$, $\theta_0 = \beta - \alpha$ и $V_0 = A\omega$ имеет вид:

$$V_y = \left(\frac{g}{\lambda} + V_0 Sin\theta_0\right)e^{-\lambda t} - \frac{g}{\lambda}, \qquad (6)$$

$$x = \frac{V_0 Cos\theta_0}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t}), \qquad (7)$$

$$y = \frac{g + \lambda V_0 Sin\theta_0}{\lambda^2}(1 - e^{-\lambda t}) - \frac{g}{\lambda}t. \qquad (8)$$

Совместное решение уравнений (7 и 8) дает выражение траектории частицы:

$$y = \left(\frac{g}{\lambda V_0 Cos\theta_0} + tg\theta_0\right)x - \frac{g}{\lambda^2}\ln\frac{V_0 Cos\theta_0}{V_0 Cos\theta_0 - \lambda x}. \qquad (9)$$

Максимальный подъем и время выхода частицы на y_{max} определяются из (6 и 8):

$$y_{max} = \frac{V_0 Sin\theta_0}{\lambda} - \frac{g}{\lambda^2}\ln\left(1 + \frac{\lambda V_0 Sin\theta_0}{g}\right), \qquad (10)$$

$$t_{y\,max} = \frac{\ln\left(1 + \frac{\lambda V_0 Sin\theta_0}{g}\right)}{\lambda}. \qquad (11)$$

Для определения оптимального угла приложения вибрации β введем удельный параметр ξ, равный:

$$\xi = \frac{y_{max}}{ASin(\beta - \alpha)} = \frac{1}{ASin(\beta - \alpha)} \cdot \left[\frac{V_0 Sin\theta_0}{\lambda} - \frac{g}{\lambda^2}\ln\left(1 + \frac{\lambda V_0 Sin\theta_0}{g}\right)\right], \qquad (12)$$

где $ASin(\beta - \alpha)$ – вертикальная составляющая направления амплитуды.

При заданных параметрах $\alpha = 20$ °, $A = 0{,}001$ м, $\omega = 157$ рад/с (25 Гц), $V_0 = 0{,}157$ м/с и $\lambda = 0{,}46$ 1/с, определяем значения ξ в диапазоне $\beta = 50 \ldots 80$ °.

На рис. 4 показана зависимость удельного параметра ξ от угла приложения вибрации β.

Экстремум функции (12) достигается при $\xi = 9{,}86$, что соответствует углу вибрации 63 ° при максимальной высоте взлета частиц ~ 7 мм.

Чтобы найти максимальный подъем частицы H, относительно вибрирующей поверхности, определим время подъема в системе координат по выражению (10). При $\theta_0 = 63 - 20 = 43$ ° время, определенное по формуле (11), $t_{y\,max}$ составляет ~ 0,11 с.

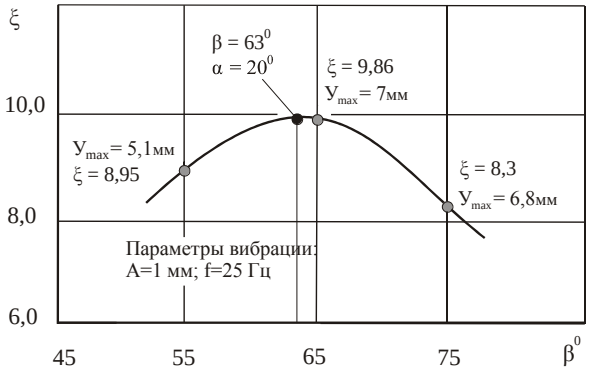


Рис. 4. Зависимость параметра ξ от угла приложения вибрации

Численное решение уравнения (9) при $y = y_{max}$ дает значение координаты x_A в точке максимального взлета А, равное 0,012 м. Величину подъема частиц H над уровнем вибролотка можно найти руководствуясь расчетной схемой, показанной на рис. 3:

$$\Delta = x_A tg\alpha = 0{,}0066 \text{ м},$$

$$H = (\Delta + y_{max})Cos\alpha = 0{,}013 \text{ м}.$$

Полученное значение H позволяет определить оптимальный зазор δ установки патрубков 5 над уровнем днища 2 вибролотка, рис. 1: $\delta = (1{,}05 \ldots 1{,}1)\,H$.

Установленные значения конструктивных параметров β и δ соответствуют рабочему процессу вибропривода агрегата вибрационно-воздушного разделения концентратов и «хвостов» размерных групп КВК-2 и КВП-2.

При работе с другими размерными группами необходимо регулировать интенсивность вибрации $A\omega$ и $A\omega^2$ для получения максимально эффективного разделения компонентов вермикулито-песочной смеси.

Пропускная способность агрегата вибрационно-воздушного разделения должна соответствовать производительности печи $П$. При условии трехслойного потока вермикулито-песочной смеси, определим ширину лотка, рис. 5. Исходя из среднего времени полета $t_{ср} \approx 2t_{y\,max} = 0{,}22$ с, определим количество циклов колебаний n за время $t_{ср}$ при частоте 25 Гц: $n = t_{ср} f = 0{,}22 \times 25 = 5{,}5$.

Принимая гипотезу о мягком соударении (коэффициент восстановления $R = 0$), среднее значение скорости вибротранспортирования можно ориентировочно определить по формуле:

$$V_{cp} = \frac{\pi n g}{\omega}\left[\frac{Cos\alpha \cdot tg\beta}{1} - \frac{(2 - \nu)Sin\alpha}{\nu}\right],$$

где ν – коэффициент мгновенного трения (~ 0,35 [1]).

При вышеприведенных параметрах средняя скорость вибротранспортирования равна

~ 0,25 м/с. Пропускная способность лотка $П_л$ определяется формулой: $П_л = B\ a\ V_{ср}$.

Приравнивая $П$ и $П_л$, получим:

$$B = \frac{П}{aV_{ср}},$$

где a – толщина трехслойного потока вермикулито-песочной смеси. $П$ – производительность печи.

Определим суммарную площадь щелевых каналов днища $f_д$ вибролотка и контура его сопряжения со всасывающими патрубками $f_к$, рис. 5:

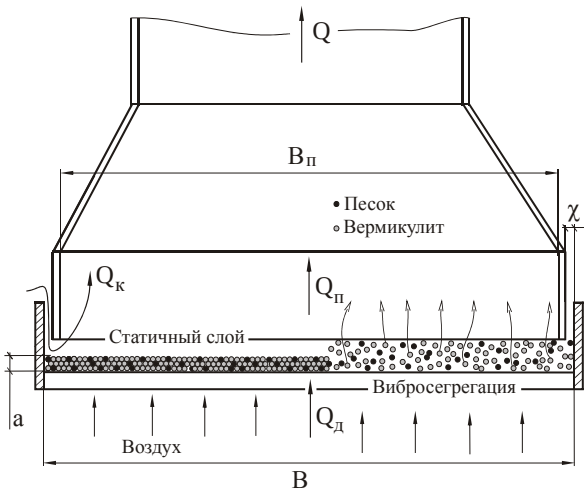


Рис. 5. Сопряжение вибролотка и патрубков. Поперечное сечение

$F = f_д + f_к = Bpn + (2B\delta + 2L\chi) = B(pn + 2\delta) + 2L\chi$,

где n – количество щелевых каналов, p – ширина канала, δ и χ – соответствующие зазоры, рис. 1 и 5.

Условие: $Bpn = 2(B\delta + 2L\chi)$ обеспечивает равное поступление потоков воздуха через щелевые каналы и по контуру сопряжения.

Исходя из баланса воздушных потоков ($м^3/с$):

$$Q_д + Q_к = Q_п = Q$$

и условия неразрывности потоков:

$$V_1 f_д + V_2 f_к = V_п B_п L = Q$$

при $f_д = f_к$ и $V_1 = V_2 = V$, получим: $V = Q / 2f$.

Зависимости расхода воздуха через щелевые каналы в днище вибролотка и всасывающие патрубки, рис. 5, будут иметь вид:

$$Q_Д = 2 f_Д (2{,}5-3)\sqrt{\frac{4m_{(в)}g}{\kappa_{ф(в)}\gamma_в \pi D^2}},$$

$$Q_П = 2 f_П (2{,}5-3)\sqrt{\frac{4m_{(в)}g}{\kappa_{ф(в)}\gamma_в \pi D^2}}.$$

Полученные условия обеспечивают превышение скорости потока над скоростью витания вермикулита в 2,5…3 раза.

Создание виброкипящего слоя вермикулитопесочной смеси с непрерывным подпрыгиванием обеспечивает разделение частиц (вибросегрегация), формирует межзерновые пространства, рис. 5, и беспрепятственный вынос вермикулитовых зерен потоком воздуха в осадительный бункер системы дообогащения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бауман В. А. Быховский И. И. Вибрационные машины и процессы в строительстве. М. : Высш. шк., 1977. 255 с.
2. Вермикулит (производство и применение) // Сборник научных трудов / Урал. проект. и науч.-исслед. ин-т. Челябинск : УралНИИстромпроект, 1988. 175 с.
3. Нижегородов А. И. Технологический комплекс для обжига вермикулитовых концентратов // Строительные и дорожные машины. 2009. №2. С. 24–27.
4. Нижегородов А. И. Эффективность огневых и электрических модульно-спусковых печей для обжига вермикулита // Технология машиностроения. 2010. № 1. С. 19–23.

.

УДК 531.36: 62-50

Русанов Вячеслав Анатольевич,
доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник,
Институт динамики систем и теории управления СО РАН,
тел. (3952) 51-17-81, e-mail: v.rusanov@mail.ru
Антонова Лариса Васильевна,
заместитель директора Института математики и информатики,
Бурятский государственный университет (БГУ),
тел. (33012) 64-89-65, e-mail: antonov_vi_52@mail.ru
Козырев Владимир Александрович,
аспирант, Иркутский государственный университет путей сообщения,
тел. (3952) 51-17-81, e-mail: v.kozyrev@bk.ru
Шарпинский Дмитрий Юрьевич,
научный сотрудник, Институт динамики систем и теории управления СО РАН,
тел. (3952) 51-17-81, e-mail: d-sh@bk.ru

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ДИНАМИКИ УПРУГОГО ЭЛЕМЕНТА СПУТНИКА-ГИРОСТАТА

V.A. Rusanov, L.V. Antonova, V.A. Kozyrev, D.Y. Sharpinsky

STRUCTURAL AND PARAMETRIC IDENTIFICATION OF THE DIFFERENTIAL EQUATIONS OF THE DYNAMICS OF THE SATELLITE-GYROSTAT ELASTIC ELEMENT

Аннотация. *В работе представлен программно-алгоритмический комплекс, имитирующий этапы математического проектирования измерительной аппаратуры и вычислителя, в апостериорном моделировании уравнений многомерной дифференциальной системы, описывающей динамику демпфированных поперечных колебаний защепленной штанги-балки спутника-гиростата. Функциональной основой данных этапов является формализованная (в рамках метода Фурье) аналитическая модель изгибных колебаний балки Эйлера – Бернули, представленной системой дифференциальных уравнений счетного пучка стоячих волн. Предложен метод идентификации, дающий возможность диагностирования элементов крупногабаритных стержневых конструкций.*

Ключевые слова: *спутник-гиростат, уравнения движения в пространстве, дифференциальная реализация.*

Abstract. *This paper presents a software-algorithmic complex to simulate the stages of mathematical design of the measuring apparatus and a calculator in aposterior simulation of multidimensional differential equations system describing the dynamics of damped transverse vibrations of satellite-gyrostat beam. Functional basis of these stages is a formalized (in the Fourier method) analytical model of flexural vibrations of Euler – Bernoulli beam, provided with the system of standing waves countable beam differential equations. Method of identification, enabling diagnosis of large elements of the bar structures, is proposed.*

Keywords: *satellite-gyrostat, the equations of motion in space, a differential implementation.*

Введение

Голономную механическую систему (голономная механическая система – это система, в которой все механические связи являются геометрическими и/или налагающими ограничения только на положения (перемещения) точек и тел системы, но не на их скорости, как это имеет место в неголономных системах [2, с. 13]), содержащую в качестве своих частей как подсистемы с конечным числом степеней свободы, так и звенья с распределенными параметрами, для краткости, как правило [1], называют *сложной механической системой* (СМС) (такая «негомогенная» система зани-

мает промежуточное место в последовательности возможных механических моделей между одиночным *абсолютно твердым* телом и *сплошной* средой; в зарубежной литературе подобную систему уравнений иногда называют *гибридной* [3]). В такой постановке последняя есть механическая система со счетным числом степеней свободы. Соответственно, ее движение описывается совокупностью счетного числа обыкновенных дифференциальных уравнений, в общем случае нелинейных и с переменными (нестационарными) коэффициентами. Спутник-гиростат (СГ), содержащий в своем составе упругий элемент типа гибкого стержня (твердый гиростат + гибкий стержень) – важный пример сложной голономной механической системы:

Дифференциальные уравнения СГ-динамики структурно и параметрически определяются геометрией СГ-системы, распределением масс в СГ-системе, а также природой внешних сил и сил, действующих в местах соединения тел СГ-системы. При пространственно-угловом СГ-движении эти взаимосвязи эволюционируют, причем по законам, не поддающимся априорному описанию, что выдвигает задачу их апостериорной оценки, а если говорить шире – структурно-параметрической идентификации нелинейных уравнений СГ-динамики (хотя основные результаты этой работы касаются именно модели спутника-гиростата, будет ясно, что многие рассмотрения обратных задач динамики можно перенести на случи более общие, чем СГ-динамика).

С появлением космических СМС необходимость в учете влияния нежесткости их конструкций становится все более насущной; наличие в геометрической конфигурации СМС деформируемых звеньев может существенно изменить динамические характеристики, в частности определяющие устойчивость орбитальной ориентации системы (ее стационарных положений). Эту проблему решает качественная теория систем. Важный аспект теории нелинейных динамических систем – исследование и классификация точек равновесия в зависимости от структуры и параметров модели исследуемой системы, в том числе при ее адаптации к условиям реальной технической эксплуатации.

Как показывает практика, проведение точного количественного анализа нелинейной динамики СМС возможно только в редких случаях: среди нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих динамику сложных систем, лишь для немногих удается получить точное аналитическое решение. Однако часто на практике не только важно знать точное численное значение параметров системы, задающее (определяющее) ее состояние в заданные моменты времени, но и описание поведения системы в целом, т. е. на качественном уровне. Иными словами, при проектировании и текущем поддержании функционирования СМС важно знать, существуют ли у нее состояния равновесия, какие из них устойчивы, а какие – нет, возможны ли в системе устойчивые колебательные режимы и т. п. Необходимо знать также, при каких условиях в системе возможны те или иные характерные поведения (колебания, равновесия и т. п.) и когда устойчивые состояния сменяются неустойчивыми.

Сказанное выше делает актуальным структурно-параметрическое моделирование динамики сложной системы [4], как при ее стендовых испытаниях (или испытаниях отдельных подсистем), так и в режиме ее длительного функционирования. Поэтому ниже основная целевая установка работы – описание алгоритмов комплекса «РЕДИМ-МОДФОКБ» по дифференциальной реализации экспериментальных данных для гибкого аксиального элемента спутника-гиростата в виде нежесткой штанги.

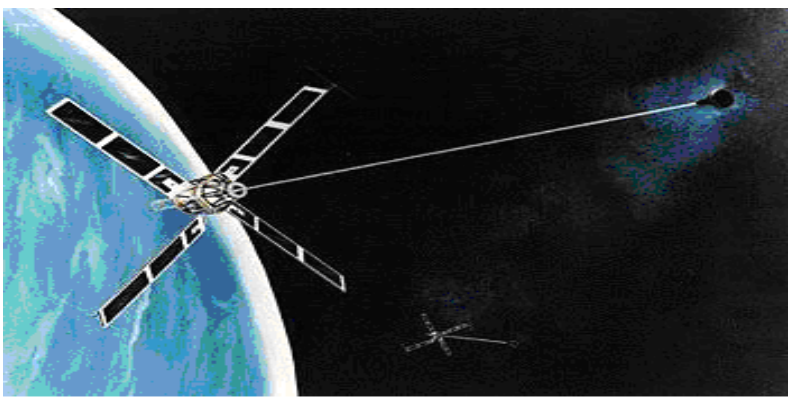


Рис. 1. Пример геометрической компоновки СГ-конструкции (в качестве прототипа – спутник HILAT)

1. Постановка задачи апостериорного моделирования динамики голономной системы с большим числом степеней свободы

Рассмотрим СМС, состоящую из конечного числа твердых, упругих, а также материальных точек (т. е. с ненулевой массой). Одно из твердых тел СМС примем за *основное* (в системе связанных тел обычно выделяют одно основное тело (как правило, наиболее массивное); А.И. Лурье назвал [6] такое тело *носителем* системы, а все остальные тела, с ним связанные, – *носимыми*) – p_0. С телом p_0 свяжем одно упругое тело плотностью ρ (случай нескольких упругих тел легко получается из рассматриваемого ниже) и некоторых других твердых тел и материальных точек; полости с жидкостью и т. п. не рассматриваем.

С носителем p_0 жестко свяжем *связанную* прямоугольную декартову систему координат $Ox_1x_2x_3$ с началом в центре масс O тела p_0 и осями, совмещенными с его главными центральными осями инерции. Абсолютное движение системы будем рассматривать по отношению к *инерциальной* системе координат $O'\xi\eta\zeta$, начало которой, например, помещено в центре планеты, а оси направлены так, чтобы в начальный момент времени они были параллельны осям *орбитальной* системы координат; начало орбитальной системы помещается в характерную точку СМС, например O, одна ось направляется по радиусу-вектору, другая – по нормали к плоскости орбиты, третья – по трансверсали [5].

Положение какой-либо точки p_γ системы определим ее радиусом-вектором

$$\mathrm{r}_\gamma'=\mathrm{r}_0'+\mathrm{r}_\gamma$$

относительно точки O', где r_0' – радиус-вектор точки O относительно O', r_γ – радиус-вектор точки P_γ относительно O (в координатах осей Ox_i, $i=1,\ldots,3$).

В такой постановке абсолютная скорость точки p_γ равна:

$$\mathrm{v}_\gamma=\mathrm{v}_0+\omega\times\mathrm{r}_\gamma+d\mathrm{r}_\gamma/dt,$$

где × – операция векторного произведения, v_0 и ω – векторы скорости точки O и мгновенной угловой скорости тела p_0, $d\mathrm{r}_\gamma/dt$ – вектор скорости точки p_γ в ее движении по отношении к телу p_0.

Кинетическая энергия системы, как известно [6, 7], имеет следующий вид:

$$E=m_\Sigma\mathrm{v}_0^2/2+m_\Sigma\mathrm{v}_0^{\mathrm{T}}(\omega\times\mathrm{r}_c)+\omega^{\mathrm{T}}\Theta_0\omega/2+\mathrm{v}_0^{\mathrm{T}}\Sigma_\gamma m_\gamma d\mathrm{r}_\gamma/dt+$$
$$+\omega^{\mathrm{T}}\Sigma_\gamma\mathrm{r}_\gamma\times m_\gamma d\mathrm{r}_\gamma/dt+\Sigma_\gamma m_\gamma(d\mathrm{r}_\gamma/dt)^2/2,$$

где $m_\Sigma=\Sigma_\gamma m_\gamma$ – общая масса СМС, r_c – радиус-вектор центра масс СМС относительно точки O, Θ_0 – тензор инерции системы для точки O; знак Σ_γ означает суммирование по всем точкам СМС с массами m_γ (здесь и ниже части сумм Σ_γ, относящиеся к частицам упругого тела, представляются интегралами, взятыми по области D пространства $Ox_1x_2x_3$, занятой в данный момент времени упругим телом), «^{T}» – операция транспонирования вектора.

Количество движения Q и момент количеств движения G относительно точки O определяются по формулам (где v_c – вектор скорости центра масс СМС):

$$Q=\mathrm{grad}\mathrm{v}_0,\ E=m_\Sigma\mathrm{v}_c,$$
$$G=\mathrm{grad}_\omega\ E=\mathrm{r}_c\times m_\Sigma\mathrm{v}_0+\Theta_0\omega+\Sigma_\gamma\mathrm{r}_\gamma\times m_\gamma d\mathrm{r}_\gamma/dt.$$

В результате будем иметь замкнутую систему нелинейных дифференциальных уравнений СМС – обыкновенных и в частных производных [6–8]:

$$dQ/dt+\omega\times Q=F,$$
$$dG/dt+\omega\times G+\mathrm{v}_0\times Q=M,$$
$$\rho d^2w/dt^2=fdw/dt-Lw+U, \qquad (1)$$
$$Lw:=-\mathrm{div}(p(x)\mathrm{grad}\ w(x,t))+q(x)w(x,t),\ x\in D,$$
$$\rho(x)d^2w(x,t)/dt^2=f(x)dw(x,t)/dt+\mathrm{div}(p(x)\mathrm{grad}\ w(x,t))-$$
$$-q(x)w(x,t)+U(x,t),$$

где F и M – главные вектор и момент относительно точки O всех приложенных к системе активных сил F_γ, величина $w(x,t)$ означает относительное перемещение точки p_γ при деформации упругого тела (в частности, это относительное перемещение суть любая из координат вектора r_γ), функции $\rho(x)$, $f(x)$, $p(x)$ и $q(x)$ определяются свойствами среды, где происходит деформация упругого тела, а свободный член $U(x,t)$ выражает интенсивность внешних воздействий F_γ.

Распространенный способ *дискретизации* СМС состоит [8, с. 464–497] в представлении перемещений упругих элементов системы в виде рядов по некоторой полной системе пространственных функций (по собственным функциям эллиптического оператора), умноженных на обобщенные координаты, при этом в указанных рядах оставляют небольшое число первых членов. Этот метод обычно называют «*методом нормальных форм колебаний*» (менее часто – «*методом усечения числа гармоник*»). Один из недостатков метода нормальных форм колебаний состоит в том, что усечение указанных выше рядов вносит элемент неопределенности (например, в условиях устойчивости равновесных положений СМС), поскольку затруднительно заранее определить число форм колебаний, необходимое для того, чтобы этот метод дал удовлетворительные результат. В свою очередь, отмеченное положение делает актуальным экспериментальное подтверждение (или опровержение) «рекомендаций метода усечения», что формализует следующая задача апостериорно-

го моделирования СМС (модификация задачи из [9]).

Выделим класс систем [9], движение которых в пространстве состояний R^n описывается векторно-матричным дифференциальным уравнением

$$dx(t)/dt=Ax(t)+B\psi(x(t)),\ t\in T:=[t_0,t_1], \quad (2)$$
$$x(t_0)=x_0\in R^n,$$
$$y(t)=Cx(t);$$

$x\in AC(T,\ R^n)$ – траектория системы, $\psi(x)\in L_2(T,\ \mu,\ R^m)$ – нелинейная составляющая уравнений состояния системы (или управление в форме нелинейной обратной связи), $y\in AC(T,R^p)$ – «выход» системы, $A\in M_{n,n}(R)$, $B\in M_{n,m}(R)$, $C\in M_{p,n}(R)$, $p\le n$, $M_{n,m}(R)$ – пространство всех $n\times m$-матриц с элементами из R.

Задачу дифференциальной реализации [10] будем рассматривать (с учетом второго уравнения в (2)) в рамках следующего структурного ограничения

$$\psi(x(t))=\varphi(y(t)),\ t\in T, \quad (3)$$

обусловленного фактом: гипотезу закона $\psi(x)$ можно экспериментально подтвердить, или опровергнуть исключительно с помощью выходного сигнала $y(t)$.

Постановка задачи структурно-параметрической идентификации: для апостериорного процесса $y\in AC(T,R^p)$ и априори заданного (как гипотеза) закона φ: $AC(T,R^p)\to L_2(T,\mu,R^m)$ таких, что

$$\dim \mathrm{Span}\{y_i\in AC(T,R)\colon i=1,\dots,p\}=p,$$
$$\dim \mathrm{Span}\{\varphi_j(y)\in L_2(T,\mu,R)\colon j=1,\dots,m\}=m, \quad (4)$$
$$y_i\notin \mathrm{Span}\{\varphi_j(y)\colon j=1,\dots,m\},\ \forall i=1,\dots,p;$$
$$\mathrm{col}(y_1(t),\dots,y_p(t)):=y(t),$$
$$\mathrm{col}(\varphi_1(y(t)),\dots,\varphi_m(y(t))):=\varphi(y(t)),$$

получить конструктивные процедуры в решении следующих задач:

1) определить необходимые и достаточные условия разрешимости задачи дифференциальной реализации (совместное выполнение позиций *а) – в)*, что по существу суть структурная идентификация моделируемой системы):

а) существует конечномерное фазовое многообразие R^n минимального динамического порядка n (называемое минимальным пространством состояний); ясно, что размерность n минимального пространства состояний опосредованно определяет число нормальных форм колебаний при построении редуцированной модели СМС в рамках метода усечения гармоник,

б) существует некоторое начальное состояние $x(t_0)=x_0\in R^n$,

в) существует дифференциальная система (2), (3) (с некоторыми матрицами A, B, C), эволюционирующая (с начальным условием x_0) на фазовом многообразии R^n и имеющая такое же (идентичное) отображение $y=Cx$;

2) в положении 1) построить прямой алгоритм реализации (параметрическая идентификация системы): вычисление минимального динамического порядка n, вектора $x_0\in R^n$, матриц $A\in M_{n,n}(R)$, $B\in M_{n,m}(R)$, $C\in M_{p,n}(R)$; в общем случае конструкции x_0, A, B, C далеко не единственны.

Первое условие в (4) по существу означает, что любая переменная y_i наблюдаемого (экспериментально) на интервале T векторного выходного СМС-сигнала y не может быть выражена посредством линейной комбинацией других y_j (это приводит к минимальной размерности пространства выходных сигналов); из второго условия (4) следует аналогичное структурное свойство для координат вектор-функции $\varphi(y)$. Третье условие специфично, в определенном смысле оно констатирует: реализация должна быть с пространством состояний, поскольку из него с необходимостью следует:

$$y\ne D\psi(x),\ \forall D\in M_{p,m}(R).$$

Пункт *а)* позволяет называть такую реализацию *минимальной* [10, с. 267]; в обычных матричных терминах этот пункт эквивалентен положению [10, с. 68], когда пара матриц $(C,\ A)$ является наблюдаемой (или, для метода нормальных форм колебаний, – наблюдаем усеченный ряд гармоник).

2. Модели внешнего упругого элемента спутника-гиростата в форме уравнений Лагранжа второго рода

Движение сложной голономной механической системы (как и движение любой механической системы) удовлетворяет основным принципам и теоремам аналитической механики, отраженным в дифференциальной системе (1). Так как любая СГ-система есть частный вид сложной механической системы, целесообразно преобразовать общие СМС-уравнения (1) к более простому (частному) выражению, соответствующему именно дифференциальным уравнениям (таким дифференциальным уравнениям отвечают уравнения Лагранжа второго рода, поскольку система уравнений в независимых координатах имеет [2, с. 50] наименьший возможный порядок, что отвечает *а)* п. 1.) СГ-динамики; поскольку аналитические трудности нелинейной теории упругости довольно значительны, ее приложения к вращающимся СГ-конструкциям, как правило [11], ограничиваются случаями радиальных и аксиальных стержней, а также осесимметричной пластиной, перпендикулярной оси вращения спутника-гиростата (или даже ограничиваются одной из данных схем – рис. 1).

В такой постановке анализ (в рамках метода усечения числа гармоник) форм колебаний упругого элемента (в частности гибкого стержня) на вращающемся СГ-корпусе требует вывода квазилинейных уравнений (2), описывающих малые колебательные отклонения элемента от его постоянного деформированного состояния [12]. При этом структура гипотезы нелинейного закона (3) должна определяться методологической установкой, что основной фактор нелинейности СГ-динамики по существу вызван вращением носителя СГ-системы, т. е. телом p_0.

Рассмотрим аналитическую модель уравнений СГ-динамики в форме дифференциальных уравнений Лагранжа второго рода [11, с. 101]:

$$Md^2w(t)/dt^2+Ddw(t)/dt+Sw(t)=Ku(w(t),dw(t)/dt), \quad (5)$$
$$w(t_0)=w_0, \quad dw(t)/dt \,|\, t=t_0=w'_0,$$
$$y(t)=C\mathrm{col}(w(t),dw(t)/dt),$$

где $w\in C^{\infty}(T,R^k)$ – вектор-функция обобщенных перемещений (для СГ-конструкции вектор-функция $q=q_1+q_2$ декомпозируется на вектор-функцию q_1 – перемещения конструкции как «жесткого целого» + упругих перемещений – q_2.), $u\in C^{\infty}(T,R^m)$ – вектор-функция внешних нагрузок, $y\in C^{\infty}(T,R^p)$ – измерения датчиков первичной информации, M и S – симметричные $k\times k$-матрицы масс и жесткостей конструкции, D – $k\times k$-матрица демпфирования, K – $k\times m$-матрица внешних воздействий, C – $p\times 2k$-матрица наблюдающего устройства, w_0, w'_0 – начальные векторы перемещений и скоростей (состояние конструкции в момент времени t_0).

З а м е ч а н и е 1. Система (5) записана в предположении о малости вектора перемещений; это накладывает определенные ограничения на вид вектор-функции $t\to u(w(t),dw(t)/dt)$ внешних нагрузок [13, с. 93]. Поэтому применительно к СГ-динамике дифференциальные уравнения (5) могут использоваться на ограниченном интервале времени при рассмотрении случаев приложения к конструкции уравновешенных [14, с. 275] и слабо неуравновешенных воздействий, когда движение конструкции как твердого целого мало отличается от равномерного поступательного движения [11, с. 102].

Уравнения Лагранжа (5) легко трансформируются к виду Коши (2) (преобразование к модели в пространстве состояний) через линейную связь:

$$x(t):=\mathrm{col}(w(t), dw(t)/dt)\in R^n,\ n=2k, \quad (6)$$
$$\psi(x(t)):=u(w(t), dw(t)/dt),$$
$$A:=\begin{bmatrix} 0_k & E_k \\ -M^{-1}S & -M^{-1}D \end{bmatrix},\ B:=\begin{bmatrix} 0_k \\ M^{-1}K \end{bmatrix},$$

где 0_k и E_k – соответственно нулевая и единичная $k\times k$-матрицы. Ясно, что представления (6) приводят математическую постановку контекста задачи апостериорного моделирования из п. 1 к задаче структурно-параметрической идентификации квазилинейных уравнений СГ-динамики в форме (2).

3. Разработка интерактивного комплекса «РЕДИМ-МОДФОКБ» для моделирования динамики поперечных колебаний гибкого аксиального элемента спутника-гиростата

Выше были определены условия структурно-параметрической идентификации распределенной динамической системы, отвечающей схеме метода Фурье (представление решений распределенной системы в виде сумм стоячих волн), в частности для поперечных деформаций «длинной» аксиальной штанги-балки, жестко прикрепленной к спутнику-гиростату (рис. 1). Для этой цели служит программная среда «РЕДИМ». Программная среда «РЕДИМ» – это *живой организм*, она постоянно развивается: в функциональное наполнение добавляются новые модули, старые модифицируются; разумеется, каждое вносимое в тот или иной модуль изменение должно автоматически отразиться во всех существующих в данный момент копиях этого модуля – и тех, которые хранятся на внешних носителях, и тех, которые участвуют в сборке отдельных программ. В работе [15] был разработан интерактивный комплекс «МОДФОКБ» (моделирование динамики форм-колебаний балки), основанный на методе усечения числа гармоник-деформаций балки с жестко закрепленным концом. Графический интерфейс в программной среде «МОДФОКБ» выполняет функции сервисного характера [22], и основные задачи здесь состоят в следующем.

Прежде всего, необходимо организовать хранение функционального наполнения. Функциональное наполнение представляет собой набор отдельных программ, решающих конкретные задачи. Эти задачи объединены общей направленностью, или, как говорят, предметной областью. Дело в том, что программная среда «РЕДИМ» не является универсальной, она проблемно ориентирована, т. е. предназначена для решения определенного класса задач апостериорного математического моделирования динамических систем. Но хранить не значит только ограничиться записью информации на каких-либо носителях; в архиве должен быть порядок (по первому требованию указанный модуль должен быть включен в вычислительную работу). Поэтому второе назначение «МОДФОКБ» – обеспечить возможность сборки из отдельных модулей полной программы, спо-

собной решать задачу моделирования. Для этого интерфейс, создающий граф решения предметной задачи, должен общаться как с пакетом «РЕДИМ», так и с пользователем: давать заказы, воспроизводить ответную информацию и т. п. Этой цели служит язык заданий, т. е. средство диалога пользователя с пакетом, реализованное на языке Delphi. При этом пользователь разбивает решаемую предметную задачу на части, подбирает для решения каждого куска свой проблемно-ориентированный модуль, и затем «МОДФОКБ» начинает процесс соединения модулей в единый вычислительный комплекс; это упрощенная схема, но она отражает характерные этапы работы. Модульная структура «МОДФОКБ» выполнена с использованием среды MATLAB (пакет «*Control System Toolbox*») и обеспечивает решение следующих задач:

Модуль-1: *формирование «банка» стоячих демпфированных волн-гармоник, описывающих поперечные колебания гибкой штанги с защепленным концом*.

В Модуле-1 формирование собственных форм-колебаний w_k стоячей волны поперечного колебания штанги можно проводить по усмотрению пользователя, либо в виде сплайн-аппроксимации числовых массивов, задающих данные формы (см. ниже задачу (13)–(16) моделирования балки Тимошенко), либо (см. замечание 2 к моделированию балки Эйлера – Бернули) в аналитическом виде

$$x\mapsto w_k(x)=v_k\cdot(\cos(0{,}5k\pi l^{-1}x)-1),\ v_k\in R,\ x\in[0,\ l];$$

обоснование полноты системы $\{w_k\}_{k=1,\,2,\ldots}$ см. в [17, с. 393]). В такой постановке k-я стоячая волна γ_k демпфированного поперечного колебания имеет вид

$$(x,t)\mapsto\gamma_k(x,t)=w_k(x)\exp(-b_kt)\sin(\omega_kt+\varphi_k),\ (x,t)\in[0,\ l]\times T,\ (7)$$

($k = 1$ – основной тон, $k \neq 1$ – обертон) с моделью датчика, измеряющего в аксиальной точке $x_0\in(0,\ l]$ текущую амплитуду «прогиба» волны γ_k:

$$t\mapsto\gamma_k(x_0,t)=v_k\cdot(\cos(0{,}5k\pi l^{-1}x_0)-1)\exp(-b_kt)\sin(\omega_kt+\varphi_k),$$

$$v_k\in R,\ t\in T.$$

Функциональные характеристики k-й стоячей поперечной волны γ_k:

$T=[0,\ \tau]$ – интервал моделирования (по умолчанию τ=10 сек);

l – длина штанги (l=10 м, $x_0=0{,}7l$);

ω_k – собственная частота k-й формы колебаний $(0{,}5k\pi l^{-1})$;

φ_k – сдвиг фазы k-го обертона, $0\le\varphi_k\le\pi$ $(\varphi_k=0{,}5\pi)$;

v_k – коэффициент масштабирования амплитуды k-й волны $(v_k=k^{-2})$;

b_k – коэффициент затухания k-й гармоники $(b_k=0{,}1k^{0{,}3})$.

В Модуле-1 функционально предусмотрено:

1) имитационное моделирование демпфированного колебания изолированной (отдельной) k-й поперечной стоячей волны $(x,t)\mapsto\gamma_k(x,t)$ штанги;

2) сплайн-интерполяция вдоль линии профиля штанги собственной формы $x\mapsto w_k(x)$ для k-й гармоники осуществляется с шагом $\Delta x=0{,}02k^{-1}l$;

3) на временном интервале T анимация динамического процесса колебания каждой k-й стоячей волны проходит с шагом $\Delta t=0{,}01k^{-1}T$ сек).

Графическая часть Модуля-1 позволяет (рис. 2):

1) строить на отрезке $[0,\ l]$ форму распределенной амплитуды $x\mapsto w_k(x)$ (осуществляется методом кубической сплайновой аппроксимации);

2) строить анимированный на временном интервале T динамический процесс $(x,t)\mapsto\gamma_k(x,t)$

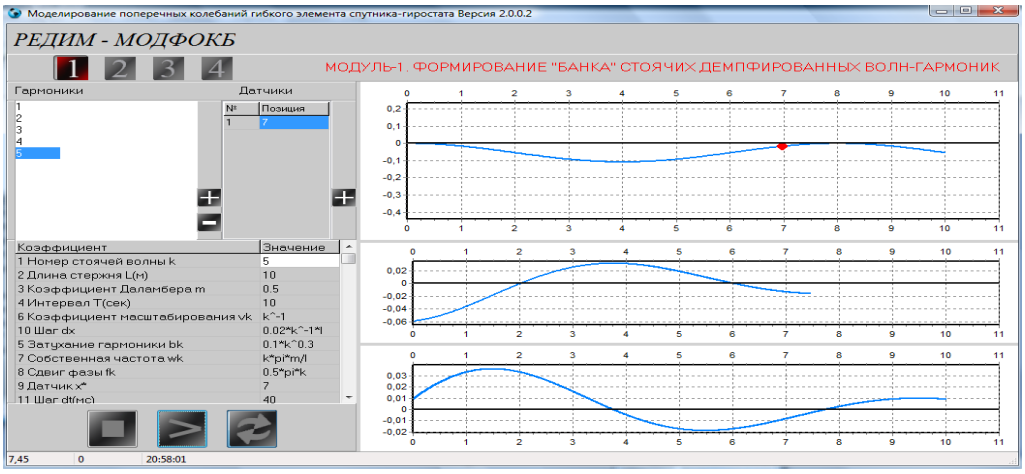


Рис. 2. Фрагмент экранной формы интерфейса Модуля-1 (вариант k=5)

колебаний k-ой стоячей волны в профиле штанги;

3) строить анимированный на T сигнал $t\mapsto\gamma_k(x_0,t)$ датчика и его производной $t\mapsto d\gamma_k(x_0,t)/dt=-b_k\gamma_k(x_0,t)+\omega_k w_k(x_0)e^{-bkt}\cos(\omega_k t+\varphi_k)$ в аксиальной точке $x_0\in(0,\ l]$.

З а м е ч а н и е 2. Использованное в Модуле-1 аналитическое представление собственных изгибных форм w_k можно назвать «упрощенная модель балки Эйлера – Бернули», поскольку задача (13)–(16) в постановке $r^2=q^2=0$ (см. ниже замечание 6) приводит к дифференциальному уравнению

$$d^4w_k(x)/dx^4-\lambda_k{}^2w_k(x)=0$$

с частным решением (для защепленной балки Эйлера-Бернули) вида:

$x\mapsto w_k(x)=v_k\cdot(\cos(\lambda_k{}^{0,5}x)-\mathrm{ch}(\lambda_k{}^{0,5}x)),\ x\in[0,\ l],\ k=1,2,...$

Модуль-2: *моделирование на базе принципа суперпозиции динамики кортежа поперечных форм-колебаний напряженно-деформированной штанги со свободным торцом* (сборка функционального пакета из N различных волн-гармоник).

В Модуле-2 функционально предусмотрено:

1) задав целое N, проводить фиксацию $\{\ldots,\ \ldots\}_N$ различных k-номеров волн-гармоник γ_k из Модуля-1 для сборки функционального пакета ξ_N ($\{1\text{-}4,6,7\}_N$);

2) для каждой гармоники из выбранного пакета ξ_N определять и обозначать графически серии точек для узлов $\{\ldots,\ \ldots\}_{k\text{-узлы}}$ и пучностей $\{\ldots,\ \ldots\}_{k\text{-пучности}}$;

3) задавать число p измерительных датчиков для точечной съемки информации об амплитуде моделируемого колебательного движения штанги (p = N);

4) выбирать на штанге точки с аксиальными координатами $\{x_1,\ \ldots,\ x_p\}\subset(0,\ l]$, $0<x_i\le l$, $i=1,\ldots,\ p$, расположения датчиков съемки информации (p=N; см. ниже утверждение 1), измеряющих текущий «суммарный прогиб» демпфированных волн-гармоник функционального пакета ξ_N ($\{\ldots,\ \ldots\}_{k\text{-пучности}}$).

Аналитическая модель функционального пакета ξ_N N-усеченного ряда числа гармоник свободных колебаний гибкой штанги в Модуле-2 имеет вид

$$(x,t)\mapsto\xi_N(x,t)=\Sigma_{1,\ldots,N}\gamma_k(x,t),\ (x,t)\in[0,\ l]\times T,\qquad(8)$$

при этом модель измерений датчиков $\xi_N(x,t)\big|_{x=xi}$, $i=1,\ldots,\ p$, представлена как

$$t\mapsto\xi_N(x_1,t)=\Sigma_{1,\ldots,N}\gamma_k(x_1,t),\ t\in T;$$

$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$

$$t\mapsto\xi_N(x_p,t)=\Sigma_{1,\ldots,N}\gamma_k(x_p,t),\ t\in T.$$

Графическая часть Модуля-2 позволяет:

1) строить (сплайновая интерполяция линии изгиба штанги $x\mapsto\xi_N(x,\iota)|_{\iota=t}$ в любой момент t проводится на равномерной сетке с шагом $\Delta x=0{,}02k_{max}{}^{-1}l$, при этом анимация на временном интервале T процесса колебания «динамического пакета гармоник» осуществляется с постоянным шагом Δt (Δt=0,01 с), анимированное на интервале T колебание штанги $(x,t)\mapsto\xi_N(x,t)$, представленное функциональным пакетом N-усеченного ряда числа гармоник (рис. 3);

2) строить анимированную на интервале T функцию $t\mapsto\xi_N(x_i,t)$, $x_i\in(0,\ l]$ сигнала i-го ($i=1,\ldots,p$) датчика и его производной $t\mapsto d\xi_N(x_i,t)/dt$ (рис. 3);

3) строить анимированную на временном интервале T функцию линейной свертки $t\mapsto(\Sigma_{1,\ldots,p}\ q_i\xi_N(x_i,t)+\Sigma_{1,\ldots,p}\ g_i d\xi_N(x_i,t)/dt)$, $q_i,\ g_i\in R$ от

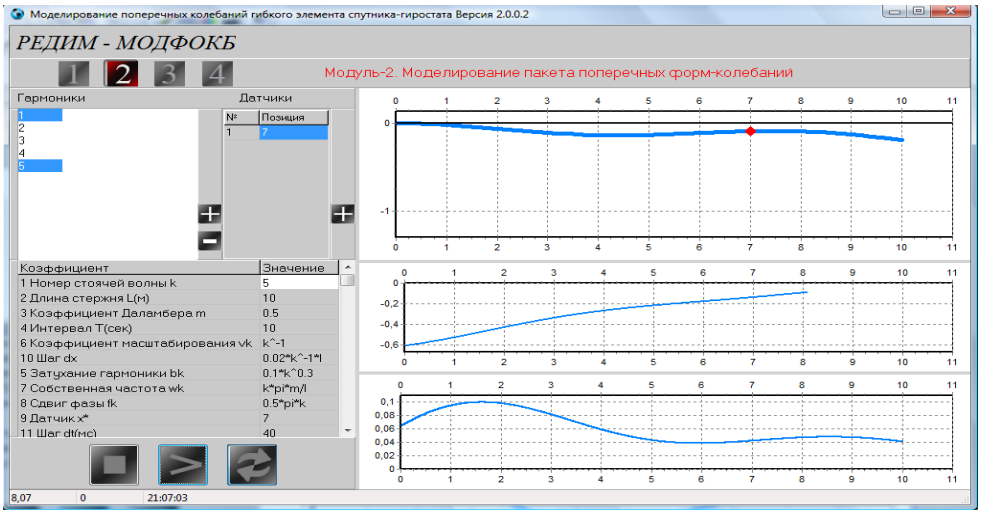


Рис. 3. Фрагмент экранной формы интерфейса Модуля-2 (вариант $\{1,5\}_{N=2}$)

сигналов датчиков поперечных колебаний и их производных.

Модуль-3: *диагностирование частот волн-гармоник поперечных деформаций гибкой штанги посредством апостериорной оценки спектральной плотности мощности сигналов датчиков величины ее прогиба* (преобразование Фурье автокорреляционных функций $t \mapsto \zeta_i(t)=\int_{\infty}^{\infty}\xi_N(x_i,\tau)\xi_N(x_i,\tau+t)d\tau$, $i=1,\ldots,p$).

В Модуле-3 функционально предусмотрено:

1) проводить спектральный анализ модели посредством преобразований Фурье автокорреляционных функций $t \mapsto \zeta_i(t)=\int_{\infty}^{\infty}\xi_N(x_i,\tau)\xi_N(x_i,\tau+t)d\tau$, $i=1,\ldots, p$, методами Томсона, Уэлча и периодограммы с помощью MATLAB-операторов **pmtm, pwelch**, **periodogram**;

2) выделять для сигналов $t \mapsto \xi_N(x_i,t)$, $x_i \in (0, l]$, $i=1,\ldots, p$, частоты их максимальной спектральной плотности с целью: оценки числа N активированных в штанге форм-колебаний, оценки значений собственных частот ω_k деформаций штанги, оценки коэффициента v_k масштабирования амплитуды k-й стоячей волны.

Графическая часть Модуля-3 позволяет:

1) выполнить MATLAB-процедурами **pmtm, pwelch, periodogram** оценку (понятие *оценки* (приближенного значения) весьма важно, т. к. на практике почти исключительно оперируем приближенными величинами; это происходит либо потому, что точные значения исходных данных неизвестны (измерение всегда производится неточно, с большей или меньшей погрешностью, в зависимости от точности измеряющего инструмента), либо потому (наш случай), что действия, которые следует выполнить над данными, были бы слишком сложны и кропотливы, если искать «точные значения» искомых величин; таким образом, в расчетах пользуются тем или иным приближением, в зависимости от того, какая точность нас устраивает) спектральной плотности $|S_i(\omega)|^2=\int_{\infty}^{\infty}\zeta_i(\tau)e^{-j\omega\tau}d\tau$ мощности (спектральная плотность сигнала $t \mapsto \xi_N(x_i,t)$ суть комплексная величина $S_i(\omega)=\int_{\infty}^{\infty}\xi_N(x_i,\tau)e^{-j\omega\tau}d\tau$, поэтому спектральную плотность *мощности* сигнала определяет преобразование Фурье его автокорреляционной функции) сигналов $t \mapsto \xi_N(x_i,t)$, $i=1, \ldots, p$ [38, с.74], строя их графики в логарифмической шкале (ремарка: данная операция эффективна при больших частотах ω_k (см. рис. 4), либо на малых частотах ω_k при невысоком ($\approx$0) коэффициенте затухания b_k);

2) делать оценку частот сигнальных функций [18] для алгоритма параметрической идентификации, реализованного в Модуле-4.

З а м е ч а н и е 3. В идеале программный комплекс должен быть оснащен инструментом, который автоматически решает задачу пункта 2, однако это перспективная цель, а пока пользователь на эмпирической базе, полученной средствами **pmtm, pwelch, periodogram**, сам должен заниматься данной оценкой.

Модуль-4: *структурно-параметрическая идентификация дифференциальных уравнений поперечных колебаний гибкой штанги с жестко закрепленным концом* (дифференциальная реализации сигналов датчиков $t \mapsto \xi_N(x_i,t)$, $i=1,\ldots,p$).

В Модуле-4 функционально предусмотрено:

1) определение количества всех активированных в Модуле-2 осцилляторов волн-гармоник

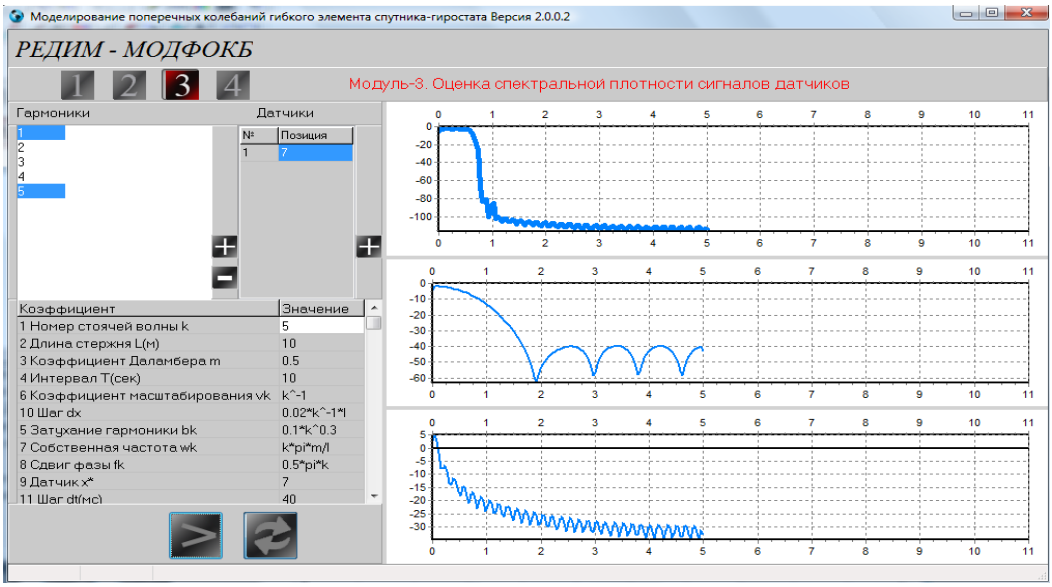


Рис. 4. Фрагмент экранной формы интерфейса Модуля-3 (вариант $\{1,5\}_{N=2}$)

пакета $(x,t)\mapsto\xi_N(x,t)$ на основе выбора числа и геометрии размещения датчиков измерений $t\mapsto\xi_N(x_i,t)$, $i=1,\ldots,p$ (см. ниже утверждение 1);

2) построение матрицы A дифференциальной модели, описывающей динамику системы – «*свободные колебания гибкой штанги* $(x,t)\mapsto\xi_N(x,t)$ & *сигналы измерительных датчиков* $t\mapsto\xi_N(x_i,t)$, $i=1,\ldots,N$» (в силу утверждения 1):

$$dx(t)/dt=A\mathrm{x}(t),\ t\in T,\ x(t)\in R^{2N},\qquad (9)$$
$$x(t):=\mathrm{col}(x_1(t),\ldots,x_{2N}(t)),$$

$$\begin{cases}\mathrm{x}_1(t)=\xi_N(x_1,t),\\ \mathrm{x}_2(t)=d\xi_N(x_1,t)/dt,\\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\ \mathrm{x}_{2N-1}(t)=\xi_N(x_N,t),\\ \mathrm{x}_{2N}(t)=d\xi_N(x_N,t)/dt\end{cases}$$

с привлечением алгоритма из [9] в построении линейной однородной системы дифференциальной реализации апостериорных данных $t\mapsto(\xi_N(x_i,t),d\xi_N(x_i,t)/dt)$, $i=1,\ldots,N$ (при полном измерении вектора состояния $\mathrm{col}(\mathrm{x}_1(t),\ldots,\mathrm{x}_{2N}(t))$);

3) обработка спектра оператора системы (9) на базе MATLAB-операторов: **esort** (сортировка комплексных собственных значений системы), **damp** (вычисление собственных частот и коэффициентов демпфирования для полюсов системы), **pzmap** (расположение полюсов и нулей);

4) приведение (оператор **canon**) матрицы A к канонической форме Фробениуса с вычислением матрицы C наблюдающего устройства $y(t)=C\mathrm{x}(t)$.

З а м е ч а н и е 4. Алгоритмическое решение задачи 1 Модуля-4 достигается на основе решения двух задач: определения числа N и выбора мест установки датчиков $t\mapsto\xi_N(x_i,t)$, $i=1,\ldots,N$ что формализует утверждение 1.

У т в е р ж д е н и е 1. *Для пакета волн-гармоник* $(x,t)\mapsto\xi_N(x,t)$ *в аксиальном отрезке* $[0,\ l]$ *существует набор из* N *точек* $\{x_1,\ldots,x_N\}\subset(0,\ l]$, *такой, что для измерительных датчиков* $t\mapsto\xi_N(x_i,t)$, $t\in T$, $i=1,\ldots,N$, *выполняется отношение:*

$$\Gamma_1(\xi_N(x_1,\cdot),\ \ldots,\ \xi_N(x_N,\cdot),$$
$$d\xi_N(x_1,\cdot)/dt,\ \ldots,\ d\xi_N(x_N,\cdot)/dt)\neq 0,\qquad (10)$$

при этом для любой точки $z\in(0,\ l]$ *и датчика* $t\mapsto\xi_N(z,t)$, $t\in T$ *имеет место*

$$\Gamma_1(\xi_N(x_1,\cdot),\ \ldots,\ \xi_N(x_N,\cdot),$$
$$d\xi_N(x_1,\cdot)/dt,\ \ldots,\ d\xi_N(x_N,\cdot)/dt,\ \xi_N(z,\cdot))=0.\qquad (11)$$

В данных условиях пакет ξ_N *имеет дифференциальную реализацию* (23).

Д о к а з а т е л ь с т в о. Доказательство проведем индукцией по числу N.

Базис индукции N=1. В силу (7) $\xi_1(x,t)=\gamma_k(x,t)=w_k(x)e^{-bkt}\sin(\omega_k t+\varphi_k)$, $x\in[0,\ l]$, $t\in T$. Пусть $x_1\in(0,\ l]$ – узловая точка волны γ_{k+1}, такая, что $t\mapsto\gamma_k(x_1,t)\neq 0$. Тогда

$$\xi_1(x_1,t)=ce^{-bkt}\sin(\omega_k t+\varphi_k),\ d\xi_1(x_1,t)/dt=$$
$$=-cb_k\omega_k e^{-bkt}\cos(\omega_k t+\varphi_k),\ c=w_k(x_1)\neq 0.$$

Прибегая к теореме 1 [14, с. 213], заключаем, что справедливы условия (10), (11) и, значит, для ξ_1 утверждение 1 осуществимо с $\{x_1\}$.

Шаг индукции от N–1 *к* N. В силу (8) $\xi_N(x,t)=\xi_{N-1}(x,t)+\xi_1(x,t)$, где $\xi_1(x,t)=\gamma_k(x,t)$ для некоторого k, при этом индекс k «не фигурирует» в пакете ξ_{N-1}. Далее, пусть $\{x_1,\ \ldots,\ x_{N-1}\}$ – набор узлов волны γ_k, для которых справедливо утверждение 1 по отношению к пакету ξ_{N-1}. Согласно индуктивному предположению (справедливость начала шага индукции согласно (10)) будет: $\Gamma_1(\xi_{N-1}(x_1,\cdot),\ \ldots,\ \xi_{N-1}(x_{N-1},\cdot),\ d\xi_{N-1}(x_1,\cdot)/dt,\ \ldots,\ d\xi_{N-1}(x_{N-1},\cdot)/dt)\neq 0$. Следовательно, имеет место:

$$\Gamma_1(\xi_N(x_1,\cdot),\ \ldots,\ \xi_N(x_{N-1},\cdot),\ d\xi_N(x_1,\cdot)/dt,\ \ldots,$$
$$d\xi_N(x_{N-1},\cdot)/dt)\neq 0,\qquad (12)$$

поскольку в противном случае найдутся вещественные числа r_i, $i=1,\ldots,2(N-1)$, из которых не все равны нулю, такие, что (ниже $0\in C^{\infty}(T,R)$) выполнимо:

$$0\neq r_1\xi_{N-1}(x_1,\cdot)+\ldots+r_{N-1}\xi_{N-1}(x_{N-1},\cdot)+$$
$$+r_N d\xi_{N-1}(x_1,\cdot)/dt+\ldots+r_{2(N-1)}d\xi_{N-1}(x_{N-1},\cdot)/dt=$$
$$=r_1\xi_1(x_1,\cdot)-\ldots.-r_{N-1}\xi_1(x_{N-1},\cdot)-r_N d\xi_1(x_1,\cdot)/dt-\ldots.$$
$$-r_{2(N-1)}d\xi_1(x_{N-1},\cdot)/dt\equiv$$
$$\equiv -r_1\gamma_k(x_1,\cdot)-.\ \ldots\ -r_{N-1}\gamma_k(x_{N-1},\cdot)-r_N d\gamma_k(x_1,\cdot)/dt-\ldots$$
$$-r_{2(N-1)}d\gamma_k(x_{N-1},\cdot)/dt.$$

Данные равенства приводят к противоречию в силу уравнений (7) и положения, что индекс k не присутствует в ξ_{N-1} (т. е. элементарные функции волны γ_k не входят в состав элементарных функций конструкции пакета ξ_{N-1}).

Далее, для стоячей волны ξ_1 через x_N обозначим ее неузловую точку, не принадлежащую $\{x_1,\ \ldots,\ x_{N-1}\}$. Покажем, что пара $(\xi_N,\{x_1,\ \ldots,\ x_N\})$ удовлетворяет утверждению 1. Будем рассуждать от противного. Пусть

$\Gamma_1(\xi_N(x_1,\cdot),\ \ldots,\ \xi_N(x_N,\cdot),\ d\xi_N(x_1,\cdot)/dt,\ \ldots,\ d\xi_N(x_N,\cdot)/dt)=0.$

Тогда приходим к очевидной цепочке (ниже $0 \in C^{\infty}(T,R)$) отношений:

$$r_1\xi_{N-1}(x_1,\cdot) +\ldots+ r_N\xi_{N-1}(x_N,\cdot) + r_{N+1}d\xi_{N-1}(x_1,\cdot)/dt +\ldots$$
$$+ r_{2N}d\xi_{N-1}(x_N,\cdot)/dt = r_1\xi_1(x_1,\cdot) -\ldots$$
$$- r_N\xi_1(x_N,\cdot)-r_{N+1}d\xi_1(x_1,\cdot)/dt -\ldots-r_{2N}d\xi_1(x_N,\cdot)/dt\equiv$$
$$\equiv -r_1\gamma_k(x_1,\cdot)-\ldots-r_N\gamma_k(x_N,\cdot)-r_{N+1}d\gamma_k(x_1,\cdot)/dt -\ldots$$
$$-r_{2N}d\gamma_k(x_N,\cdot)/dt\neq 0,$$

где не все r_i, $i=1,\ldots,2N$ нулевые. Вариант $r_N=0$, $r_{2N}=0$ исключаем согласно (12), случай $r_N\neq 0$, $r_{2N}=0$ противоречит соотношениям (7); вариант $r_N=0$, $r_{2N}\neq 0$ или $r_N\neq 0$, $r_{2N}\neq 0$ приводит к аналогичным рассуждениям. Наконец, вектор-функция

$$\operatorname{col}(\xi_N(x_1,\cdot), \ldots, \xi_N(x_N,\cdot), d\xi_N(x_1,\cdot)/dt, \ldots, d\xi_N(x_N,\cdot)/dt), \quad t\in T$$

имеет дифференциальную реализацию (9) в силу (6), (7), (10).

З а м е ч а н и е 5: *а)* условие (11) не является характеристическим по отношению к утверждению 1 (поэтому его не использовали в доказательстве), но в Модуле-4 оно имеет важную роль при определении числа N,

б) по существу свойство, сформулированное в утверждении 1, можно интерпретировать как структурный признак существования «квадратной» матрицы наблюдающего устройства $y(t)=C\mathrm{x}(t)$, и такой, что при этом матрица C суть *невырожденная* (в конечном счете, в основе оттого положения лежит так называемое *типическое свойство* [19, с. 52].

4. Смежные вопросы

В заключение отметим, что естественным развитием программно-алгоритмической среды «МОДФОКБ» может служить задача имитационного моделирования форм-колебаний *балки Тимошенко* (Ti-балки; т. е. уточнение в прогибе балки неперпендикулярной деформации плоского сечения поперечного сдвига с учетом инерции его поворота [20]) с жестко закрепленным концом и присоединенным на свободном конце балки твердым телом. При этом в данном расширении программной среды «МОДФОКБ» функционально можно предусмотреть [21–24]:

1) задание физических параметров Ti-балки (модули упругости и сдвига, плотность материала балки, момент инерции и площадь сечения балки) и физических характеристик прикрепленного твердого тела (масса, момент инерции, статический момент инерции в торцевых координатах балки);

2) решение операторно-спектральной задачи (расчет собственных частот колебаний механической системы «Ti-балка + твердое тело»);

3) построение собственных изгибных форм (численное интегрирование дифференциальных уравнений (27) с начально-краевыми условиями (14)–(16));

4) адаптация параметров пунктов 1) – 3) к представлению в Модуль-1.

Заметим, что позиции 2) и 3) определяют решение задачи о собственных изгибных колебаниях Ti-балки с одним жестко закрепленным концом и с присоединенным на другом конце этой балки абсолютно твердым телом; для данной задачи существует [25] регулярный способ вычисления параметров собственных форм Ti-балки, основанный на редукции к задаче интегрирования обыкновенного дифференциального уравнения вида

$$d^4w(x)/dx^4+(r^2+q^2)\lambda^2d^2w(x)/dx^2-$$
$$-\lambda^2(1-\lambda^2r^2q^2)w(x)=0, \qquad (13)$$

при следующих граничных условиях:

$$w(0)=0, \quad (q^2d^3w(x)/dx^3+(1+q^4\lambda^2)dw(x)/dx)_{x=0}=0, \qquad (14)$$
$$((1+q^2L\lambda^2)d^3w(x)/dx^3+((1+q^4\lambda^2)L+$$
$$+(r^2+q^2))\lambda^2dw(x)/dx+(1-\lambda^2r^2q^2)\lambda^2mw(x))_{x=l}=0, \qquad (15)$$
$$(q^2J\lambda^2d^3w(x)/dx^3-(1-\lambda^2r^2q^2)d^2w(x)/dx^2+$$
$$+(1+q^4\lambda^2)J\lambda^2\,dw(x)/dx+$$
$$+(1-\lambda^2r^2q^2)\lambda^2(L-q^2)w(x))_{x=l}=0; \qquad (16)$$

здесь L – статический момент инерции твердого тела относительно плоскости системы координат с началом в точке крепления тела к балке, J – момент инерции твердого тела, m – масса твердого тела, λ – безразмерная собственная частота колебаний системы «Ti-балка + твердое тело», r^2 – квадрат радиуса инерции балки (коэффициент, учитывающий инерцию поворота поперечного сечения балки), q^2 – коэффициент, учитывающий влияние деформации сдвига.

З а м е ч а н и е 6. Если в (14)–(16) положить $r^2=q^2=0$, то, как частный случай, получим задачу о собственных колебаниях балки Эйлера – Бернули с присоединенным твердым телом, если пренебречь только членами, учитывающими деформации сдвига (т. е. $q^2=0$), будем иметь балку Релея.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рубановский В. Н. Устойчивость установившихся движений сложных механических систем // Итоги науки и техники : общая механика. М. : ВИНИТИ, 1982. Т. 5. С. 62–134.

2. Гантмахер Ф. Р. Лекции по аналитической механике. М. : Физматгиз, 1960. 296 с.
3. Hablani H. B., Shrivastava S. K. Nontrivial Equilibrium and Lyapunov Stability of Flexible Damped Gravity Satellite as a Hybrid Dynamical System // AIAA Pap. 1978. № 53. P. 1–10.
4. Сергиенко И. В., Дейнека В. С. Идентификация параметров динамической задачи теории упругости тела с включением // Кибернетика и системный анализ. 2009. № 3. С. 75–97.
5. Сомов Е. И., Бутырин С. А. Полетная геометрическая идентификация и калибровка космического телескопа и системы звездных датчиков // Идентификация систем и задачи управления тр. VIII Междунар. конф. / ИПУ РАН. М. 2009. С. 1189–1201. (Труды SICPRO'09).
6. Лурье А. И. Аналитическая механика. М. : Физматгиз, 1961. 824 с.
7. Румянцев В. В. Некоторые задачи динамики сложных систем // Проблемы прикладной математики и механики. М., 1971. С. 179–188.
8. Владимиров В. С. Уравнения математической физики. М. : Наука, 1981. 512 с.
9. Русанов В. А., Шарпинский Д. Ю. К теории структурной идентификации нелинейных многомерных систем // Прикладная математика и механика. 2010. Т. 74, вып. 1. С. 119–132.
10. Калман Р., Фалб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем. М. : Мир, 1971. 400 с.
11. Механика больших космических конструкций / Баничук Н. В., Карпов И. И., Климов Д. М. [и др.]. М. : Факториал, 1997. 302 с.
12. Кузьмин П. А. Малые колебания и устойчивость движения. М. : Наука, 1973. 208 с.
13. Годунов С. К. Уравнения математической физики. М. : Наука, 1971. 416 с.
14. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. М. : Наука, 1988. 550 с.
15. Русанов В. А., Шарпинский Д. Ю., Козырев В. А., Удилов Т. В. Реализация динамической модели «РЕДИМ» // Свидетельство Федеральной службы по интеллектуальной собственности и патентам о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2008612596. 2008.
16. Полетыкин А. Г., Байбулатов А. А. Обзор зарубежного опыта разработки систем человеко-машинного интерфейса АСУ ТП // Идентификация систем и задачи управления : тр. III Междунар. конф. / ИПУ РАН. 2004. С. 719–734. – (Труды SICPRO'04).
17. Колмогоров А. Н., Фомин С. В. Элементы теории функций и функционального анализа. М. : Наука, 1976. 544 с.
18. Данеев А. В., Русанов В. А. Геометрические характеристики свойств существования конечномерных (A,B)-моделей в задачах структурно-параметрической идентификации // Автоматика и телемеханика. 1999. № 1. С. 3–8.
19. Уонэм М. Линейные многомерные системы управления : Геометрический подход. М. : Наука, 1980. 376 с.
20. Тимошенко С. П., Гудъер Дж. Теория упругости. М. : Наука, 1979. 560 с.
21. Парафесь С. Г. Метод идентификации тонкостенных конструкций // Идентификация систем и задачи управления : тр. III Междунар. конф. / ИПУ РАН. 2004. С. 326–335. (Труды SICPRO'04).
22. Калинин Е. Н. Идентификация модели упругой роторной системы // Идентификация систем и задачи управления : тр. III Междунар. конф. / ИПУ РАН. 2004. С. 653–659. (Труды SICPRO'04).
23. Моделирование распределённых систем реального времени / Галатенко В. А., Костюхин К. А., Шмырев Н. В., Малиновский А. С. // Параллельные вычисления и задачи управления : тр. IV Междунар. конф. / ИПУ РАН. 2008. С. 1349–1355. (Труды PACO'08).
24. Копысов О. Ю., Кулагин В. П. К проблеме идентификации параметров динамики вращения твердого тела // Идентификация систем и задачи управления : тр. VIII Междунар. конф. / ИПУ РАН. 2009. С. 492–500. (Труды SICPRO'09).
25. Ахтямов А. М., Урманчеев С. Ф. Определение параметров твердого тела, прикрепленного к одному из концов балки, по собственным частотам колебаний // Сибирский журн. индустриал. математики. 2008. Т. XI, № 4. С. 19–24.

УДК 62.752

Елисеев Сергей Викторович,
профессор, д. т. н., директор НИИ современных технологий, системного анализа и моделирования ИрГУПС, тел.: 598428
Ермошенко Юлия Владимировна,
к. т. н., доцент, декан заочного факультета ИрГУПС, тел.: 89246042928
Большаков Роман Сергеевич,
аспирант ИрГУПС, тел.: 89086614263

ОБОБЩЕННАЯ ТЕОРИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ГАСИТЕЛЯ КОЛЕБАНИЙ В СИСТЕМЕ С НЕСКОЛЬКИМИ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ

S.V. Eliseev, Yu.V. Ermoshenko, R.S. Bolshakov

GENERALIZED THEORY OF DYNAMICAL ABSORBE OF OSCILLATION IN SYSTEMS WITH SEVERAL DEGREES OF FREEDOM

Аннотация. *Рассматриваются возможности получения режимов динамического гашения при использовании сложных схем движения элементов системы. Предлагается метод построения математических моделей путем введения сочленений.*

Ключевые слова: *динамическое гашение колебаний, динамика сочлененных твердых тел, виброзащита и виброизоляция.*

Abstract. *Opportunities of creating dynamical absorbtion in complicated schemes of mutual relations of elements are considered. Method of mathematical model building by introducing couplings of rigid bodies is suggested.*

Keywords: *dynamical absorbtion of oscillation, dynamics of coupling of rigid bodies, vibroprotection and vibroisolation.*

Введение

Вопросам построения динамических колебаний посвящено достаточно большое число работ, в которых рассматриваются теоретические и прикладные аспекты взаимного подавления колебаний через взаимодействие элементов виброзащитной системы [1–3]. Несмотря на существенные недостатки методов динамического гашения колебаний (узкая область частот эффективной работы), они по-прежнему привлекают внимание специалистов простотой конструктивных реализаций. Многие аспекты упомянутой проблемы могли бы быть рассмотрены в более детализированных постановках задач исследования, что предполагает учет дополнительных степеней свободы и более сложную систему связей между элементами.

В предлагаемой статье рассматривается механическая колебательная система (рис. 1), состоящая их двух тел, одно из которых (m_1) является объектом защиты, а второе – массой m_2 – может выступать в качестве динамического гасителя. В общем виде система имеет четыре степени свободы и возбуждается вибрацией основания z_1 и z_2 в точках упругого опирания объекта.

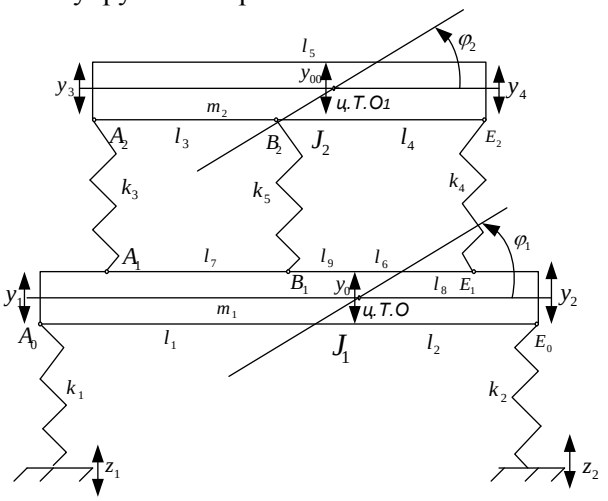


Рис. 1. Расчетная схема с четырьмя степенями свободы

Постановка задачи. Общие положения

На рис. 1 принят ряд обозначений: $A_0O = l_1$, $E_0O = l_2$, $A_2O_1 = l_3$, $E_2O_1 = l_4$; φ_1, φ_2 – соответственно углы поворота твердых тел относи-

тельно центров тяжести тел с массами m_1 и m_2; J_1 и J_2 – соответствующие моменты инерции твердых тел; $B_2O_1 = l_5$ – расстояние от точки O_1 до точки B_2, в которой закреплена пружина k_5; $B_1O = l_9$ – расстояние от точки O до точки B_1, в которой закреплена пружина k_5 на твердом теле m_1; $OA_1 = l_7$ – расстояние от т. O до т. A_1; $OE_1 = l_8$ – расстояние от т. O до т. E_1.

В рассматриваемом случае $y_1 \div y_4$ – система обобщенных координат, связанных с движением центра тяжести, и соответствующих углов поворота твердых тел. Предполагается, что силы сопротивления малы, так же как и перемещения.

Для дальнейших расчетов принимается ряд соотношений:

$$y_1 = y_0 - l_1\varphi_1,\ y_2 = y_0 + l_2\varphi_1,\ \varphi_1 = c(y_2 - y_1),$$

$$y_0 = ay_1 + by_2,\ a = \frac{l_2}{l_1 + l_2},\ b = \frac{l_1}{l_1 + l_2},$$

$$c = \frac{1}{l_1 + l_2},\ y_3 = y_{00} - l_3\varphi_2,\ y_4 = y_{00} + l_4\varphi_2, \quad (1)$$

$$\varphi_2 = c(y_4 - y_3),\ y_{00} = a_1 y_3 + b_1 y_4,\ a_1 = \frac{l_4}{l_3 + l_4},$$

$$b_1 = \frac{l_3}{l_3 + l_4},\ c_1 = \frac{1}{l_3 + l_4}.$$

В свою очередь:

$$y_{A1} = y_0 - l_7\varphi_1,\ y_{B1} = y_0 - l_9\varphi_1,\ y_{E1} = y_0 + l_8\varphi_1,$$

$$y_{A2} = y_{00} - l_3\varphi_2 = y_3,\ y_{B2} = y_{00} - l_5\varphi_2, \quad (2)$$

$$y_{E2} = y_0 + l_4\varphi_2 = y_4.$$

Выражения для кинетической и потенциальной энергий системы на рис. 1 имеют вид соответственно

$$T = \frac{1}{2}m_1\dot{y}_0^{\,2} + \frac{1}{2}J_1c^2\dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2}m_2\dot{y}_{00}^2 + \frac{1}{2}J_2c_1^2\dot{\varphi}_2^2, \quad (3)$$

$$\Pi = \frac{1}{2}k_1(y_1 - z_1)^2 + \frac{1}{2}k_2(y_2 - z_2)^2 + \frac{1}{2}k_3(y_3 - y_{A1})^2 + \frac{1}{2}k_4(y_4 - y_{E1})^2 + \frac{1}{2}k_5(y_{B2} - y_{B1})^2. \quad (4)$$

Для построения искомой математической модели надо принять, что

$$y_{B2} - y_{B1} = y_0', \quad (5)$$

то есть ввести специальную координату, характеризующую относительное смещение двух точек.

В последующем для получения сочленения положим $y_0' \to 0$. В принципе, можно полагать, что $y_0' = const$, тогда $k_5 \to \infty$. В этих соотношениях возможны некоторые вариации, однако без сомнения важным является то, что при $y_0' = 0$ в системе происходят некоторые структурные преобразования; система теряет одну степень свободы в своих движениях, изменяется также внешний вид системы в результате появления сочленения.

Кинетическая энергия для системы на рис. 1 при сделанных предположениях имеет вид суммы кинетических энергий составных частей в соответствии с теоремой Кенига [4]

$$T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4, \quad (6)$$

где

$$T_1 = \frac{1}{2}m_1\dot{y}_0^2 = \frac{1}{2}m_1(a\dot{y}_1 + b\dot{y}_2)^2 =$$

$$= \frac{1}{2}m_1\left(a^2\dot{y}_1^2 + 2ab\dot{y}_1\dot{y}_2 + b^2\dot{y}_2^2\right);\ T_2 = \frac{1}{2}J_1c^2\left(\dot{y}_2^2 - 2\dot{y}_1\dot{y}_2 + \dot{y}_1^2\right);$$

$$T_3 = \frac{1}{2}m_2\dot{y}_{00}^2 = \frac{1}{2}m_2\left(a_1^{\,2}\dot{y}_3^2 + 2a_1b_1\dot{y}_3\dot{y}_4 + b_1^{\,2}\dot{y}_4^2\right);$$

$$T_4 = \frac{1}{2}J_2c_1^{\,2}\left(\dot{y}_4^2 - 2\dot{y}_3\dot{y}_4 + \dot{y}_3^2\right).$$

Сделаем ряд вспомогательных выкладок:

$$\frac{\partial T_1}{\partial \dot{y}_1} = m_1a^2\dot{y}_1 + m_1ab\dot{y}_2,\ \frac{\partial T_2}{\partial \dot{y}_1} = J_1c^2\dot{y}_1 - J_1c^2\dot{y}_2,$$

$$\frac{\partial T_3}{\partial \dot{y}_1} = 0,\ \frac{\partial T_4}{\partial \dot{y}_1} = 0;\ \frac{\partial T_1}{\partial \dot{y}_2} = m_1b^2\dot{y}_2 + m_1ab\dot{y}_1,$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial \dot{y}_2} = J_1c^2\dot{y}_2 - J_1c^2\dot{y}_1,\ \frac{\partial T_3}{\partial \dot{y}_2} = 0,\ \frac{\partial T_4}{\partial \dot{y}_2} = 0; \quad (7)$$

$$\frac{\partial T_1}{\partial \dot{y}_3} = 0,\ \frac{\partial T_2}{\partial \dot{y}_3} = 0,\ \frac{\partial T_3}{\partial \dot{y}_3} = m_2a_1^2\dot{y}_3 + m_2a_1b_1\dot{y}_4,$$

$$\frac{\partial T_4}{\partial \dot{y}_3} = J_2c_1^2\dot{y}_3 - J_2c_1^2\dot{y}_4;\ \frac{\partial T_1}{\partial \dot{y}_4} = 0,\ \frac{\partial T_2}{\partial \dot{y}_4} = 0,$$

$$\frac{\partial T_3}{\partial \dot{y}_4} = m_2a_1b_1\dot{y}_3 + m_2b_1^2\dot{y}_4;\ \frac{\partial T_4}{\partial \dot{y}_4} = J_2c_1^2\dot{y}_4 - J_2c_1^2\dot{y}_3.$$

Найдем потенциальную энергию системы в виде

$$\Pi = \Pi_1 + \Pi_2 + \Pi_3 + \Pi_4 + \Pi_5, \quad (8)$$

где

$$\Pi_1 = \frac{1}{2}(k_1 - z_1)^2;\ \Pi_2 = \frac{1}{2}(k_2 - z_2)^2;$$

$$\Pi_3 = \frac{1}{2}k_3\left[y_3 - y_1a_3 - y_2b_3\right]^2,$$

$$(a_3 = a + l_7c;\ b_3 = b - l_7c).$$

В свою очередь, в развернутом виде:

$$\Pi_3 = \frac{1}{2}k_3\begin{bmatrix} y_3^2 - 2a_3y_1y_3 + y_1^2a_3^2 - \\ -2b_3y_2y_3 + 2a_3b_3y_1y_2 + y_2^2b_3^2 \end{bmatrix}.$$

Найдем

$$\Pi_4 = \frac{1}{2}k_4(y_4 - y_{E1})^2 = \frac{1}{2}k_4[y_4 - y_0 + l_8\varphi_1] =$$

$$= \frac{1}{2}k_4\left[y_4 - ay_1 - by_2 - l_8 \cdot c(y_2 - y_1)\right] =$$

$$= \frac{1}{2}k_4\left[y_4 - y_1(a + l_8c) - y_2(b + l_8c)\right]^2 =$$

$$= \frac{1}{2}k_4\left[y_4 - y_1a_4 - y_2b_4\right]^2, (a_4 = a - l_8c; b_4 = b + l_8c).$$

Запишем Π_4 с учетом обозначений:

$$\Pi_4 = \frac{1}{2}k_4\begin{bmatrix} y_4^2 - 2a_4y_1y_4 + y_1^2a_4^2 - \\ -2b_4y_2y_4 + 2a_4b_4y_1y_4 + y_2^2b_4^2 \end{bmatrix}.$$

В выражении (8) член Π_5 имеет вид:

$$\Pi_5 = \frac{1}{2}k_5(y_{B1} - y_{B2})^2 = \frac{1}{2}k_5[y_0 - l_9\varphi_1 - y_{00} - l_5\varphi_2] =$$

$$= \frac{1}{2}k_5\begin{bmatrix} ay_1 + by_2 - l_9c(y_2 - y_1) - a_1y_3 - b_1y_4 - \\ -l_5 \cdot c_1(y_4 - y_3) \end{bmatrix} =$$

$$= \frac{1}{2}k_5\begin{bmatrix} y_1(a + l_9c) + y_2(b - l_9c) - y_3(a_1 - l_5c_1) - \\ -y_4(b + l_5c_1) \end{bmatrix}^2 =$$

$$= \frac{1}{2}k_5\left[y_1a_5 + y_2b_5 - y_3a_6 - y_4b_6\right]^2,$$

где

$$a_5 = a + l_9c;\ b_5 = b - l_9c;\ a_6 = a_1 - l_5c_1;\ b_6 = b + l_5c_1,$$

тогда

$$\Pi_5 = \frac{1}{2}k_5\left[y_1^2a_5^2 + 2a_5b_5y_2y_1 + b_5^2y_2^2 + a_6^2y_3^2 + 2a_6b_6y_3y_4 + \right.$$

$$\left. + b_6^2y_4^2 - 2a_5a_6y_1y_3 - 2a_6b_5y_2y_3 - 2a_5b_6y_1y_4 - 2b_5b_6y_2y_4\right].$$

Для получения системы уравнений Лагранжа находим вспомогательные соотношения, представленные ниже в виде схемы на рис. 2.

Используя результаты вспомогательных выкладок, запишем уравнения движения системы в координатах $y_1 \div y_4$:

$$\begin{aligned} &\ddot{y}_1\left(m_1a^2 + J_1c^2\right) + y_1\left(k_1 + k_3a_3^2 + k_4a_4^2 + k_5a_5^2\right) + \\ &+\ddot{y}_2\left(m_1ab - J_1c^2\right) + y_2\left(k_3a_3b_3 + k_4a_4b_4 + k_5a_5b_5\right) + \\ &+\ddot{y}_3(0) + y_3\left(-k_3a_3 - k_5a_5a_6\right) + \ddot{y}_4(0) + \\ &+ y_4\left(-k_4a_4 + k_4a_4b_4 - k_5a_5b_6\right) = k_1z_1, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} &\ddot{y}_1\left(m_1ab - J_1c^2\right) + y_1\left(k_3b_3a_3 + k_4a_4b_4 + k_5a_5b_5\right) + \\ &+\ddot{y}_2\left(m_1b^2 + J_1c^2\right) + y_2\left(k_2 + k_3b^2{}_3 + k_5b_5^2\right) + \\ &+\ddot{y}_3(0) + y_3\left(-k_3b_3 - k_5a_6b_5\right) + \ddot{y}_4(0) + \\ &+ y_4\left(-k_4b_4 - k_5b_5b_6\right) = k_2z_2, \end{aligned} \quad (10)$$

$\frac{\partial\Pi_1}{\partial y_1} = k_1y_1 - k_1z_1$	$\frac{\partial\Pi_1}{\partial y_2} = 0$
$\frac{\partial\Pi_2}{\partial y_1} = 0$	$\frac{\partial\Pi_2}{\partial y_2} = k_2y_2 - k_2z_2$
$\frac{\partial\Pi_3}{\partial y_1} = -k_3a_3y_3 + k_3a_3b_3y_2 + k_3a_3^2y_1$	$\frac{\partial\Pi_3}{\partial y_2} = -k_3b_3y_3 + k_3a_3b_3y_1 + k_3b_3^2y_2$
$\frac{\partial\Pi_4}{\partial y_1} = k_4a_4^2y_1 - k_4a_4y_4 + k_4a_4b_4y_2$	$\frac{\partial\Pi_4}{\partial y_2} = -k_4b_4y_4 + k_4a_4b_4y_1 + k_4b_4{}^2y_2$
$\frac{\partial\Pi_5}{\partial y_1} = k_5a_5^2y_1 + k_5a_5b_5y_2 - k_5a_5a_6y_3 - k_5a_5b_6y_4$	$\frac{\partial\Pi_5}{\partial y_2} = k_5a_5b_5y_1 + k_5b_5{}^2y_2 - k_5a_6b_5y_3 - k_5b_5b_6y_4$
$\frac{\partial\Pi_1}{\partial y_3} = 0$	$\frac{\partial\Pi_1}{\partial y_4} = 0$
$\frac{\partial\Pi_2}{\partial y_3} = 0$	$\frac{\partial\Pi_2}{\partial y_4} = 0$
$\frac{\partial\Pi_3}{\partial y_3} = k_3y_3 - k_3a_3y_1 - k_3b_3y_2$	$\frac{\partial\Pi_3}{\partial y_4} = 0$
$\frac{\partial\Pi_4}{\partial y_3} = 0$	$\frac{\partial\Pi_4}{\partial y_4} = k_4y_4 - k_4a_4y_1 - k_4b_4y_2 + k_4a_4b_4y_1$
$\frac{\partial\Pi_5}{\partial y_3} = k_5a_6^2y_3 + k_5a_6b_6y_4 - k_5a_5a_6y_1 - k_5a_6b_5y_2$	$\frac{\partial\Pi_5}{\partial y_4} = k_5b_6a_6y_3 + k_5b_6^2y_4 - k_5a_5b_6y_1 - k_5b_5b_6y_2$

Рис. 2. Схема расчета вспомогательных соотношений

$$\ddot{y}_1(0)+y_1\left(-k_3a_3-k_5a_5a_6\right)+\ddot{y}_2(0)+$$
$$+y_2\left(-k_3b_3-k_5a_6b_5\right)+\ddot{y}_3\left(m_2a_1^2+J_2c_1^2\right)+$$
$$+y_3\left(k_3+k_5a_6^2\right)+\ddot{y}_4\left(m_2a_1b_1-I_2c_1^2\right)+ \quad (11)$$
$$+y_4\left(k_5a_5b_6\right)=0.$$

$$\ddot{y}_1(0)+y_1\left(-k_4a_4+k_4a_4b_4-k_5a_5b_6\right)+\ddot{y}_2(0)+$$
$$+y_2\left(-k_4b_4-k_5b_5b_6\right)+\ddot{y}_3\left(m_2a_1b_1-J_2c_1^2\right)+ \quad (12)$$
$$+y_3\left(k_5a_6b_6\right)+\ddot{y}_4\left(m_2b_1^2+J_1c_1^{\,2}\right)+y_4\left(k_4+k_5b_6^2\right)=0.$$

Основные данные о системе уравнений приведены в табл. 1.

Рассматриваемая система является механической колебательной системой с четырьмя степенями свободы традиционного типа. Соответствующие передаточные функции могут быть определены по правилам Крамера [5].

Переход к системе с тремя степенями свободы

В отношении движений по координатам y_1 и y_2, если принять $z_1=z_2=z$, могут быть реализованы в общем случае три режима динамического гашения. Формирование в системе сочленений между телами m_1 и m_2 требует использования некоторых приемов. Для того, чтобы получить сочленение и ввести таким образом Г-образный гаситель, необходимо ввести ряд соотношений:

$y_0'=y_{B_2}-y_{B_1}$, тогда $y_0'=y_{00}-l_5\varphi_2-y_0+l_9\varphi_1$,

$$y_0'=a_1y_3+b_1y_4-l_5c_1(y_4-y_3)-(a\dot{y}_1+by_2)+l_7c(y_2-y_1).$$
$$y_0'=y_1(-a-l_9c)+y_2(l_9c-b)+y_3(a_1+l_5c_1)+y_4(b_1-l_5c_1). \quad (13)$$
$$y_0'=-y_1(a+l_9c)+y_2(l_9c-b)+y_3(a_1+l_5c_1)+y_4(b_1-l_5c_1).$$

$$y_4=\frac{1}{l_5c_1-b_1}\left\{-y_1(a+l_9c)+y_2(l_9c-b)+y_3(a_1+l_5c_1)-y_0'\right\}.$$

Используем также соотношения

$$r_1=\frac{1}{l_5c_1-b_1},\ r_2=a+l_9c,\ r_3=l_9c-b,\ \ r_4=a_1+l_5c_1 \quad (14)$$

$$y_4=-y_1r_1r_2+y_2r_1r_3+y_3r_1r_4-y_0'r_1.$$

Преобразуем члены выражения (6) для кинетической энергии к виду

$$T_1=\frac{1}{2}m_1\dot{y}_0^2=\frac{1}{2}m_1\left(a^2\dot{y}_1^2+2ab\dot{y}_1\dot{y}_2+b^2\dot{y}_2^2\right); \quad (15)$$

$$T_2=\frac{1}{2}J_1c^2\left(\dot{y}_2^2-2\dot{y}_1\dot{y}_2+\dot{y}_1^2\right),$$

$$T_3=\frac{1}{2}m_2\left\{\begin{array}{l}a_1^{\,2}\dot{y}_3^2+2a_1b_1\dot{y}_3\left(-r_1r_2\dot{y}_1+r_1r_3\dot{y}_2+r_1r_4\dot{y}_3-r_1\dot{y}_0'\right)+\\ +b_1^2\left[\begin{array}{l}\dot{y}_1^2(r_1r_2)^2-2\dot{y}_1\dot{y}_2r_1^2r_2r_3+\dot{y}_2^2(r_1r_3)^2+\\ +\dot{y}_3^2(r_1r_4)^2-2\dot{y}_3\dot{y}_0'r_1^2r_4+(\dot{y}_0')^2r_1^2+\\ +2(r_1r_3\dot{y}_2-r_1r_2\dot{y}_1)(\dot{y}_3r_1r_4-r_1\dot{y}_0')\end{array}\right]\end{array}\right\},$$

Таблица 1

Коэффициенты уравнений в координатах y_1, y_2, y_3, y_4

a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}
$(m_1a^2+J_1c^2)p^2+k_1+$ $+k_3a_3^2+k_4a_4^2+k_5a_5^2$	$(m_1ab-J_1c^2)p^2+k_3a_3b_3+$ $+k_4a_4b_4+k_5a_5b_5$	$-k_3a_3-k_5a_5a_6$	$-k_4a_4-k_5a_5b_6+k_4a_4b_4$
a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{24}
$(m_1ab-J_1c^2)p^2+k_3b_3a_3+$ $+k_4a_4b_4+k_5a_5b_5$	$(m_1b^2+J_1c^2)p^2+k_2+$ $+k_3b_3^2+k_5b_5^2$	$-k_3b_3-k_5a_6b_5$	$-k_4b_4-k_5b_5b_6$
a_{31}	a_{32}	a_{33}	a_{34}
$-k_3a_3-k_5a_5a_6$	$-k_3b_3-k_5a_6b_5$	$(m_2a_1^2+J_2c_1^2)p^2+k_3+$ $+k_5a_6^2$	$\left(m_2a_1b_1-J_2c_1^2\right)p^2+$ $+k_5a_6b_6$
a_{41}	a_{42}	a_{43}	a_{44}
$-k_4a_4-k_4a_4b_4+k_5a_5b_4$	$-k_4b_4-k_5b_5b_6$	$(m_2a_1b_1-J_2c_1^2)p^2+$ $+k_5a_6b_6$	$\left(m_2b_1^2+J_2c_1^2\right)p^2+$ $+k_4+k_5b_6^2$
Q_1	Q_2	Q_3	Q_4
k_1z_1	k_2z_2	0	0

$$T_4 = \frac{1}{2} J_2 c_1^2 \dot{y}_3^2 - 2\dot{y}_3(-r_1 r_2 \dot{y}_1 + \dot{y}_2 r_1 r_3 + \\ + \dot{y}_3 r_1 r_4 - r_1 \dot{y}_0') + \begin{bmatrix} \dot{y}_1^2 (r_1 r_2^2) - 2\dot{y}_1 \dot{y}_2 r_1^2 r_2 r_3 + \\ + \dot{y}_2^2 (r_1 r_3)^2 + \dot{y}_3^2 (r_1 r_4)^2 - \\ -2\dot{y}_3 \dot{y}_0' r_1^2 r_4 + (\dot{y}_0')^2 r_1^2 + \\ +2(r_1 r_3 \dot{y}_2 - \dot{y}_1 r_1 r_2)(\dot{y}_3 r_1 r_4 - r_1 \dot{y}_0'). \end{bmatrix} \quad (16)$$

Аналогичным образом, используя соотношения для координат y_4 и y_0', получим выражение для потенциальной энергии системы в координатах y_1, y_2, y_3 при $y_0' \to 0$.

Приведем результаты промежуточных выкладок:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial y_1} = k_1' y_1 - k_1' z_1 + k_3 a_3^2 y_1 - k_3 a_3 y_3 + \\ + k_3 a_3 b_3 y_2 + k_4 y_1 (r_1 r_2^2) + k_4 r_1^2 r_2 r_3 y_2 - \\ - k_4 r_1^2 r_2 r_4 y_3 + k_4 y_1 r_1 r_2 a_4 - k_4 r_1 r_3 a_4 y_2 - \\ - k_4 r_1 r_4 a_4 y_3 - k_4 a_4 b_4 r_1 r_2 y_1 + \\ + k_5 a_4 b_4 r_1 r_3 y_2 + k_4 a_4 b_4 r_1 r_4 y_3 + \\ + k_4 a_4^2 y_1 + k_5 a^2{}_5 y_1 + k_5 a_5 b_5 y_2 - \\ - k_5 a_6 b_6 r_1 r_2 y_3 + k_5 b_6^2 \left[y_1 (r_1 r_2)^2 - r_1^2 r_2 r_3 y_2 - r_1^2 r_2 r_4 y_3 \right] - \\ - k_5 a_6 a_5 y_3 + k_5 a_5 b_6 y_1 r_1 r_2 + k_5 a_5 b_6 r_1 r_3 y_2 - k_5 b_5 b_6 r_1 r_2 y_2; \quad (17)$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial y_2} = k_2 y_2 - k_2 z_2 - k_3 b_3 y_3 + k_3 a_3 b_3 y_1 + k_3 b^2{}_3 y_2 + \\ + k_4 y_2 (r_1 r_3)^2 - k_4 y_1 r_1^2 r_2 r_3 + k_4 r_1^2 r_3 r_4 y_3 - k_4 y_1 r_1 r_3 a_4 + \\ + k_4 b_4 r_1 r_2 y_1 - k_4 r_1 r_3 b_4 y_2 - k_4 b_4 r_1 r_4 y_3 + k_4 a_4 b_4 r_1 r_3 y_1 + \\ + k_4 b^2{}_4 y_2 + k_5 a_5 b_5 y_1 + k_5 a_6 b_6 r_1 r_3 y_3 + \\ + k_5 b_5 y_2 + k_5 b^2{}_6 y_2 (r_1 r_3)^2 - \\ - k_5 b_6^2 r_1^2 r_3 r_2 y_1 + k_5 b^2{}_6 r_1^2 r_3 a_4 y_3 - \\ - k_5 a_6 b_5 y_3 + k_5 a_5 b_6 r_1 r_3 y_1 - k_5 b_5 b_6 r_1 r_2 y_1 - \\ - k_5 b_5 b_6 r_1 r_3 y_2 - k_5 b_1 b_6 r_1 r_4 y_3; \quad (18)$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial y_3} = k_3 y_3 - k_3 a_3 y_1 - k_3 b_3 y_2 + k_4 (r_1 r_4)^2 y_3 - \\ - k_4 r^2{}_1 r_2\ r_4 y_1 - k_4 r_1^2 r_3 r_4 y_2 - k_4 a_4 r_1\ r_4 y_1 + \\ + k_4 a_4 b_4 r_1 r_4 y_1 + k_5 a_6^2 y_3 + k_5 a_6 b_6 r_1 r_4 y_3 + \\ + k_5 a_6 b_6 r_1 r_2 y_1 + k_5 a_6 b_6 r_1 r_3 y_2 + \\ + k_5 b_6^2 (r_1 r_4)^2 y_3 + k_5 b_6^2 r_1 r_3\ y_2 - \\ - k_5 b_6^2 r_1 r_2 y_1 - k_5 a_5 a_6 y_1 - k_5 a_6 b_5 y_2 + \\ + k_5 a_5 b_6 y_1 r_1 r_4 + k_5 b_5 b_6 r_2 r_3 y_2. \quad (19)$$

Используя выражения (16–19), запишем уравнения движения в форме Лагранжа с учетом сочленения (при $y_0' = 0$):

$$\ddot{y}_1 (m_1 a^2 + I c_1^2 + m_2 b_1^2 (r_1 r_2)^2 + I_2 c_1^2 (r_1 r_2)^2) + \\ + y_1 (k_1 + k_3 a_3^2 + k_4 (r_1 r_2)^2 + k_4 r_1 r_2 a_4 - \\ - k_4 a_4 b_4 r_1 r_2 + k_4 a_4^2 + k_5 a_5^2 + k_5 b_6^2 (r_1 r_2)^2 + \\ + k_5 a_5 b_6 r_1 r_2) + \ddot{y}_2 (m_1 ab - I_1 c^2 - \\ - m_2 b_1^2 r_1^2 r_2 r_3 - I_2 c_1^2 r_1^2 r_2 r_3) + y_2 (k_3 a_3 b_3 + \\ + k_4 r_1^2 r_2 r_3 - k_4 a_4 r_1 r_3 + k_4 b_4 r_1 r_3 + k_4 a_4 b_4 r_1 r_3 + \\ + k_5 a_5 b_5 - k_5 b_6^2 r_1^2 r_2 r_3 + k_5 b_5 b_6 r_1 r_3) + \\ + \ddot{y}_3 (-m_2 a_1 b_1 r_1 r_2 - m_2 b_1^2 r_1^2 r_2 r_4 + I_2 c_1^2 r_1 r_2 - \\ - I_2 c_1^2 r_1^2 r_2 r_4) + y_3 (-k_3 a_3 - k_4 r_1^2 r_2 r_4 - k_4 a_4 r_1 r_4 + \\ + k_4 a_4 r_1 r_4 b_4 - k_5 a_5 b_6 r_1 r_2 - k_5 a_5 b_6 - k_5 b_6^2 r_1^2 r_3 r_4 + \\ + k_5 a_5 b_6 r_1 r_4 = k_1 z_1; \quad (20)$$

$$\ddot{y}_1 \left(m_1 ab - J_1 c^2 - m_2 b_1^2 r_1^2 r_2 r_3 - I_2 c_1^2 r_1^2 r_2 r_3 \right) + \\ + y_1 \begin{pmatrix} k_3 b_3 a_3 - k_4 r_1^2 r_2 r_3 - k_4 a_4 r_1 r_3 + k_4 b_4 r_1 r_2 + \\ + k_4 a_4 b_4 r_1 r_3 + k_5 a_5 b_5 + k_5 b_6^2 r_1^2 r_3 r_2 + \\ + k_5 a_5 b_5 r_1 r_3 + k_5 b_5 b_6 r_1 r_2 \end{pmatrix} + \\ + \ddot{y}_2 \left(m_1 b^2 + J_1 c^2 + m_2 b_1^2 (r_1 r_3)^2 + I_2 c_1^2 (r_1 r_3)^2 \right) + \\ + y_2 \begin{pmatrix} k_2 + k_3 b^2{}_3 + k_4 (r_1 r_3)^2 - k_4 b_4 r_1 r_3 + k_4 b_4^2 + \\ + k_5 b_5^2 + k_5 b_6^2 (r_1 r_3)^2 - k_5 b_5 b_6 r_1 r_3 \end{pmatrix} + \\ + \ddot{y}_3 \left(m_2 a_1 b_1 r_1 r_3 + m_2 b_1^2 r_1^2 r_3 r_4 - I_2 c_1^2 r_1 r_3 + I_2 c_1 r_1^2 r_3 r_4 \right) + \\ + y_3 \begin{pmatrix} -k_3 b_3 + k_4 r_1^2 r_3 r_4 - k_4 b_4 r_1 r_4 + k_5 a_6 b_6 r_1 r_3 + \\ + k_5 b_6^2 r_1^2 r_3 r_4 - k_5 a_6 b_5 - k_5 b_5 b_6 r_1 r_4 \end{pmatrix} = k_2 z_2; \quad (21)$$

$$\ddot{y}_1 (-m_2 a_1 b_1 r_1 r_2 - m_2 b_1^2 r_1^2 r_2 r_4 + I_2 c_1^2 r_1 r_2 - I_2 c_1^2 r_1^2 r_2 r_4) + \\ + y_1 (-k_3 a_3 - k_4 r_1^2 r_2 r_4 - k_4 a_4 r_1 r_4 + k_4 a_4 b_4 r_1 r_4 + \\ + k_5 a_6 b_6 r_1 r_2 - k_5 b_6^2 r_3 r_4 - k_5 a_5 a_6 + k_5 b_6 a_5 r_1 r_4) + \\ + \ddot{y}_2 (m_2 a_1 b_1 r_1 r_3 + I_2 c_1^2 r_1 r_3 + I_2 c^2{}_1 r_1^2 r_3 r_4) + \\ + y_2 (-k_3 b_3 + k_4 r_1^2 r_3 r_4 + k_5 a_6 b_6 r_1 r_3 + \\ + k_5 b_6^2 r_2 r_4 - k_5 a_6 b_5 - k_5 b_5 b_6 r_1\ r_4) + \\ + \ddot{y}_3 (m_2 a_1^2 + m_2 a_1 b_1 r_1 r_4 + m_2 b_1^2 (r_1 r_4)^2 + \\ + I_2 c_1^2 + I_2 c_1^2 r_1 r_4 + I_2 c_1^2 (r_1 r_4)^2) + \\ + y_3 (k_3 + k_4 (r_1 r_4)^2 + k_5 a_6^2 + \\ + k_5 a_6 b_6 r_1 r_4 + k_5 b_6^2 (r_1 r_4)^2) = 0. \quad (22)$$

Коэффициенты уравнений движения в координатах y_1, y_2, y_3, но с учетом сочленения в точке B, превращающего тело m_2 в динамический гаситель Г-образного вида, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты уравнений (20)–(22) в системе координат y_1, y_2, y_3

a_{11}	a_{12}	a_{13}
$\left[\begin{matrix} m_1a^2 + Ic_1^2 + \\ +m_2b_1^2(r_1r_2)^2 + \\ +I_2c_1(r_1r_2)^2 \end{matrix}\right] p^2 + k_1 + k_3a_3^2 +$ $+k_4(r_1r_2)^2 + k_4r_1r_2a_4 - k_4a_4b_4r_1r_2 +$ $+k_4a_4^2 + k_5a_5^2 + k_5b_6^2(r_1r_2)^2 + k_5a_5b_6r_1r_2)$	$\left[\begin{matrix} m_1ab - J_1c^2 - \\ -m_2b_1^2r_1^2r_2r_3 - \\ -I_2c_1^2r_1^2r_2r_3 \end{matrix}\right] p^2 + k_3b_3a_3 + k_4r_1^2r_2r_3 -$ $-k_4a_4r_1r_3 + k_4a_4b_4r_1r_3 + k_5a_5b_5 -$ $\_k_5b_6^2r_1^2r_3r_2 + k_5b_5b_6r_1r_3 + k_4b_4r_1r_2 -$ $-k_5b_5b_6r_1r_3$	$\left[\begin{matrix} -m_2a_1b_1r_1r_2 - m_2b_1^2r_1^2r_2r_4 - \\ -I_2c_1^2r_1r_2 - I_2c_1^2r_1^2r_2r_4 \end{matrix}\right] p^2 -$ $-k_3a_3 - k_4r_1^2r_2r_4 - k_4a_4r_1r_4 +$ $+k_4a_4b_4r_1r_4 - k_5a_5b_6r_1r_2 -$ $-k_5b_6^2r_1^2r_3r_4 - k_5a_5a_6$
a_{21}	a_{22}	a_{23}
$\left[\begin{matrix} m_1ab - J_1c^2 - \\ -m_2b_1^2r_1^2r_2r_3 - \\ -I_2c_1^2r_1^2r_2r_3 \end{matrix}\right] p^2 + k_3b_3a_3 + k_4r_1^2r_2r_3 -$ $-k_4a_4r_1r_3 + k_5a_5b_5 + k_4b_4r_1r_2 + k_4a_4b_4r_1r_3 -$ $-k_5b_6^2r_1^2r_3r_2 + k_4b_4r_1r_2 + k_5a_5r_1r_3 - k_5b_5b_6r_1r_2$	$\left[\begin{matrix} m_1b^2 + Ic_1^2 + \\ +m_2b_1^2(r_1r_3)^2 + \\ +I_2c^2{}_1(r_1r_3)^2 \end{matrix}\right] p^2 + k_2 +$ $+k_3b_3^2 + k_4(r_1r_3)^2 - k_4r_1r_3b_4 + k_4b_4^2 +$ $+k_5b_5^2 + k_5b_6^2(r_1r_3)^2 + k_5b_5b_6r_1r_3$	$\left[\begin{matrix} m_2a_1b_1r_1r_3 + m_2b_1^2r_1^2r_3r_4 - \\ -I_2c_1^2r_1r_3 + I_2c_1^2r_1^2r_3r_4 \end{matrix}\right] p^2 -$ $-k_3b_3 + k_4r_1^2r_3r_4 - k_4b_4r_1r_4 +$ $+k_5a_6b_6r_1r_3 + k_5b^2{}_6r^2{}_1r_3r_4 -$ $-k_5a_6b_5 - k_5b_5b_6r_1r_4$
a_{31}	a_{32}	a_{33}
$\left[\begin{matrix} -m_2a_1b_1r_1r_2 - m_2b_1^2r_1^2r_2r_4 - \\ -I_2c_1^2r_1r_2 - I_2c_1^2r_1^2r_2r_4 \end{matrix}\right] p^2 -$ $-k_3a_3 - k_4r_1^2r_2r_4 - k_4a_4r_1r_4 +$ $+k_4a_4b_4r_1r_4 - k_5a_6b_6r_1r_2 -$ $-k_5b_6^2r_1^2r_2^2r_4 - k_5a_5a_6$	$\left[m_2a_1b_1r_1r_3 + m_2b_1^2r_1^2r_3r_4 - I_2c_1^2r_1r_3 + I_2c_1^2r_1^2r_3r_4\right] p^2 -$ $-k_3b_3 + k_4r_1^2r_3r_4 + k_5a_6b_6r_1r_3 +$ $+k_5b_6^2r_1^2r_3r_4 - k_5a_6b_5 - k_5b_5b_6r_1r_4 -$ $-k_4b_4r_1r_4$	$\left[\begin{matrix} m_2a_1^2 + m_2a_1b_1r_1r_4 + \\ +m_2b_1^2(r_1r_4)^2 + \\ -I_2c_1^2 + I_2c_1^2r_1r_4 + \\ +I_2c_1^2(r_1r_4)^2 \end{matrix}\right] p^2 +$ $+k_3 + k_4(r_1r_4)^2 + k_5a_6b_6r_1r_4 +$ $+k_5b^2{}_6(r_1r_4)^2$
Q_1	Q_2	Q_3
k_1z_1	k_2z_2	0

Детализация представлений о динамических свойствах

Анализ коэффициентов в таблице 2 позволяет получить передаточные функции системы, используя правила Крамера [5]. Примем, что $z_1 = z_2 = z$, тогда

$$W_1(p) = \frac{\overline{y}_1}{\overline{z}} = \frac{k_1(a_{22}a_{33} - a_{23})^2 + k_2(a_{13}a_{23} - a_{12}a_{33})}{A}, \quad (23)$$

$$W_2(p) = \frac{\overline{y}_2}{\overline{z}} = \frac{k_1(-a_{12}a_{33} + a_{23}a_{31}) + k_2(-a^2{}_{13} + a_{11}a_{33})}{A}, \quad (24)$$

где

$A = a_{11}a_{22}a_{33} - a_{11}a_{32}^2 + a_{13}a_{21}a_{32} - a_{33}a_{21}^2 + a_{12}a_{23}a_{31} - a_{22}a_{31}^2$

или

$$a_{11}(a_{22}a_{33} - a_{23}^2) - a_{21}(a_{12}a_{33} - a_{13}a_{32}) + a_{31}(a_{12}a_{23} - a_{13}a_{22}). \quad (25)$$

Используя (23) и (24), можно найти частоты динамического гашения по координатам y_1 и y_2, а также частоты возникновения развязок или «обнуления» перекрестных связей между парциальными системами. Преобразуем таблицу 2, вводя ряд обозначений. Пусть

$$n_1 = m_1a^2 + Ic^2 + m_2b_1^2(r_1r_2)^2 + I_2c^2{}_1(r_1r_2)^2,$$

$$n_{10} = k_1 + k_3a^2 + k_4(r_1r_2)^2 + k_4a_4r_1r_2 - k_4a_4b_4r_1r_2 + +k_4a_4^2 + k_5a_5^2 + k_5b_6^2(r_1r_2)^2 + k_5a_5b_6r_1r_2),$$

$$n_2 = m_1ab - J_1c^2 - m_2b_1^2r_1^2r_2r_3 - I_2c_1^2r_1^2r_2r_3,$$

$$n_{20} = k_3a_3b_3 + k_4r_1^2r_2r_3 - k_4a_4r_1r_3 + k_4a_4b_4r_1r_3 + +k_5a_5b_5 + k_4b_4r_1r_2 - k_5b_6^2r_1^2r_2r_3 + k_5b_5b_6r_1r_3,$$

$$n_3 = -m_2a_1b_1r_1r_2 - m_2b_1^2r_1^2r_2r_4 - I_2c_1^2r_1r_2 - I_2c_1^2r_1^2r_2r_4,$$

$$n_{30} = -k_3a_3 - k_4r_1^2r_2r_4 - k_4a_4r_1r_4 + +k_4a_4b_4r_1r_4 - k_5a_5b_6r_1r_2 - k_5b_6^2r_1^2r_3r_4 - -k_5a_5b_5 + k_5b_6a_5r_1r_4, \quad (26)$$

$$n_4 = mab - J_1c^2 - m_2b_1^2r_1^2r_2r_3 - I_2c_1^2r_1^2r_2r_3,$$

$$n_{40} = k_3 a_3 b_3 + k_4 r_1^2 r_2 r_3 - k_4 a_4 r_1 r_3 +$$
$$+k_5 a_5 b_5 + k_4 a_4 b_4 r_1 r_3 + k_4 b_4 r_1 r_2 -$$
$$-k_5 b_6^2 r_1^2 r_2 r_3 + k_5 a_5 r_1 r_3 - k_5 b_5 b_6 r_1 r_3,$$
$$n_5 = m_1 b^2 + I_1 c^2 + m_2 b_1^2 (r_1 r_3)^2 + I_2 c^2{}_1 (r_1 r_3)^2,$$
$$n_{50} = k_2 + k_3 b_3^2 + k_4 (r_1 r_3)^2 - k_4 r_1 r_3 b_4 + k_4 b_4^2 + k_5 b_5^2 +$$
$$+k_5 b_6^2 (r_1 r_3)^2 + k_5 b_5 b_6 r_1 r_3,$$
$$n_6 = m_2 a_1 b_1 r_1 r_3 + m_2 b_1^2 r_1^2 r_3 r_4 - I_2 c_1^2 r_1 r_3 + I_2 c_1^2 r_1^2 r_3 r_4,$$
$$n_{60} = -k_3 b_3 + k_4 r_1^2 r_3 r_4 - k_4 b_4 r_1 r_4 + k_5 a_6 b_6 r_1 r_3 + k_5 b^2{}_6 r^2{}_1 r_3 r_4 -$$
$$-k_5 a_6 b_5 - k_5 b_5 b_6 r_1 r_4,$$
$$n_7 = m_2 a_1 b_1 r_1 r_2 - m_2 b_1^2 r_1^2 r_2 r_4 + I_2 c_1^2 r_1 r_2 - I_2 c_1^2 r_1^2 r_2 r_4,$$
$$n_{70} = -k_3 a_3 - k_4 r_1^2 r_2 r_4 - k_4 a_4 r_1 r_4 + k_4 a_4 b_4 r_1 r_4 + k_5 a_6 b_6 r_1 r_2 -$$
$$-k_5 b_6^2 r_1^2 r_3 r_4 - k_5 a_5 b_6 + k_5 b_6 a_5 r_1 r_4,$$
$$n_8 = m_2 a_1 b_1 r_1 r_3 + I_2 c_1^2 r_1 r_3 + I_2 c_1^2 r_1^2 r_3 r_4,$$
$$n_{80} = -k_3 b_3 + k_4 r_1^2 r_3 r_4 + k_5 a_6 b_6 r_1 r_3 +$$
$$+k_5 b^2{}_6 r_1^2 r_3 r_4 - k_5 a_6 b_5 - k_5 b_5 b_6 r_1 r_4 - k_4 b_4 r_1 r_4,$$
$$n_9 = m_2 a_1^2 + m_2 a_1 b_1 r_1 r_4 + m_2 b_1^2 (r_1 r_4)^2 +$$
$$+I_2 c_1^2 + I_2 c_1^2 r_1 r_4 + I_2 c_1^2 (r_1 r_4)^2,$$
$$n_{90} = k_3 + k_4 (r_1 r_4)^2 + k_5 a_6^2 + k_5 a_6 b_6 r_1 r_4 + k_5 b^2{}_6 (r_1 r_4)^2.$$

Используя соотношения $n_1 \div n_9$ и $n_{10} \div n_{90}$, перепишем табл. 3.

Используя данные табл. 3, найдем, что перекрестные связи системы при определенных условиях «обнуляются» по отдельности между всеми парциальными системами:

- между движениями по координатам y_1 и y_2, y_2 и y_3, y_1 и y_3.

$$\omega_1^2 = \frac{n_{20}}{n_2}, \qquad (27)$$

$$\omega_2^2 = \frac{n_{30}}{n_3}, \qquad (28)$$

$$\omega_3^2 = \frac{n_{60}}{n_6}. \qquad (29)$$

Вместе с тем, можно предположить, что условия (27)–(29) выполняются одновременно. Последнее требует выполнения достаточно громоздких соотношений между параметрами системы. В случае реализации таких условий при $z_1 = z_2 = z$ движение по парциальным системам y_1, y_2 и y_3 могло бы стать независимым, что создает условия для поиска новых режимов динамического состояния виброзащитных систем. На такой основе можно построить самонастраивающиеся системы виброзащитной защиты, однако в этом случае необходим доступ к возможностям изменения параметров нескольких элементов систем, измерениям и обработке информации о положении объекта, использованию устройств для создания управляющих сил (актуаторов или приводов).

Для определения частот динамического гашения перепишем выражения (25) и (26), тогда

$$W_1 = \frac{\overline{y}_1}{\overline{z}} = \frac{k_1\left[(n_5 p^2 + n_{50})(n_9 p^2 + n_{90}) - n_{60}^2\right] + \ldots}{A} \qquad (30)$$
$$\ldots \frac{+k_2\left[n_{30} n_{60} - (n_9 p^2 + n_{90}) n_{20}\right]}{A},$$

$$W_2(p) = \frac{\overline{y}_2}{z_2} = \frac{k_1\left[\begin{array}{l} n_{70} n_{60} - n_{20}(n_9 p^2 + n_{90}) + \\ +k_2\left[(n_1 p^2 + n_{10})(n_9 p^2 + n_{90})\right] - n_{30}^2 \end{array}\right]}{A}. \qquad (31)$$

Для динамического гашения по координате y_1 параметры можно найти из частотного уравнения

$$p^4 n_5 n_9 k_1 + p^2 (k_1 n_9 n_{50} + k_1 n_5 n_{90} - k_2 n_9 n_{20}) + \qquad (32)$$
$$+k_1 n_{50} n_{90} - k_1 n_{60}^2 + k_2 n_{30} n_{60} - k_2 n_{20} n_{90} = 0.$$

Для определения режимов динамического гашения по координате y_2 можно использовать следующее частотное уравнение:

Таблица 3

Коэффициенты уравнений (20)–(22) в приведенной форме

a_{11}	a_{12}	a_{13}
$n_1 p^2 + n_{10}$	$n_2 p^2 + n_{20}$	$n_3 p^2 + n_{30}$
a_{21}	a_{22}	a_{23}
$n_4 p^2 + n_{40}$	$n_5 p^2 + n_{50}$	$n_6 p^2 + n_{60}$
a_{31}	a_{32}	a_{33}
$n_7 p^2 + n_{70}$	$n_8 p^2 + n_{80}$	$n_9 p^2 + n_{90}$
Q_1	Q_2	Q_3
$k_1 z_1$	$k_2 z_2$	0

$$p^4 n_1 n_9 k_2 + p^2 (k_2 n_9 n_{10} + k_2 n_1 n_{90} - k_1 n_9 n_{20}) + \\ + k_2 n_{10} n_{90} - n_{30}^2 + k_1 n_{70} n_{60} - k_1 n_{20} n_{90} = 0. \quad (33)$$

Заключение

Таким образом, по каждой из координат y_1 и y_2 можно ожидать по два режима динамического гашения. При общем кинематическом возмущении z аналогично могут быть рассмотрены возможности динамического гашения для поступательного и вращательного движения объекта вокруг центра масс. Можно предполагать, что система в целом обладает возможностями совпадения частот динамического гашения, определяемых из (30), (31), а также частот зануления перекрестных связей (27), (28), (30). В таких случаях можно ожидать комбинационных эффектов, через которые проявляются простейшие формы самоорганизации движения в механических колебательных системах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Елисеев С. В., Нерубенко Г. П. Динамические гасители колебаний. Новосибирск : Наука. 1982.
2. Карамышкин В. В. Динамические гасители колебаний. Л. : Машиностроение. 1988. 108 с.
3. Коренев Б. Г., Резников Л. М. Динамические гасители колебаний. Теория и технические приложения. М. : Наука, 1963. 535 с.
4. Лойцянский Л. Г., Лурье А. И. Курс теоретической механики. М. : Наука. 1968. Т. 2 : Динамика. 640 с.
5. Дружинский И. А. Механические цепи. М. : Машиностроение. 1977. 238 с.

УДК 621.923

Старшев Денис Владимирович,
кандидат технических наук, доцент, Ижевский государственный технический университет, Воткинский филиал, кафедра «Техническая механика» (г. Воткинск), тел. (сот.): 8 909 052 83 71, e-mail: starshev@mail.ru

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛА ЗАГОТОВКИ НА СИЛУ РЕЗАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

D.V. Starshev

INFLUENCE OF THE PREPARATION MATERIAL DESTRUCTION MECHANISM ON CONTACT PROCESSES AT GRINDING

Аннотация. *Рассмотрен процесс разрушения материала заготовки при шлифовании, показано влияние критериев разрушения на силу стружкообразования.*

Ключевые слова: *шлифование, разрушение, прочность, сила.*

Abstract. *Process of preparation material destruction at grinding is considered; influence of destruction criteria on force of cutting is shown.*

Keywords: *grinding, destruction, durability, force.*

Большинство современных работ, посвященных исследованию процесса шлифования, основывается на математических моделях, содержащих большое количество грубых теоретических ошибок. Основная ошибка работ заключается в построении моделей, содержащих прочностные свойства материалов при статическом нагружении, несмотря на то, что характерной особенностью процесса шлифования является процесс динамического разрушения материала обрабатываемой заготовки, сопровождаемый образованием стружки.

Закономерности динамического разрушения характеризуются особенностями, не позволяющими прямо переносить представления статической прочности материалов, свойственные классической механике, на быстро протекающие временные процессы в твердых телах. Давно установлено, что материалы при быстром нагружении в условиях статики, не теряя устойчивости, выдерживают нагрузки, значительно превышающие критические. Прочностные свойства материалов при статическом и динамическом нагружении различаются [1]. Опыты показали, что в основе используемых при анализе процесса шлифования моделей должны лежать новые подходы, отражающие структурно-временные особенности процесса. В связи с этим исследование процесса шлифования с точки зрения динамики разрушения является актуальной научной задачей.

При высоких скоростях нагружения существенной становится зависимость от времени по-

ведения самого материала, которое в данном случае должно характеризоваться как нелинейное и вязкоупругое.

Проведенные эксперименты по разрушению демонстрируют зависимость динамической прочности материала от скорости и длительности нагружения (рис. 1).

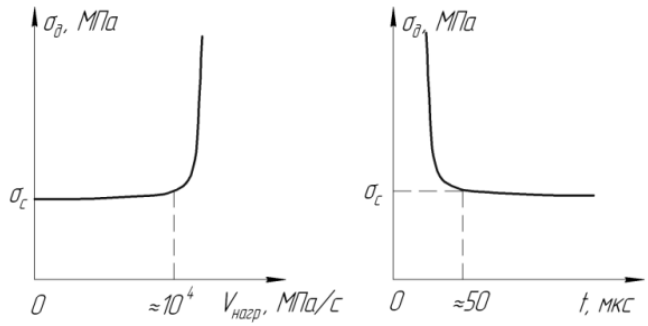


Рис. 1. Зависимость динамической прочности от скорости и длительности нагружения

Основной результат экспериментов заключается в том, что с уменьшением времени до разрушения критическое значение коэффициента интенсивности напряжений возрастает и может существенно превосходить соответствующее квазистатическое значение, которое является константой материала. Причем оказалось, что влиянием скорости нагружения на стартовое значение указанного коэффициента можно пренебречь, если время до разрушения $t \geq 50$ мкс, что соответствует скорости нагружения 10^4 МПа/с. С увеличением скорости нагружения соответствующее время до разрушения материала уменьшается, а критическое значение коэффициента интенсивности напряжений заметно возрастает. При времени не менее 50 мкс (обработка лезвийными инструментами) разрушение определяется не зависящим от времени и скорости квазистатическим критерием критического коэффициента интенсивности напряжений.

По результатам экспериментов видно, что критическое значение коэффициента интенсивности напряжений в динамике не является параметром материала, и, следовательно, попытки измерить динамическую прочность статическими методами ошибочны.

Рассмотрим процесс разрушения материала при шлифовании, основываясь на базовых принципах, предложенных Ю.В. Петровым [2]:

1) все твердые тела состоят из пространственных структурных элементов конечного размера;

2) элементарный акт разрушения есть разрушение одного структурного элемента;

3) параметры критерия, в том числе и размер структурного элемента, следует выбирать так, чтобы в предельных случаях обеспечить получение результатов классической теории разрушения.

Г. Нейбером и В.В. Новожиловым [3] предложен критерий разрушения:

$$\frac{1}{d}\int_0^d \sigma\, dr \leq \sigma_c\,, \qquad (1)$$

где σ_c – статическая прочность материала.

Параметр d (рис. 2) является линейным размером, характеризующим элементарную ячейку разрушения на данном масштабном уровне:

$$d = \frac{2K_{1c}^2}{\pi \cdot \sigma_c^2}, \qquad (2)$$

где K_{1c} – статическая вязкость разрушения.

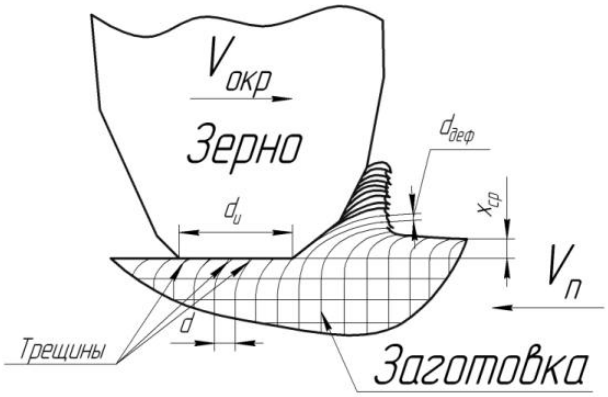


Рис. 2. Схема формирования стружки зерном шлифовального круга

Дж. Кальтхофф и Д. Шоки [4] предложили в качестве критерия разрушения рассматривать критерий минимального времени. Главной особенностью их подхода является введение некоторого структурного параметра τ, имеющего размерность времени и отвечающего за инкубационные процессы, предшествующие разрушению. Инкубационное время τ является константой, связанной со свойствами материала. Согласно этой концепции, разрушение наступает при условии, что текущее значение коэффициента интенсивности напряжений $K_{\text{I}}(t)$ в течение некоторого минимального времени превосходит динамическую вязкость разрушения K_{1d} (38).

В процессе шлифования инкубационным временем является время деформирования элементарной ячейки материала до момента ее разрушения (процесс формирования элемента стружки).

Разрушение ячейки с линейным размером d на данном масштабном уровне произойдет в результате ее деформирования до величины $d_{деф}$ (рис. 2), то есть

$$d - d_{деф} = V_0\tau + \frac{a \cdot \tau^2}{2}. \qquad (3)$$

В начальный момент времени ячейка находится в неподвижном состоянии относительно заготовки, поэтому $V_0 = 0$.

За время τ элементарная ячейка приобретает скорость равную $V_{окр} \pm V_n$, где $V_{окр}$ – скорость вращения шлифовального круга; V_n – скорость подачи заготовки; знак «+» – при встречном шлифовании, «–» – при попутном шлифовании.

Таким образом, ускорение, получаемое элементарной ячейкой, определится по формуле

$$a = \frac{V_{окр} \pm V_n - V_0}{\tau}. \qquad (4)$$

Подставляя значение ускорения в уравнение (3), получаем значение инкубационного времени

$$\tau = \frac{2(d - d_{деф})}{V_{окр} \pm V_n}. \qquad (5)$$

После подстановки уравнения (5) в (4) определяем ускорение, выраженное через размеры элементарной ячейки разрушения

$$a = \frac{(V_{окр} \pm V_n)^2}{2(d - d_{деф})}. \qquad (6)$$

К существенным эффектам, обнаруженным в ходе экспериментов, следует отнести и задержку разрушения (рис. 3) – участок от 0 до τ.

Задержка разрушения объясняется критерием минимального времени τ, отвечающего за инкубационные процессы, предшествующие разрушению.

Чтобы вызвать мгновенное разрушение, требуется воздействие бесконечно большого импульса. Последнее связано с преодолением инерции среды.

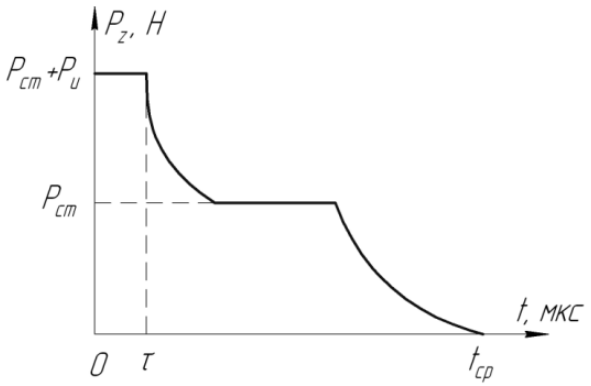


Рис. 3. Схема воздействия силы со стороны зерна на срезаемый слой

В общем случае сила стружкообразования будет складываться из двух составляющих:

$$P_z = P_и + P_{ст}, \qquad (7)$$

где

$P_и = \frac{\sigma_c \cdot x_{ср} \cdot d_и}{2g} \cdot \frac{(V_{окр} \pm V_n)^2}{(d - d_{деф})}$ – сила, затрачиваемая на преодоление инерции среды ($x_{ср}$ – толщина среза; $d_и$ – диаметр площадки износа на задней поверхности зерна; g – ускорение свободного падения);

$P_{ст} = \tau_{xz} \cdot d_и \cdot \frac{x_{ср}}{\sin\theta} + \tau_{yz} \cdot x_{ср} \cdot \frac{d_и}{\sin\theta} + \frac{2 \cdot \mu \cdot p \cdot d_и \cdot x_{см} \cdot \sin\gamma}{\cos\gamma - \sin(\gamma - \varphi)}$

– статическая составляющая силы, затрачиваемая на деформацию срезаемого слоя и трение по площадкам контакта (τ_{xz}, τ_{yz} – касательные напряжения, возникающие по бокам элементарной ячейки; θ – угол сдвига; μ – коэффициент трения скольжения зерна по материалу заготовки; p – контактное давление; $x_{см}$ – толщина сминаемого слоя; γ – передний угол зерна; φ – безразмерный коэффициент).

Линейный размер элементарной ячейки и ее деформированный размер при заданных условиях резания можно определить на микроскопе по фотографиям обработанной поверхности и стружки.

Плоскости сдвига возникают, когда деформация элементарной ячейки достигает некоторого критического значения для заданной температуры и свойств обрабатываемого материала. При этом верхняя часть ячейки срезается, а ее нижняя часть деформируется, упрочняя поверхностный слой (наклепывая его). В результате упрочнения поверхностного слоя снижается его пластичность и при взаимодействии задней поверхностью зерна с наклепанной поверхностью заготовки на последней возникают микротрещины (рис. 2), являющиеся результатом возникновения напряжений растяжения. При дальнейшем срезании стружки с этой поверхности плоскости сдвига будут возникать вдоль этих трещин, так как трещины являются концентраторами напряжений.

Критерий минимального времени вводит в анализ разрушения при шлифовании следующие принципиальные установки.

Во-первых, отмечается существование некоторого структурного параметра, имеющего размерность времени, который управляет процессом разрушения. В квазистатике разрушение опреде-

ляется некоторым параметром с размерностью длины. Таким образом, при переходе от статического нагружения к динамическому в процесс включается новая структурная характеристика.

Во-вторых, утверждается, что разрушение обусловливается не мгновенными состояниями локального силового поля, но представляет собой интегральный во времени процесс, распределенный на структурно-временном интервале.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. При медленном нагружении (обработка лезвийными инструментами) необходимо использовать статический критерий текучести, при высоких скоростях нагружения (процесс шлифования) – критерий инкубационного времени. При этом необходимо помнить, что одно и то же нагружение может оказаться быстрым для одного материала и медленным для другого.

2. Наибольший период задержки соответствует максимальному (инкубационному) времени, в течение которого материал может «сопротивляться» переходу в пластическое состояние. На основании этого на переход в пластическое состояние влияет не вся история нагружения, а только нагружение в период, непосредственно предшествующий наступлению текучести. Длительность такого периода равна инкубационному времени.

3. Определенная по формуле (7) сила резания во много раз превышает силы, рассчитанные по имеющимся зависимостям, т. к. они позволяют определить только статическую составляющую, достоверность которой определяется на экспериментальных установках, обладающих большой инерционностью и не позволяющих зафиксировать единичные кратковременные импульсы единичных зерен. Соответственно, достоверность имеющихся моделей недостаточна для их применения.

Представленная зависимость позволяет определить реальную нагрузку, испытываемую зерном шлифовального круга, и тем самым создать благоприятные условия его работы. Для обеспечения эффективного шлифования сила закрепления зерна связкой должна быть больше силы, возникающей в результате динамического взаимодействия зерна с обрабатываемой заготовкой в случае работы круга в режиме затупления, и меньше в случае работы круга в режиме самозатачивания. Сила, действующая на зерно, не должна создавать в нем напряжений, превышающих предел прочности абразивного материала на изгиб и на срез.

Полученные результаты исследований позволяют решать задачу оптимизации критерия динамического силового воздействия со стороны обрабатываемого материала на зерно шлифовального круга, обеспечивая тем самым его эффективную работу в режиме самозатачивания или затупления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Морозов Н. Ф., Петров Ю. В. Проблемы динамики разрушения твердых тел. СПб. : Изд-во С.-Петерб. ун-та, 1997. 132 с.
2. Петров Ю. В., Уткин А. А. О зависимости динамической прочности от скорости нагружения // Физико-химическая механика материалов. 1989. № 2. С. 38–42.
3. Новожилов В. В. О необходимом и достаточном критерии прочности // Прикладная математика и механика. 1969. Т. 33, вып. 2. С. 212–222.
4. Kalthoff J. F., Shockey D. A. Instability of Cracks under Impulse Loads // J. Appl. Phys. 1977. Vol. 48. P. 986–993.

УДК 004.932.2

Федоров Роман Константинович,
канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Институт динамики систем и теории управления СО РАН,
тел. (3952) 45-31-08, e-mail: fedorov@icc.ru
Шигаров Алексей Олегович,
научный сотрудник, Институт динамики систем и теории управления СО РАН
тел. (3952) 45-31-02, e-mail: shigarov@icc.ru

ЛОГИКО-СИНТАКСИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РАСПОЗНАВАНИЮ ИЗОБРАЖЕНИЙ С УЧЕТОМ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ

R.K. Fedorov, A.O. Shigarov

LOGICAL APPROACH TO SYNTACTIC IMAGE RECOGNITION WITH SPATIAL CONSTRAINTS

Аннотация. *В данной работе предлагается подход к распознаванию объектов на изображениях, который основывается на логическом выводе с использованием структурного описания объектов. Поиск границ объектов на изображении выполняется как унификация встроенного предиката line с учетом множества ограничений, заданных описанием.*

Ключевые слова: *изображение, распознавание, полутоновые изображения, логический вывод, сегмент.*

Abstract. *In this paper an approach to recognizing objects in images is proposed. The approach is based on a logical conclusion using structural descriptions of objects. Searching borders of objects in the image is performed as a built-in unification predicate line satisfying the set of constraints defined by the description.*

Keywords: *image, recognition, half-tone pictures, logical conclusion, segment.*

Введение

В работе будем рассматривать полутоновые изображения в видимом диапазоне. Распознавание объектов на растровых изображениях является нетривиальной задачей. Особенностью является зашумленность, размытость, наличие большого числа различных объектов. Часто эти объекты накладываются друг на друга и имеют сложную текстуру, что приводит к неоднородности изображения распознаваемых объектов. Текстура соседних объектов может совпадать, а участки границ между ними – отсутствовать. Усложняет анализ изображений различная освещенность частей одного и того же объекта. Можно утверждать, что методы анализа изображений в худшем случае должны распознавать объекты, основываясь только на частичной информации о границах объектов, представленных перепадами яркости серого.

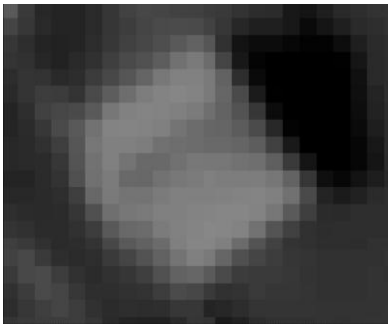


Рис. 1. Здание на космоснимке

Рассмотрим некоторый локальный участок изображения, который содержит прямолинейный участок границы объекта (далее *сегмент*). Часто на изображении перепад яркости вдоль линии, перпендикулярной сегменту объекта, происходит плавно вследствие размытия и различных шумов (см. рис. 1). Причем реальная граница может находиться во всех возможных местах перепада яркости. Учитывая наличие других объектов, на зашумленном растровом изображении имеется большое число возможных расположений сегментов границы объекта, часть из которых являются ложными.

С 1960-х годов развивается подход – синтаксическое распознавание образов [1], основным отличием которого является непосредственное использование структуры образов в процессе распознавания. В литературе данный подход также принято называть лингвистическим или структурным распознаванием, или распознаванием мето-

дами теории формальных грамматик. Использование информации о структуре образов может помочь отбросить заведомо неподходящие границы на изображении. Например, поиск сегментов границ ограниченной длины является одним из способов значительно сократить количество вариантов границ объекта. Так, обычно длина прямолинейных сегментов границ объекта превосходит длину сегментов, полученных при дроблении границы в результате шума.

Авторы работы [1] указывают, что использование описания структуры образа в алгоритмах распознавания требует его формализации на некотором формальном языке:

$$G = (V_n, V_t, P, Q, S),$$

где V_n, V_t, P и S – множества нетерминалов, терминалов, правил подстановки и начальный символ соответственно, а Q – множество вероятностных мер, заданных на множестве правил подстановки P. Учитывая шумы и отсутствие информации, в работе [1] предлагается воспользоваться следующим приемом – считать недетерминированными правила подстановки и ставить в соответствие каждому из них некоторую вероятностную меру. При этом правила подстановок P могут опираться на пространственные дескрипторы, например «слева», «справа», «над» и т. д.

Предлагаемый подход

В рамках синтаксического подхода предлагается подход, в котором распознавание объекта основывается на логическом выводе с использованием структурного описания объектов. Поиск сегментов объектов на изображении выполняется как унификация встроенного предиката line с учетом множества ограничений, заданных описанием.

Введем следующие обозначения:

$S \subset \mathbb{N}_0^{\,2}$ – множество точек на плоскости;

$L \subset \mathbb{N}_0^{\,m}$ – множество значений (яркость серого, цвет в формате RGB или CMYK и т. д.);

$f : S \to V$ – растровое изображение.

В данной работе границы объекта моделируются только с помощью сегментов. Пространственные дескрипторы положения сегментов можно пытаться формализовать различными способами [2]. С целью сокращения количества альтернатив расположения сегментов объекта сформулируем следующие пространственные дескрипторы.

1. Поиск сегментов ограниченной длины позволяет значительно сузить множество альтернатив. В частности, можно исключить из рассмотрения сегменты более мелких или крупных объектов по сравнению с теми, которые требуется распознать. Для определения длины сегментов введем вспомогательную функцию вычисления Евклидова расстояния между двумя точками:

$$\text{len} : S^2 \to \mathbb{R}.$$

2. Значительное сужение множества сегментов дает использование информации об относительном положении сегментов объекта. Для задания относительного положения сегментов кроме вычисления длины сегмента необходима функция вычисления углов между двумя сегментами с общей точкой:

$$\text{angle} : S^3 \to A,$$

где $A = \{a : a \in \mathbb{R} \text{ è } 0 \le a < 360\}$.

Пространственные дескрипторы положения сегментов объекта можно определить как набор ограничений с использованием этих функций. Далее будем называть их *пространственными ограничениями*. Структура образа может задаваться набором дескрипторов, описывающих отношения частей образа, т. е. конъюнкцией ограничений. Множество сегментов соответствует структуре образа, если выполняются все ограничения.

Часто реальный объект на изображении может иметь или не иметь какую-то часть. Поэтому использование дизъюнкции в описании структуры образа увечит выразительность языка описания [3].

Учитывая наличие ограничений, дизъюнктивно-конъюнктивной формы описания структуры объектов и необходимость гибкого переборного механизма, наиболее подходящим механизмом является «Prolog III» (CLP – Constraint Logic Programming), опубликованный в работе [4]. Его основное отличие от классического Пролога состоит в наличии ограничений, с помощью которых, в частности, можно выразить пространственные дескрипторы структуры образа. Существует довольно много реализаций CLP, например CLP(B), CLP(FD), CLP(R) и т. д. Для реализации предлагаемого подхода необходимо их дополнить следующими сущностями:

1) множество переменных, описывающих положение точек на изображении (область определения этих переменных ограничена размерами изображения);
2) множество пространственных ограничений;
3) специальные предикаты.

Определим возможные пространственные ограничения. Введем предварительно множество знаков сравнения (множество бинарных отношений):

$$\Theta = \{=, >, <, \neq, \le, \ge\}.$$

Пространственные ограничения могут быть следующие:

$$\text{len}(s_1, s_2)\theta c,$$

$$\text{angle}(s_1, s_2, s_3)\theta c,$$

$x(s)\theta c$,

$y(s)\theta c$,

$x(s_1)\theta y(s_2)$,

$q\theta c$,

где $\theta \in \Theta$ – знак сравнения, s – переменные, описывающие точки на плоскости, c – числовая константа, q – вещественная переменная. Например, можно выразить следующие ограничения:

$$\text{angle}(s_1, s_2, s_3) = 90,$$

$$\text{len}(s_1, s_2) > 20,$$

$$\text{len}(s_1, s_2) \le 30.$$

Специальные предикаты необходимы для поиска границ объектов на изображении. Унификация этих предикатов должна возвращать всевозможные варианты прохождения границы, удовлетворяющие ограничениям. Возможно несколько таких предикатов, соответствующих виду участка границы, например предикаты, соответствующие отрезку, дуге окружности, квадратичным кривым и т. д. Все они будут отличаться набором параметров. В этой работе рассматривается только предикат для поиска прямолинейных отрезков границы сегментов:

$$\text{line}(s_1, s_2, q),$$

где s_1, s_2 – точки на плоскости, q – некоторая оценка из отрезка $[0,1]$. Переменные s_1, s_2 могут быть не определены. В этом случае реализация этого предиката должна организовать перебор допустимых пар точек на изображении и для каждой пары вычислить оценку прохождения сегмента границы. Введем функцию оценки:

$$\text{line} : S^2 \to B,\ B = \{b : b \in \mathbb{R} \text{ è } 0 \le b \le 1\},$$

где значению 1 соответствует четкое выделение прямолинейной границы между двумя точками, а значению 0 – полное ее отсутствие. Реализаций этой функции оценок может быть несколько. Приведем одну из них.

Реализация функции line

На растровом изображении имеются два вида контуров:

1) первый вид контура разделяет две разнородные области;

2) второй вид контура разделяет две однородные области, при этом в месте прохождения контура имеется частичное увеличение или уменьшение яркости.

Предлагается эвристический метод, ориентированный на выделение контуров первого типа на изображениях в градациях серого. Решение в данном алгоритме принимается на основе анализа двух прямоугольников, примыкающих к возможному сегменту (см. рис. 2). Ширина прямоугольников, т. е. окрестность анализа, задается константой.

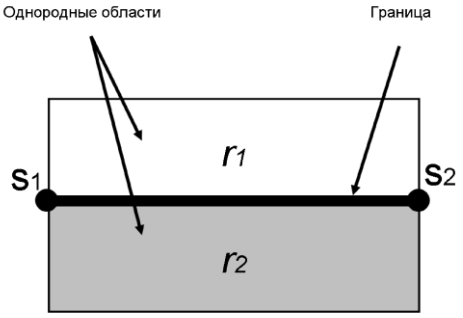


Рис. 2. Область анализа функции line

Значения яркости пикселей делятся на n равнопромежуточных диапазонов. Обозначим через w_i^r число появлений в прямоугольнике r пикселей из диапазона яркости i. Функцию оценки определим следующим образом:

$$\text{line}(s_1, s_2) = 1 - \frac{\sum_1^n \min(w_i^1, w_i^2)}{\sum_1^n \max(w_i^1, w_i^2)}.$$

В отличие от релеевского детектора, предложенного в работе [5], данная функция анализирует некоторую окрестность сегмента между двумя произвольными точками. В целом, использование такой функции позволит выбирать положение сегмента, согласованное с положением всего объекта и отдельных участков его границы.

Процедура поиска распознаваемого объекта

Процедуру поиска объекта в рамках этого подхода можно построить как логический вывод цели. В процессе вывода производится унификация набора отрезков

$$\text{obj} = \left\{ \left(p_1^1, p_1^2 \right), \ldots, \left(p_k^1, p_k^2 \right) \right\},$$

удовлетворяющих некоторым пространственным отношениям.

Апробация подхода

Для проверки предлагаемого подхода реализован поиск объектов в среде программирования «Borland Delphi». Реализован механизм поиска, содержащий следующее описание формы объекта, выраженного на языке Пролог (см. рис. 3).

```
house(s1,s2,s3,s4) :-
line(s1,s2,b1),
b1>0.8, angle(s1,s2,s3)=90,
line(s2,s3,b2), b2>0.8,
angle(s2,s3,s4)=90, line(s3,s4,b3),
b3>0.8, line(s4,s1,b4).
```

Рис. 3. Описание формы объекта на Прологе

Это описание соответствует прямоугольным объектам. Эксперимент проводился на ряде изображений, в том числе на космоснимке г. Иркутска с разрешением 0,7 метра на пиксель. Результаты эксперимента приведены на рис. 4, 5, 6.

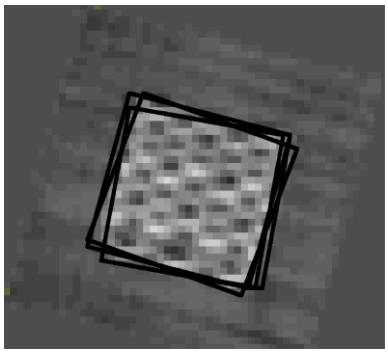


Рис. 4. Тестовое изображение

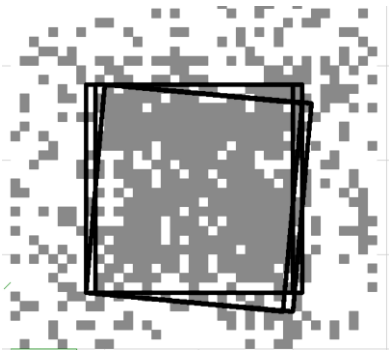


Рис. 5. Тестовое изображение

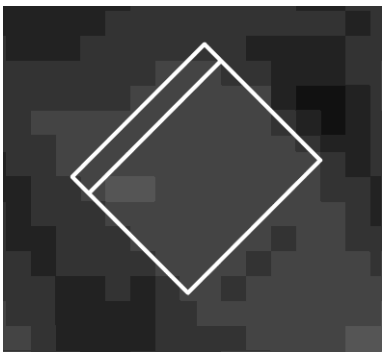


Рис. 6. Космоснимок

Необходимо заметить, что изменение структуры образа распознаваемого объекта приводит к значительным изменениям программного кода тестового алгоритма. Поэтому описание структуры образа на некотором языке позволит более гибко применять новые знания в распознавании изображений.

Заключение

Результаты апробации подтверждают эффективность подхода: использование дополнительной информации при сегментации и распознавании изображения позволяет находить объекты, представленные недостаточно четко. Недостатком является большая вычислительная сложность. В дальнейшем предлагается развить предложенный подход – разработать удобный язык описания свойства объектов и создать интерпретатор этого языка, который бы позволил эффективно по времени и качеству находить распознаваемые объекты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов : пер. с англ. М. : Мир, 1978. 411 с.
2. Чэн Ш.-К. Принципы проектирования систем визуальной информации : пер, с англ. М. : Мир, 1994. 408 с.
3. Гуревич И. Б. Схема синтеза логических моделей изображений, допускаемых эффективными распознающими операторами // Компьютерная оптика. 1995. № 14–15-1. С. 133–147.
4. Colmerauer A. An Introduction to Prolog III // Communications of the ACM. 1990. Vol. 33 (7). P. 69–90.
5. Минченков М. В., Юрин Д. В. Многостадийный алгоритм сегментации изображений // Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук : тез. докл. XLIII конф. / МФТИ. Москва-Долгопрудный, 2000. Ч. V. С. 59.

УДК 669.14:621.9

Агрызков Леонид Емельянович,
к. т. н., главный металлург, ОАО ПО «ИЗТМ», тел.: (3952)288-121, e-mail: aleonid@iztm.ru
Власова Людмила Георгиевна,
доцент кафедры электрооборудования оптико-электронных средств воздушной разведки Иркутского военного авиационного инженерного института
Ивакин Валентин Леонидович,
к. т. н., генеральный директор 292 центральной лаборатории, ОАО ПО «ИЗТМ», тел.: (3952)288-208, e-mail: ivalentin@iztm.ru
Мусихин Алексей Михайлович,
инженер-технолог отдела гл. металлурга, ОАО ПО «ИЗТМ», тел.: (3952)253-377 (2-95), e-mail: maleksey@iztm.ru
Черняк Саул Самуилович,
д. т. н., профессор, ИрГУПС, тел.: (3952)297-266

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛЕЙ 34ХН3М И 37ХН3А ПОСЛЕ ОДИНАРНОЙ И ДВОЙНОЙ ЗАКАЛКИ

L.E. Agryzkov, L.G. Vlasova, V.L. Ivakin, A.M. Musikhin, S.S. Chernyak

MECHANICAL PROPERTIES OF STEELS 34HNZM AND 37HNZA AFTER SINGLE AND DOUBLE HARDENING

Аннотация. *Представлены результаты исследований по улучшению механических свойств сталей 34ХН3М и 37ХН3А. Приведены результаты испытаний образцов данных сталей после одинарной и двойной закалки в различных вариантах.*

Ключевые слова: *хрупкость, закалка, отпуск в масле, предел прочности, предел текучести.*

Abstract. *In the paper the results of researches on improvement of mechanical properties of steels 34HNZM and 37HNZA are presented. The results of tests of these steels samples after single and double hardening are shown.*

Keywords: *fragility, hardening, oil tempering, structural limit, yield stress.*

Одной из актуальных задач в машиностроении является повышение качества, надежности и долговечности деталей машин, работающих в районах сурового климата Крайнего Севера и Сибири. Многолетняя практика эксплуатации машин, конструкций и оборудования в этих условиях показала неотложную потребность в создании специальной техники, так как потери от неприспособленности техники очень велики. Как правило, в Сибири и на Крайнем Севере техника выходит из строя задолго до исчерпания своего ресурса работы, а ее ремонт на месте обходится во много раз дороже, чем в других районах, и стоимость его значительно превышает ее первоначальную стоимость.

Добиться сочетания высокой долговечности и надежности крупных поковок очень трудно, так как повышение прочностных характеристик обычно приводит к понижению пластических свойств.

Для определения оптимального режима термической обработки, обеспечивающего необходимый комплекс свойств, были рассмотрены следующие варианты:

- закалка 850 °С, масло, отпуск 200, 300, 400, 500, 560 °С;
- закалка 950°С, масло, закалка 850°С, масло, отпуск 200, 300, 400, 500, 560°С;
- закалка 950 °С, масло, отпуск 560 °С, закалка 850 °С, масло, отпуск 200, 300, 400, 500, 560 °С.

Оценка механических свойств сталей со структурой мартенсита после отпуска проводилась традиционными методами механических испытаний (испытание гладких образцов в условиях одноосного растяжения, испытание образцов с надрезом Менаде на ударный изгиб) в сочетании с более чувствительными методами (испытание образцов с зарожденной трещиной с целью определения работы зарождения и развития трещины, определение критерия вязкости разрушения К/с). Механические свойства стали в зависимости от

различных вариантов термической обработки приведены на рис. 1.

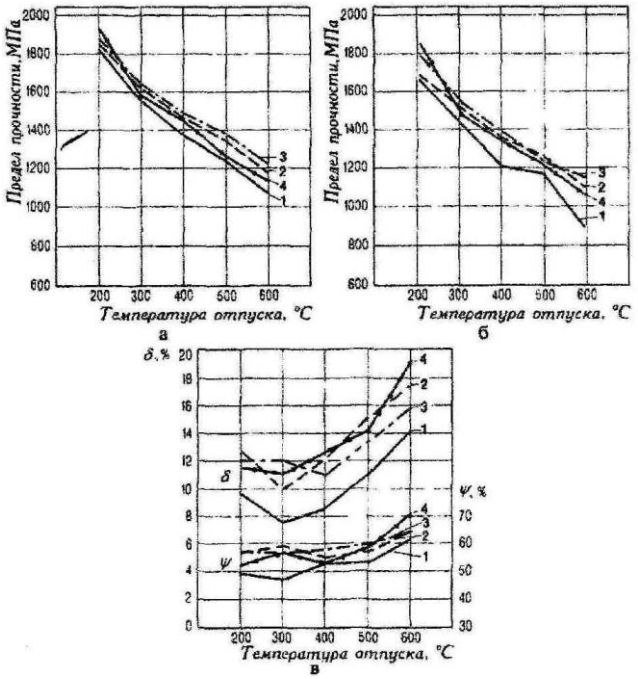


Рис. 1. Изменение механических свойств стали 34ХН3М в зависимости от режима термической обработки: а, б, в) 1– закалка 850 °С в масле; 2 – закалка 950/850 °С в масле, отпуск 200–600 °С; 3 – закалка 950 °С в масле, отпуск 580 °С, закалка 850 °С в масле, отпуск 200–600 °С; 4 – закалка 850 °С, отпуск 580 °С, закалка 850 °С в масле, отпуск 200–600 °С

Сравнение прочностных свойств стали 34ХН3М в состоянии одинарной закалки (рис. 1 а, кривая 1) с прочностью стали, подвергнутой двойной закалке (рис. 1 а, кривые 2, 3, 4), показывает, что все технологические варианты двойной термической обработки имеют более высокий предел прочности. Двойная закалка с низким отпуском позволяет получить прочность на уровне 1900–1950 МПа, в то время как при одинарной закалке $\sigma_в$ находится на уровне 1800 МПа. Такая разница в прочности сталей, подвергнутых термической обработке и различным вариантам двойной термической обработки, остается практически при всех температурах отпуска. Предел текучести после двойной термической обработки (рис. 1 б, кривые 2, 3, 4) во всех случаях выше, и особенно это проявляется при высокой температуре отпуска.

Двойная закалка с низким отпуском 200 °С увеличивает предел текучести по сравнению с одинарной от 1660 до 1800–1850 МПа. Пластические свойства (δ, ψ) после разных технологических вариантов двойной термической обработки улучшаются (рис. 1 в). Двойная закалка с отпуском 200 °С позволяет повысить относительное удлинение до 11,8–12,4 %. Та же зависимость наблюдается и для стали 37ХН3А.

Очень важно оценить склонность конструкционных сталей к отпускной хрупкости, развитие которой снижает сопротивление стали хрупкому разрушению. Имеющиеся в литературе сведения по изучению склонности сталей к отпускной хрупкости весьма противоречивы [1, 2, 3, 4]. Определение склонности сталей 37ХН3А и 37ХН3М к отпускной хрупкости первого рода проводили по изменению ударной вязкости и доли вязкой составляющей в изломе в интервале температур отпуска 250–300 °С через каждые 50 °С в состоянии одинарной и двойной закалки. С этой целью по две партии образцов каждой стали как после одинарной, так и после двойной закалки подвергали отпуску разной длительности (1,5 и 10 ч) в температурном интервале 250–500 °С. Образцы после отпуска (1,5 ч) охлаждали в масле, а после выдержки 10 ч нагревали со скоростью 20 °С/ч.

Продолжительность первичного отпуска 1,5 ч и 10 ч была обусловлена тем, что при отсутствии охрупчивания более длительный отпуск по сравнению с кратковременным способствует некоторому дополнительному разупрочнению стали, выражающемуся в снижении твердости и повышении ударной вязкости. При наличии эффекта охрупчивания увеличение выдержки при отпуске способствует усилению охрупчивания, снижающего ударную вязкость. При отпуске в интервале отпускной хрупкости одновременно происходит два противоположных процесса: разупрочнение и охрупчивание стали. Первый из них способствует повышению ударной вязкости и доли вязкой составляющей в изломе, а второй – их снижению. Проявление отпускной хрупкости наглядно показано на рис. 2 (расположение кривых ударной вязкости и процента вязкой составляющей для отпуска в течение 1,5 ч и 10 ч).

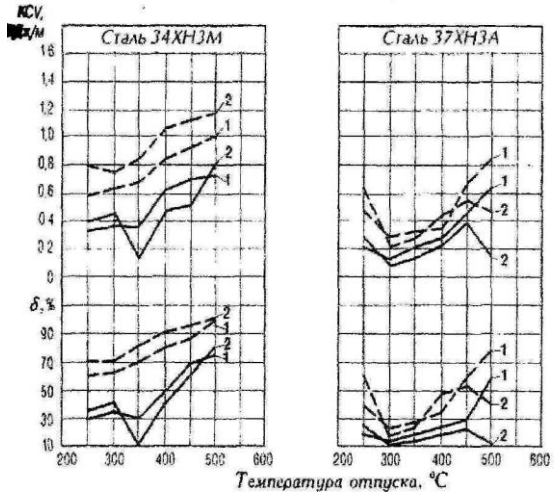


Рис. 2. Определение температуры максимального охрупчивания сталей 34ХН3М и 37ХН3А: 1 – 1,5 ч; 2 – 10 ч; одинарная закалка; двойная закалка

Исследование показало, что сталь 37ХН3А более склонна к отпускной хрупкости, интервал развития отпускной хрупкости у нее шире и находится в температурном интервале 300–500 °С.

Легирование молибденом (сталь 34ХН3М), а также применение двойной закалки снижают степень охрупчивания и сужают интервал отпускной хрупкости. Для повышения комплекса свойств сталей 34ХН3М и 37ХН3А целесообразно проводить окончательный отпуск при температурах 200–250 °С. Одновременно было проведено исследование ударной вязкости стали 37ХН3А при низких температурах (от +20 до –60 °С) в зависимости от режима закалки и температуры отпуска (200–600 °С) (рис. 3).

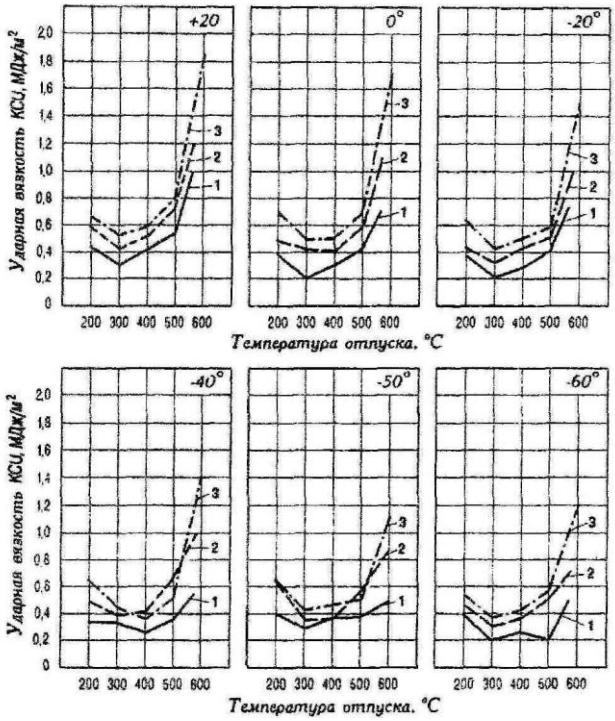


Рис. 3. Зависимость ударной вязкости стали 37ХН3А от режима термической обработки и температуры испытания (от +20 до –60 °С): 1 – закалка 850 °С в масле; 2 – закалка 950/850 °С; 3 – закалка 950 °С в масле, отпуск 580 °С, закалка 850 °С в масле

Ударная вязкость после обычной термической обработки при температуре +20 °С (отпуск 200 °С) составляет 0,3 мДж/м^2, с понижением температуры испытания ударная вязкость несколько снижается, особенно при отпуске 300 °С. Так, при температуре 0, –20 °С и ниже ударная вязкость снижается до 0,2 мДж/м^2, с повышением температуры отпуска до 500 °С она возрастает, достигая 0,5 – 0,6 мДж/м^2. Сравнение кривых ударной вязкости показывает, что ударная вязкость после двойной закалки возрастает на 0,2–0,3 мДж/м^2 при отпуске 400 °С, а при более высоких температурах отпуска – практически в 2 раза во всем исследуемом интервале. Лучшие результаты получены для стали с закалкой от 950 и 850 °С с промежуточным отпуском 580°С.

Установлен оптимальный режим термической обработки стали 34ХН3М (закалка 950 °С, отпуск 580 °С, закалка 850 °С, отпуск 200 °С), обеспечивающий повышение предела прочности до 1800 МПа и предела текучести до 1600 МПа при сохранении на достаточном уровне пластических свойств и ударной вязкости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гудремон Э. Специальные стали. М. : Металлургиздат, 1959–1960. Т.1–2.
2. Гуляев А. П. Металловедение. М. : Металлургия, 1977.
3. Курдюмов Г. В. Превращения в железе и стали. М. : Наука, 1977. 236 с.
4. Меськин В. С. Основы легирования стали. М. : Металлургия, 1964.

УДК 519.615

Асламова Вера Сергеевна,
д. т. н., проф., зав. каф. «Автоматизация и электроснабжение промышленных предприятий» (АиЭПП), Ангарская государственная техническая академия (АГТА), тел. (3955) 67-89-15, 8 908 643 14 12, e-mail: weras@agta.mail.ru
Болоев Евгений Викторович,
доцент кафедры АиЭПП, АГТА, тел. (3955) 67-89-15, 8 902 172 19 59, e-mail: boloev@mail.ru

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ МЕТОДОМ АППРОКСИМАЦИИ

V.S. Aslamova, E.V. Boloev

NUMERICAL SOLUTION OF THE NONLINEAR EQUATIONS BY AN APPROXIMATION METHOD

Аннотация. *Рассматривается решение нелинейных уравнений методом аппроксимации.*

Ключевые слова: *решение нелинейных уравнений, аппроксимация функции по методу наименьших квадратов, ортогональные базисные функции.*

Abstract. *The solution of the nonlinear equations by an approximation method is considered.*

Keywords: *solution of nonlinear equations, least-squares approximation for the function, orthogonal basis functions.*

Необходимость отыскания корней нелинейных уравнений возникает при решении задач в различных областях науки и техники, в том числе в расчетах систем автоматического управления.

При отсутствии аналитического решения задачи отыскание корней нелинейного уравнения осуществляют в два этапа: локализации корней, итерационного уточнения корней. С обзором методов итерационного уточнения корней уравнения можно ознакомиться во многих учебниках по численным методам, например в [1]. Методы уточнения корней по организации процесса решения можно условно объединить в три группы:

1) методы уточнения отрезка локализации корня: метод половинного деления (биссектрис), метод хорд,
2) методы преобразований (приведения уравнения к виду, удобному для итераций): простых итераций; метод Ньютона (касательных), метод секущих, метод ложного положения и др.;
3) методы обратной интерполяции, например, квадратичной.

Методы первой группы медленно сходятся, но обладают надежной сходимостью [1]. Методы второй и третьей группы трудоемки, не достаточно надежны, но имеют высокую локальную сходимость [1].

Одним из наиболее эффективных методов второй группы является метод Ньютона, который при хорошо выбранном начальном приближении обладает квадратичной сходимостью [1]. В [1] метод Ньютона рассматривается как итерационный метод, использующий степенную линеаризацию функции уравнения по формуле Тейлора и позволяющий свести решение исходного нелинейного уравнения к решению последовательности линейных уравнений. Линеаризация по формуле Тейлора аппроксимирует функцию лишь в непосредственной близости к одной выбранной точке, которая может быть далека от решения. Таким образом, выбранная формула линеаризации функции метода Ньютона определяет ее локальную сходимость.

В данной работе авторами предлагается использовать последовательную линеаризацию функции уравнения по методу наименьших квадратов.

Рассмотрим решение нелинейного уравнения

$$w(x)=0. \qquad (1)$$

Корень уравнения (1) локализован на отрезке $[a,b]$.

Построим аппроксимацию функции $w(x)$

$$f(x)=c_0\varphi_0(x)+c_1\varphi_1(x)+c_2\varphi_2(x)+\ldots+c_l\varphi_l(x)+\ldots \qquad (2)$$

так, чтобы минимизировать взвешенную среднюю квадратическую ошибку на отрезке $[a,b]$

$$\sigma^2 = \int_a^b [w(x) - f(x)]^2 dx, \qquad (3)$$

где c_l – параметры; $\varphi_l(x)$ – базисные функции.

Базисные функции будем выбирать таким образом, чтобы они были попарно ортогональны на отрезке $[a,b]$. Функции являются попарно ортогональными [2], если при $l \neq v$ выполняется условие

$$\int_a^b \varphi_l(x)\varphi_v(x)dx = 0. \qquad (4)$$

Использование попарно ортогональных функций имеет преимущество, которое заключается в том, что улучшение аппроксимации (2), путем добавления нового члена $c_{l+1}\varphi_{l+1}(x)$ не меняет ранее вычисленных параметров c_0, c_1, c_2, …, c_l [2].

Принимаем

$$\varphi_0(x) = 1,\ \varphi_1(x) = x + d_{10},$$

$$\varphi_2(x) = x^2 + d_{21}x + d_{20},\ \ldots,\ \varphi_l(x) = x^l + \sum_{v=0}^{l-1} d_{lv}x^v, \ldots,$$

где d_{lv} – параметры базисных функций.

Определяем параметр d_{10} из условия (4)

$$\int_a^b \varphi_0(x)\varphi_1(x)dx = \int_a^b (x + d_{10})dx = \frac{(x + d_{10})^2}{2}\Bigg|_a^b =$$

$$= \frac{(b + d_{10})^2}{2} - \frac{(a + d_{10})^2}{2} = 0.$$

Отсюда

$$d_{10} = -\frac{a+b}{2}.$$

Аналогично составляя уравнения в соответствии с условием (4), находим параметры других базисных функций. Первые три базисные функции имеют вид:

$$\varphi_0(x) = 1; \qquad (5)$$

$$\varphi_1(x) = x - \frac{a+b}{2}; \qquad (6)$$

$$\varphi_2(x) = \left(x - \frac{a+b}{2}\right)^2 - \frac{1}{12}(a-b)^2.$$

Параметры c_k функции (2) рассчитываются из условия минимума взвешенной среднеквадратичной ошибки на отрезке $[a,b]$ (3). Задача поиска минимума соответствует задаче поиска корней системы уравнений

$$\frac{\partial}{\partial c_v}\int_a^b \left[w(x) - \sum_l c_l\varphi_l(x)\right]^2 dx = 0 \text{ при } v = 0, 1, 2, \ldots (7)$$

Раскрывая левую часть уравнений (7), учитывая (4) и независимость операций дифференцирования и интегрирования, имеем

$$\frac{\partial}{\partial c_k}\int_a^b \left\{w^2(x) - 2w(x)\sum_l c_l\varphi_l(x) + \left[\sum_l c_l\varphi_l(x)\right]^2\right\} dx =$$

$$= \frac{\partial}{\partial c_k}\left\{\int_a^b \left[\sum_l c_l\varphi_l(x)\right]^2 dx - 2\int_a^b w(x)\sum_l c_l\varphi_l(x)dx\right\} = (8)$$

$$= 2c_l\int_a^b \varphi_l^2(x)dx - 2\int_a^b w(x)\varphi_l(x)dx = 0.$$

Подставляя . в (7) и выполняя преобразования, получаем формулы для вычисления параметров функции (2)

$$c_l = \frac{\int_a^b w(x)\varphi_l(x)dx}{\int_a^b \varphi_l^2(x)dx}. \qquad (9)$$

Первые три коэффициента функции (2) в соответствии с (9) будут равны

$$c_0 = \frac{\int_a^b w(x)dx}{b-a}, \qquad (10)$$

$$c_1 = \frac{12\int_a^b w(x)\left(x - \frac{a+b}{2}\right)dx}{(b-a)^3}, \qquad (11)$$

$$c_2 = \frac{180\int_a^b w(x)\left(\left(x - \frac{a+b}{2}\right)^2 - \frac{1}{12}(a-b)^2\right)dx}{(b-a)^5}.$$

Для решения уравнения (1) будем использоваться линейную аппроксимацию функции (2)

$$f(x) = c_0\varphi_0(x) + c_1\varphi_1(x). \qquad (12)$$

При подстановке (5), (6) в (12) получаем

$$f(x) = c_0 + c_1\left(x - \frac{a+b}{2}\right).$$

Приближенное значение x_* корня уравнения (1) будет находиться из условия $f(x) = 0$ по формуле

$$x_* = \frac{a+b}{2} - \frac{c_0}{c_1}. \qquad (13)$$

Уменьшая множество x отрезка аппроксимации $[a,b]$ функции $w(x)$ вблизи корня, можно получать более точные значения x_*. Рассмотрим процедуру сужения отрезка аппроксимации.

Принимаем исходные приближения концов отрезка аппроксимации $a^{[0]}$ и $b^{[0]}$ соответственно равными концам отрезка локализации a и b. В дальнейшем верхний индекс, заключенный в квадратные скобки, будет обозначать номер при-

ближения. Рассчитываем коэффициенты $c_0^{[0]}$ и $c_1^{[0]}$ по формулам (10) и (11) соответственно

$$c_0^{[0]} = \frac{\int_{a^{[0]}}^{b^{[0]}} w(x)dx}{b^{[0]} - a^{[0]}},$$

$$c_1^{[0]} = \frac{12\int_{a^{[0]}}^{b^{[0]}} w(x)\left(x - \frac{a^{[0]} + b^{[0]}}{2}\right)dx}{\left(b^{[0]} - a^{[0]}\right)^3}.$$

Определяем значение $x_*^{[1]}$ по формуле (13):

$$x_*^{[1]} = \frac{a^{[0]} + b^{[0]}}{2} - \frac{c_0^{[0]}}{c_1^{[0]}}.$$

Находим новые приближения концов отрезка аппроксимации по формулам

$$a^{[1]} = x_*^{[1]},\ b^{[1]} = x_*^{[1]} - \frac{w\left(x_*^{[0]}\right)}{c_1^{[0]}}.$$

Графическая интерпретация решения показана на рис. 1. Процесс решения повторяют для

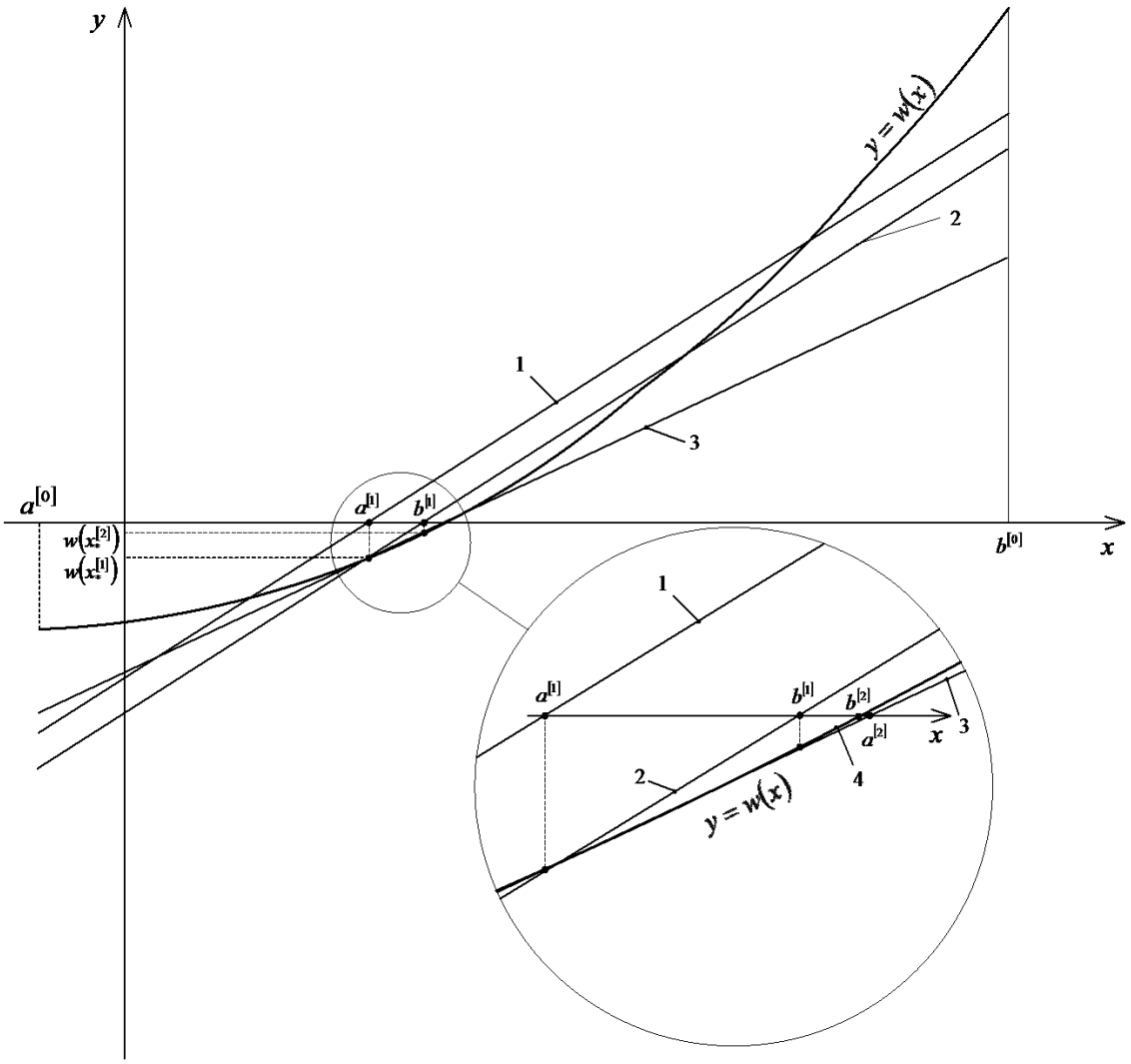


Рис. 1. Графическая интерпретация решения: 1 – функция $y = c_0^{[0]} + c_1^{[0]}\left(x - \frac{a^{[0]} + b^{[0]}}{2}\right)$;

2 – функция $y = c_0^{[0]} - w\left(x_*^{[1]}\right) + c_1^{[0]}\left(x - \frac{a^{[0]} + b^{[0]}}{2}\right)$; **3 – функция** $y = c_0^{[1]} + c_1^{[1]}\left(x - \frac{a^{[1]} + b^{[1]}}{2}\right)$;

4 – функция $y = c_0^{[1]} - w\left(x_*^{[2]}\right) + c_1^{[1]}\left(x - \frac{a^{[1]} + b^{[1]}}{2}\right)$

новых приближений $a^{[1]}$, $b^{[1]}$.

Таким образом, k-я итерация будет состоять из следующих этапов:

1. Принятия исходных приближений концов отрезка аппроксимации или их расчета по результатам предыдущей $(k-1)$-й итерации

$$a^{[k-1]} = x_*^{[k-1]}, \tag{14}$$

$$b^{[k-1]} = x_*^{[k-1]} - \frac{w\left(x_*^{[k-1]}\right)}{c_1^{[k-1]}}. \tag{15}$$

2. Расчета коэффициентов

$$c_0^{[k-1]} = \frac{\int_{a^{[k-1]}}^{b^{[k-1]}} w(x)dx}{b^{[k-1]} - a^{[k-1]}}, \tag{16}$$

$$c_1^{[k-1]} = \frac{12\int_{a^{[k-1]}}^{b^{[k-1]}} w(x)\left(x - \frac{a^{[k-1]} + b^{[k-1]}}{2}\right)dx}{\left(b^{[k-1]} - a^{[k-1]}\right)^3}. \tag{17}$$

3. Расчета значения $x_*^{[k]}$

$$x_*^{[k]} = \frac{a^{[k-1]} + b^{[k-1]}}{2} - \frac{c_0^{[k-1]}}{c_1^{[k-1]}}; \tag{18}$$

4. Проверки критерия окончания. Если критерий выполняется, то расчет заканчивается. Искомое значение принимается равным $x_*^{[k]}$. Если критерий не выполняется, то значение k увеличивают на единицу и возвращаются к первому этапу.

Критерием окончания итерации при заданной точности вычисления $\varepsilon > 0$ является неравенство

$$\left|\frac{w\left(x_*^{[k]}\right)}{c_1^{[k-1]}}\right| < \varepsilon. \tag{19}$$

Сравним метод Ньютона с предлагаемым методом, который в дальнейшем будем называть методом аппроксимации. С общих позиций метод Ньютона и метод аппроксимаций можно рассматривать как итерационные методы, использующие специальные функции линеаризации и позволяющие свести решение исходного нелинейного уравнения к решению последовательности линейных уравнений. Решение методом Ньютона основано на разложении функции уравнения в окрестности точки приближения $x_*^{[k]}$ в ряд Тейлора и использовании линейной части. Решение методом аппроксимаций основано на приближении функции уравнения многочленами методом наименьших квадратов вблизи точки приближения $x_*^{[k]}$, заданной отрезком $\left[a^{[k-1]}, b^{[k-1]}\right]$, и использовании линейной части. Таким образом, для рассматриваемых методов можно записать общую итерационную формулу:

$$x_*^{[k]} = x_0^{[k-1]} - \frac{h_0^{[k-1]}}{h_1^{[k-1]}},$$

где $x_0^{[k-1]}$ – исходное приближение; $h_0^{[k-1]}$, $h_1^{[k-1]}$ – параметры итерационной формулы. Для метода Ньютона исходное приближение и параметры равны

$$x_0^{[k-1]} = x_*^{[k-1]},\ h_0^{[k-1]} = w\left(x_*^{[k-1]}\right),\ h_1^{[k-1]} = w'\left(x_*^{[k-1]}\right),$$

а для метода аппроксимации

$$x_0^{[k-1]} = \frac{a^{[k]} + b^{[k]}}{2},\ h_0^{[k-1]} = c_0^{[k-1]} = \frac{\int_{a^{[k-1]}}^{b^{[k-1]}} w(x)dx}{b^{[k-1]} - a^{[k-1]}},$$

$$h_1^{[k-1]} = c_1^{[k-1]} = \frac{\int_{a^{[k-1]}}^{b^{[k-1]}} w(x)\left(x - \frac{a^{[k-1]} + b^{[k-1]}}{2}\right)dx}{\int_{a^{[k-1]}}^{b^{[k-1]}} \left(x - \frac{a^{[k-1]} + b^{[k-1]}}{2}\right)^2 dx}.$$

При вычислении параметра $h_1^{[k]}$ в методе Ньютона вычисляется производная функции, а в методе аппроксимаций при вычислении $h_0^{[k]}$ и $h_1^{[k]}$ используют интегрирование функций. Следовательно, трудоемкость методов будет определяться трудоемкостью вычислений функции, производной функции и интегралов функции. Трудоемкость метода аппроксимации по сравнению с методом Ньютона повышается из-за дополнительного уточнения приближения концов отрезка аппроксимации.

Интегралы некоторых функций являются не берущимися, что ограничивает использование метода аппроксимаций.

Заметим, что на отрезке $[a, b]$ возможные значения $w'(x)$ соответствуют возможным значениям c_0, возможные значения $w(x)$ соответствуют возможным значениям c_1. Эти соответствия позволяют утверждать, что методы отличаются выбором параметров для построения итерационной последовательности. Можно выдвинуть гипотезу о квадратичной локальной сходимости метода аппроксимаций.

Параметр c_0 интерпретируется как средневзвешенное значение функции на $[a,b]$, а c_1 – средневзвешенное значение скорости изменения функции на $[a,b]$. Если функция $w(x)$ является монотонной, то c_0 – среднее значение функции на $[a,b]$, c_1 – среднее значение скорости изменения функции на $[a,b]$. Параметр c_1 может использоваться при анализе чувствительности в практических задачах.

Таблица 1

Результаты расчета

Итерация	Результаты расчета методом аппроксимации			Результаты расчета методом Ньютона		
	$x_*^{[n]}$	$\left\|w\left(x_*^{[n]}\right)\right\|$	$\left\|\frac{w\left(x_*^{[k]}\right)}{c_1^{[k]}}\right\|$	$x_*^{[n]}$	$\left\|w\left(x_*^{[n]}\right)\right\|$	$\left\|x_*^{[n]} - x_*^{[n-1]}\right\|$
1	0,5234489508	0,1971208693	$3{,}02596685\cdot10^{-2}$	0,5667052869	$8{,}53751993\cdot10^{-2}$	$1{,}29438161\cdot10^{-2}$
2	0,5537600676	$2{,}3734\cdot10^{-4}$	$3{,}64516\cdot10^{-5}$	0,5537614709	$2{,}465421\cdot10^{-4}$	$3{,}75967\cdot10^{-5}$
3	0,5537238739	$3\cdot10^{-10}$	0	0,5537238742	$2{,}13\cdot10^{-9}$	$3\cdot10^{-10}$

Исследуем сходимость на примере решения уравнения $4\sin(x)-6\cos(x)+3=0$, корень которого локализован на отрезке $[0,2]$.

Для $w(x)=4\sin(x)-6\cos(x)+3$:

$$c_0(a,b)=4-\frac{6[\sin(a)-\sin(b)]+4[\cos(a)-\cos(b)]}{a-b},$$

$$c_1(a,b)=\frac{12}{(a-b)^3}(4[\sin(a)-\sin(b)]-$$
$$-6[\cos(a)-\cos(b)]-2(a-b)[\cos(a)-\cos(b)]-$$
$$-3(a-b)[\sin(a)-\sin(b)]),$$
$$w'(x)=4\cos(x)+6\sin(x).$$

Концы отрезка аппроксимации принимаем равными $a^{[0]}=a=0$, $b^{[0]}=b=2$. Расчеты методом аппроксимации выполняем по формулам (14)–(18) с проверкой критерия окончания (19).

Исходное приближение для метода Ньютона принимаем равным

$$x_*^{[0]}=\frac{a+b}{2}=1.$$

Расчеты методом Ньютона выполняем по формуле

$$x_*^{[k]}=x_*^{[k-1]}-\frac{w\left(x_*^{[k-1]}\right)}{w'\left(x_*^{[k-1]}\right)}.$$

Критерий окончания $\left|x^{[n]}-x^{[n-1]}\right|<\varepsilon$.

Результаты первых трех итераций с десятью знаками мантиссы приведены в табл. 1.

Благодаря выгодному исходному приближению для метода Ньютона значение функции $w\left(x_*^{[1]}\right)$ для первого приближения этого метода меньше, чем для метода аппроксимации. На второй итерации ситуация меняется. Значение функции для второго приближения $w\left(x_*^{[2]}\right)$ для метода аппроксимации становится меньше метода Ньютона. Метод аппроксимации дает лучшую сходимость.

Из примера видно, что метод аппроксимации имеет более высокую трудоемкость по сравнению с методом Ньютона. Однако если исходное приближение для метода Ньютона будет неудачным, то для расчета с заданной точностью число необходимых итераций значительно возрастает. При этом трудоемкость метода Ньютона из-за большего числа итераций может превышать трудоемкость метода аппроксимаций. При $x_*^{[0]}=b=2$ для рассматриваемого примера метод Ньютона расходится.

При решении нелинейных уравнений метод аппроксимации удобно использовать в качестве стартового, а затем использовать метод Ньютона.

Можно предложить различные модификации метода аппроксимаций, в том числе модификацию метода с постоянными параметрами в итерационной формуле. Эффективной для решения может оказаться модификация метода, использующая преобразованные базисные функции $\varphi_l(x)$ $(l=2,3,\ldots)$ к виду

$$\psi_l(x,x_0)=x\left(x_0^{l-1}+\sum_{v=1}^{l-2}d_{lv}x_0^v\right)+d_{l0},$$

при x_0, определяемой из

$$\min_{x_0}\sigma^2=\min_{x_0}\left(\int_a^b\{w(x)-[\varphi_0(x)+c_1\varphi_1(x)+$$
$$+\sum_{v=2}^{l}c_v\psi_v(x,)]\}^2\right)dx.$$

При решении можно использовать другие базисные функции и нелинейные члены аппроксимации (2).

Выводы

1. Для решения нелинейных уравнений можно использовать итерационные последовательности, полученные на аппроксимации функции методом наименьших квадратов.

2. Метод аппроксимации на итерации имеет более высокую трудоемкость по сравнению с методом Ньютона.

3. Метод аппроксимации может иметь более высокую локальную сходимость по сравнению с методом Ньютона.

4. Для метода аппроксимаций не задаются исходные приближения в отличие от метода Ньютона. При неудачном исходном приближении метод Ньютона по трудоемкости может превышать

метод аппроксимаций.

5. Метод аппроксимации удобно использовать в качестве стартового для решения нелинейного уравнения. При достижении области квадратичной сходимости метода Ньютона, можно использовать его для нахождения корня уравнения. При этом трудоемкость расчета будет минимальной.

6. Параметр c_1 при монотонной функции $w(x)$, определяемый как

$$c_1 = \frac{12\int_a^b w(x)\left(x - \frac{a+b}{2}\right)dx}{(b-a)^3},$$

показывает среднюю скорость изменения функции на $[a,b]$. Этот параметр может использоваться при анализе чувствительности в практических задачах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Амосов А. А., Дубинский Ю. А., Копченова Н. В. Вычислительные методы для инженеров. М. : Изд-во МЭИ, 2003. 596 с.
2. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). Определения, теоремы, формулы. СПб. : Лань, 2003. 832 с.

УДК 621.81+539.4.013 537.311.4

Кудрявцев Александр Александрович,
аспирант ИрГТУ, тел. 89641145025

КОНТАКТНАЯ ТЕПЛОПРОВОДИМОСТЬ И МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗАДАЧЕ АНАЛИЗА ТЕПЛОНАПРЯЖЕННОСТИ СБОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

A.A. Kudryavcev

THE HEAT CONDUCTION AND FINITE ELEMENT METHOD IN PROBLEM OF PREFABRICATED ELEMENTS CONTACT HEAT INTENSION ANALYSIS

Аннотация. *Рассмотрено теплонапряженное состояние деформируемых сборных конструкций. Математическое моделирование проводится на основе трехмерных моделей метода конечных элементов (МКЭ), где представлено два физических типа контактных задач: определения температурного поля в сборной конструкции; и ее расчета на прочность, при внешнем силовом воздействии, включая полученное в первой задаче температурное поле.*

Ключевые слова: *контакт, теплонапряженность, температурное поле.*

Abstract. *The heat intension of prefabricated elements is considered. The mathematical modeling is realized on bases of three-dimensional models of finite element method. There are two physical types of contact problem: the calculation of thermal field for prefabricated elements and the stress calculation in the presence of the involving forces and this thermal field.*

Keywords: *contact, heat intension, thermal field.*

Физическая сущность явления контактной теплопроводимости сборных конструкций, при их работе в условиях силового и температурного воздействий (теплонапряженности), заключается в том, что при вариации уровня механического контактного давления на сопрягаемых поверхностях деталей и прохождении через них теплового потока наблюдается вариация поля температур. Это физическое явление подтверждается экспериментальными данными, полученными в работе [4] и других. Возникающее при этом дополнительное контактное сопротивление тепловому потоку приводит к повышению градиента температурного поля в области стыка деталей. Последнее обстоятельство влияет на свойства пластичности материала в этом месте, что приводит к изменению (ослаблению) в нем условий контактного механического сопряжения деталей и, соответственно, уменьшению уровня работоспособности сборной

конструкции в целом. В особенности актуальным представленное обстоятельство является для высоконагруженных тепловых машин, таких как турбины авиационных двигателей [3], двигатели внутреннего сгорания и другие.

Моделирование теплонапряженного состояния сборных конструкций, с получением гарантированного уровня приближения к картине реального процесса, проводится на основе решения двух контактных физических задач. Первой из них является задача контактной теплопроводности, с вычислением в сборной конструкции поля температур. Вторая – контактная задача определения напряженно-деформированного состояния (НДС) сборной конструкции, при полном комплексе внешнего силового и температурного воздействия.

Для монолитного аналога сборной конструкции решение этих двух физических задач может быть проведено раздельно, с использованием представленной выше последовательности. Однако подавляющее большинство энергоемких тепловых машин являются конструкциями сборными, где на сопрягаемых поверхностях используется различный уровень посадок или условий сопряжения. Более того, в процессе работы конструкции эти условия сопряжения изменяются. Главным фактором для решения контактной температурной задачи в этом случае является уровень контактного давления на сопрягаемых поверхностях [3].

Таким образом, решение температурной и силовой контактных задач должно проводиться с применением алгоритма взаимозависимости, что является необходимым условием для получения достоверной картины теплонапряженного состояния сборной конструкции.

В аналитическом решении задачи контактной теплопроводности известен подход, определяемый граничными условиями четвертого рода [6], которые сводятся к одновременному заданию равенства температур и тепловых потоков на границе раздела и определяются, соответственно, выражениями вида

$$T_1\big| = T_2\big|_{гр}, \qquad (1)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n}\bigg|_{гр} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n}\bigg|_{гр}. \qquad (2)$$

В этом случае решение контактной задачи теплопроводности сводится к следующему:

1) контактирующие тела приводятся к одному телу, состоящему из нескольких материалов с разными теплофизическими свойствами, с одной обобщенной областью и одной обобщенной границей;

2) в обобщенной области и на обобщенной границе разномодульного тела прикладывается тепловая нагрузка, отвечающая граничным условиям I, II и III родов;

3) находится решение задачи теплопроводности, при этом на границе раздела материалов, в случае необходимости, т. е. при неидеальном тепловом контакте, учитываются скачки температур, вводимые в условие (1).

Данный подход позволяет учитывать изменение температурного поля на границе двух тел, однако обстоятельство подбора коэффициентов проводимости стыка, осуществляемое относительно условий на обобщенной границе тел, ограничивает его использование.

Дальнейшее развитие представленного подхода стало возможным с применением численных методов и в особенности метода конечных элементов (МКЭ). Решение задачи в этом случае можно условно разделить на два типа.

Первый из них, названный в работе [1] «толщинным», основан на использовании свойств теплопроводности металло-воздушного слоя [2, 5], расположенного между поверхностями стыка деталей. КЭ-модель слоя построена посредством конечных элементов, подобных используемым для моделирования самих тел, но с измененными в них свойствами проводимости теплового потока. Данный подход вполне жизнеспособен, однако его применение в моделировании реальных конструкций сборных роторов сопряжено с рядом трудностей, обусловленных, главным образом, сложным характером деформирования рассматриваемого объекта, в особенности когда зона контакта изменяется в процессе нагружения конструкции или заранее неизвестна [3].

Второй тип моделирования условий контактной теплопроводности, условно названный «бестолщинным» [1, 3], связан с использованием для свойств проводимости стыка деталей некоторой полуэмпирической функции теплопроводности, включающей ее зависимость от контактного давления между контактными поверхностями [1] и, соответственно, между узловыми значениями КЭ-сетки контактирующих поверхностей.

Он основан на раздельном рассмотрении контактирующих тел, но в нем также используются выражения (1) и (2) – как граничные условия, характеризующие контактную тепловую нагрузку. Подход реализуется итерационной процедурой, основанной на последовательном решении обычных задач теплопроводности и последовательном удовлетворении тепловым контактным условиям. При этом на каждой последующей итерации на поверхности контакта тела нагружаются усред-

ненными значениями температур и тепловых потоков. Итерационная процедура продолжается до тех пор, пока на поверхности контакта не будут удовлетворены оба тепловых контактных условия – равенства температур и равенства тепловых потоков. Такой подход очень удобно реализовывать на основе метода конечных элементов (МКЭ). При этом глобальная система алгебраических уравнений для тел A и B выглядит следующим образом [1]:

$$\begin{bmatrix} [K_T^A] & 0 \\ 0 & [K_T^B] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{T^A\} \\ \{T^B\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{F_T^A\} \\ \{F_T^B\} \end{Bmatrix} = 0, \qquad (3)$$

где вектор $\{F_T\}$ содержит слагаемое $\{F_T^к\}$, обусловленное наличием контактной тепловой нагрузки.

В данной работе предлагается объединить оба представленных подхода, реализуемых на основе МКЭ, а также ввести дополнительное усовершенствование путем привлечения штрафных функций [3] для узлов, относящихся к телам A и B и находящихся на поверхностях контакта напротив друг друга. Пары этих узлов образуют контактный термический элемент (КТЭ). Данный прием привносит в методику расчета два дополнительных преимущества:

1) отпадает необходимость вычисления усредненных значений температур, вместо этого достаточно использовать лишь разность температур между контактирующими поверхностями;

2) путем применения разности температур появляется возможность учета величины термического сопротивления контакта $R_к$ исходя из соотношения

$$\Delta T = q\, R_к, \qquad (4)$$

где q – плотность теплового потока, Вт/м^2.

После введения штрафных функций общий вид схемы соединения элементов в глобальной матрице теплопроводимости $[K_T]$ и глобального вектор-столбца теплового потока $\{Q\}$ имеет следующий вид:

$$[K_T] = \begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & +\tilde{K}_T & \dots & -\tilde{K}_T & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & -\tilde{K}_T & \dots & +\tilde{K}_T & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix},$$

$$\{Q\} = \begin{Bmatrix} \dots \\ \pm\tilde{Q} \\ \dots \\ \mp\tilde{Q} \\ \dots \end{Bmatrix}, \qquad (5)$$

где $[\tilde{K}_T]$ – штрафные функции КТЭ, $[\tilde{Q}]$ – вектор теплового потока КТЭ. Значения $[\tilde{Q}]$ определяются по формуле

$$\tilde{Q} = K_T \cdot \Delta T\,. \qquad (6)$$

Энергетически члены выражений (5), модифицирующие одновременно матрицу $[K_T]$ и вектор-столбец $\{Q\}$, ничего в глобальную систему уравнений не привносят в силу применения знаков «+» и «–». Поэтому их допустимо определить как узловые штрафные величины (функции) теплового состояния рассматриваемой термической системы сборной конструкции. Определению оптимальных значений штрафных функций посвящено отдельное исследование. Цель использования этих функций – получение решения для задачи контактной теплопроводности в нагретых деформируемых телах сборной конструкции с учетом изменяющихся под воздействием работы внешних сил условий контактного теплообмена.

Расчет проводится с использованием итерационной процедуры. При этом на первой итерации в качестве разности температур ΔT принимается значение, близкое слева к величине температурного диапазона взаимодействующих тел. Этот температурный диапазон обязательно должен быть частью исходных данных при постановке контактной задачи теплопроводности. Такое значение разности температур соответствует некоторому относительно большому значению контактного термического сопротивления, при котором теплообмен между телами очень мал. В реальных сборных конструкциях теплообмен происходит даже между деталями, поставленными с зазором относительно друг друга, благодаря хотя бы воздушной прослойке. Использование значения ΔT, равного температурному диапазону, будет соответствовать абсолютному отсутствию теплообмена между телами, что является некорректной математической формулировкой физики процесса. С количественной точки зрения вопрос о задании начального значения ΔT не является принципиальным, поскольку не влияет на конечный результат итерационных вычислений. Таким образом, начальное значение ΔT можно рекомендовать принимать как 0,99 % от заданного температурного диапазона.

Результатом первой итерации имеем некоторое поле температур, или, с точки зрения МКЭ, – вектор-столбец $\{T\}$. Данный вектор-столбец, при известных значениях коэффициентов теплопроводности тел, позволяет найти величину плотности теплового потока, нормального к поверхности контакта

$$q = \frac{\lambda \cdot (T_i - T_j)}{l_{ij}}, \qquad (7)$$

где λ – теплопроводность одного из тел, Вт/м·К;

T_i, T_j – температуры в узлах i и j, принадлежащих одному из тел, °С;

l_{ij} – расстояние между узлами i и j, м.

В качестве узлов i и j целесообразно выбирать узлы вблизи поверхности контакта. Это объясняется снижением погрешности в определении теплового потока, проходящего через поверхность контакта. Следует также отметить, что для того, чтобы находимая плотность относилась к потоку, нормальному к поверхности контакта, необходимо, чтобы вектор $\vec{l}_{ij}$ был также направлен по нормали к этой поверхности, что достигается определенным размещением узлов вдоль поверхности контакта. При построении КЭ-сетки такое условие нетрудно выполнить, учитывая также необходимость построения эквидистантных сеток.

На каждой итерации перед тепловым расчетом проводится силовой расчет, результатом которого имеем поля перемещений и напряжений, в том числе поле давлений по поверхности контакта. Основываясь на экспериментальных кривых зависимости термического сопротивления от давления [3] и аппроксимируя эти кривые билинейной функцией [2], изображенной на рис. 1, находим значение термического сопротивления контакта. Подставляя плотность теплового потока и термическое сопротивление контакта в (4), находим ΔT, после чего расчет переходит на вторую итерацию. Вычисления проводятся до тех пор, пока разность между значениями ΔT (или q) на текущей и предыдущей итерациях не станет меньше сколь угодно малой заданной величины.

Использование представленного подхода с применением билинейной аппроксимации [3] экспериментальных кривых зависимости термического сопротивления от давления привносит в методику преимущество, заключающееся в простоте вычисления термического сопротивления контакта при изменении напряженно-деформированного состояния системы.

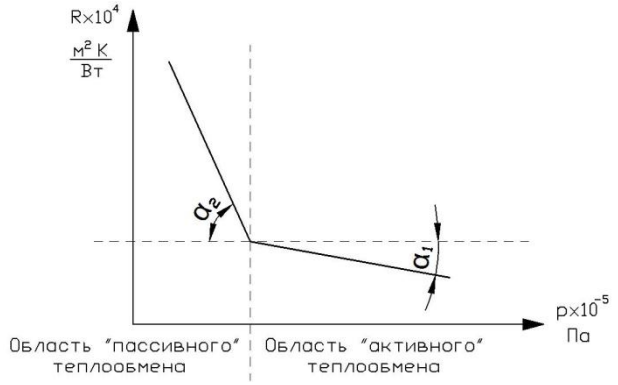


Рис. 1. Билинейная аппроксимация кривых зависимости термического сопротивления от давления

В качестве тестового примера рассматривается теплонапряженный контакт двух стержней постоянного сечения, представленных на рис. 2.

Граничные условия задачи приведены на этом же рисунке. Грань 9–10–11–12 одного из конечных элементов аппроксимации тела и грань 13–14–15–16 конечного элемента другого тела образуют стык. Термосопротивление этого стыка меняется в зависимости от давления на представленных гранях тел. Это контактное давление, в свою очередь, является следствием внешней силовой нагрузки. В рассматриваемом примере для большей наглядности нагрузка задается в виде равных сил, сосредоточенных в узлах 17, 18, 19, 20. Следует отметить, что внешней нагрузкой также могут быть силы инерции или силы теплового расширения, однако вид внешней нагрузки не влияет на принцип вычислений.

В исходном, не нагруженном внешней нагрузкой, состоянии стержни стыкуются с зазором 0,5 мм. При некоторой малой нагрузке F = 1 Н, что соответствует зазору между стержнями $\Delta \approx$ 0,5 мм, термическое сопротивление контакта является бесконечно большим (теплообменом излучением и конвективным теплообменом в пространстве зазора пренебрегаем). Поле температур пред-

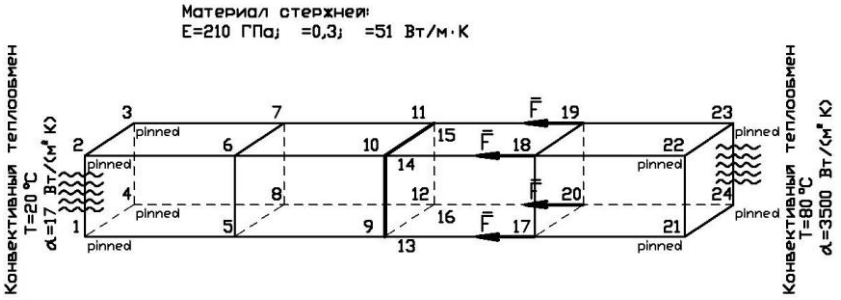


Рис. 2. Расчетная схема задачи о теплонапряженном контакте двух сплошных стержней

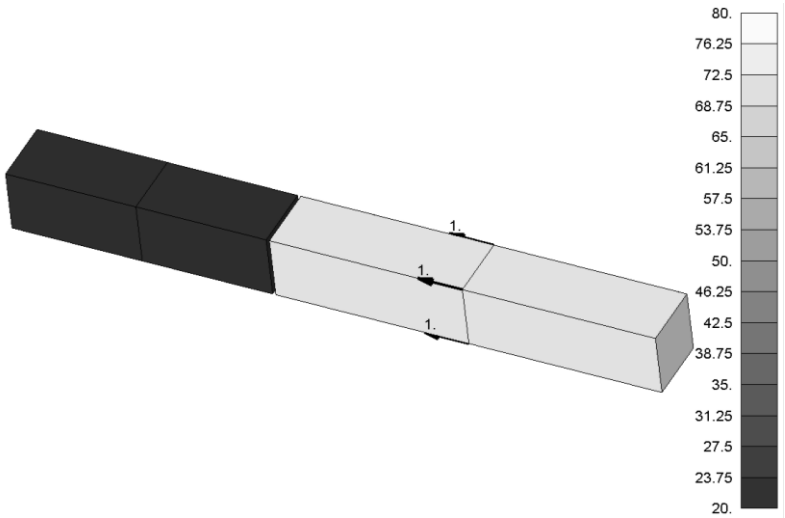


Рис. 3. Поле температур при контакте стержней с зазором, ºС

ставлено на рис. 3. Перепад температур в области стыка составляет 76 ºС.

Далее нагрузка была увеличена до значения F = 97543 Н, что привело к изменению условий сопряжения с «зазора» на «натяг» величиной $4{,}7 \cdot 10^{-6}$ мм с давлением p ≈ 50 кПа. Такое сопряжение допустимо назвать касанием, оно соответствует пассивному теплообмену [5], согласно экспериментальным кривым зависимости термического сопротивления от давления [4]. Полученное поле температур представлено на рис. 4. В области контакта стержней оно изменяется весьма плавно – с перепадом температур 0,25 ºС. Это можно объяснить тем, что эксперименты при получении используемых в данной работе кривых зависимости термического сопротивления от давления проводились в воздушной среде, что привело к относительно небольшим значениям термического сопротивления при касании по сравнению с задачей, где стержни сопрягаются с зазором и конвективный теплообмен в пространстве зазора не учитывается.

Затем нагрузка была увеличена до значения F = 100000 Н, что соответствует величине натяга Δ = 0,01 мм и давлению p ≈ 112,4 МПа, т.е. характер теплообмена можно считать активным. Поле температур представлено на рис. 5. Здесь перепад температур в контакте составляет 0,08 ºС.

Представленные выше результаты показаны на простейшей модели МКЭ. Это позволило провести подобные расчеты с использованием других представленных выше подходов и получит с ними полное согласование.

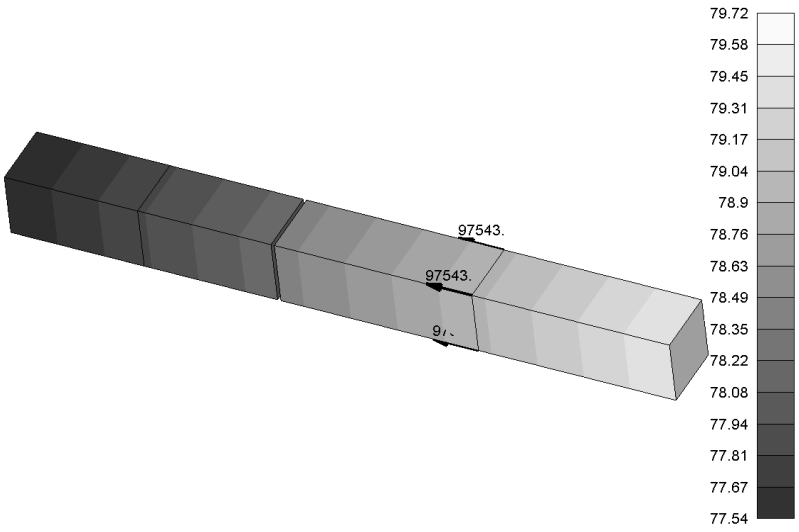


Рис. 4. Поле температур при контакте стержней с касанием, ºС

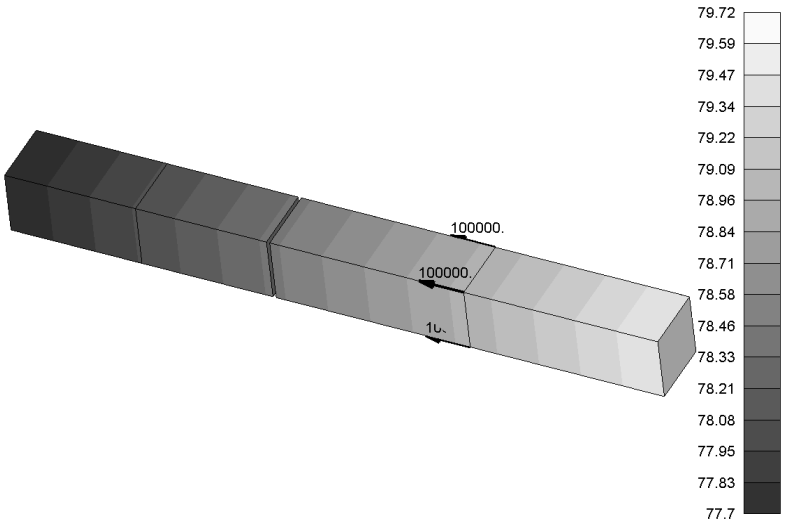


Рис. 5. Поле температур при контакте стержней с натягом, ºС

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Блох М. В., Оробинсткий А. В. К решению контактной задачи теплопроводности методом конечных элементов // Проблемы прочности. 1985. № 6. С. 77–82.
2. Гнучий Ю. Б. К решению контактных задач теории теплопроводности // Проблемы прочности. 1983. № 1. С. 104–107.
3. Пыхалов А. А., Милов А. Е. Контактная задача статического и динамического анализа сборных роторов турбомашин : моногр. Иркутск : ИрГТУ, 2007. 192 с.
4. Шлыков Ю. П., Ганин Е. А., Царевский С. Н. Контактное термическое сопротивление. М. : Энергия. 1977. 328 с.
5. Чайнов Н. Д., Заренбин В. Г., Иващенко Н. А. Тепломеханическая напряженность деталей двигателей. М. : Машиностроение. 1977. 154 с.
6. Юдаев Б. Н. Теплопередача : учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Высш. шк., 1981. 319 с. : ил.

УДК 519.142.1+512.643.8

Евсевлеева Лариса Геннадьевна,
канд. хим. наук, доцент, зав. кафедрой «Высшая математика», Ангарская государственная техническая академия
тел. (3955) 51-29-50, e-mail: cpk@myangarsk.ru

О ВЕРОЯТНОСТИ СВЯЗНОСТИ СЛУЧАЙНОГО ГРАФА

Evsevleeva L.G.

ON PROBABILITY OF RANDOM GRAPH CONNECTIVITY

Аннотация. *Рассмотрены случайные графы. Исследуется поведение случайной величины ξ – вершинной связности графа. Приводится явный вид распределения величины ξ, указываются условия сходимости к пуассоновскому распределению.*

Ключевые слова: *случайные графы, вероятность, вершинная связность.*

Abstract. *The author observes random graphs. The behavior of random graph quantity ξ – point graph connectivity is examined. Explicit form of quantity distribution ξ is given, convergence conditions to Poisson distribution are specified.*

Keywords: *random graphs, probability, point connectivity.*

Введение

Случайный граф $G_m(t)$ из m вершин определим следующими условиями [1, 2]:

1) в начальный момент времени $t = 0$ все вершины изолированы;

2) с течением времени между вершинами случайным образом устанавливаются связи (ребра) таким образом, что любая появившаяся в ка-

кой-то момент времени связь в дальнейшем не исчезает;

3) событие, состоящее в установлении связи между любыми двумя вершинами, не зависит от таких же событий, относящихся ко всем другим парам вершин;

4) если между двумя какими-то вершинами к моменту времени t связь не установлена, то вероятность того, что она появится в малом интервале времени

(t, t+Δt), равна *Δt+o(Δt)*.

Если отвлечься от эволюции графа $G_m(t)$ во времени, то в каждый фиксированный момент времени t граф $G_m(t)$ может быть определен так: $G_m(t)$ есть подграф полного G_m из m вершин, полученный путем случайного удаления ребер в G_m, так что каждое ребро независимо от всех других удаляется с вероятностью $q = e^{-t}$ и остается с вероятностью $p = 1 - e^{-t}$.

При изучении строения графа $G_m(t)$ в [2] было показано, что при $m \to \infty$ вероятность связности графа (когда эта вероятность отлична от нуля) асимптотически совпадает с вероятностью отсутствия в нем изолированных вершин.

Если $G_m(t)$ – случайный граф, то все его количественные характеристики становятся случайными величинами, законы распределения которых однозначно определяются законом образования графа $G_m(t)$. Фактически нет разницы, как измерять силу связности графа $G_m(t)$ – с помощью вершинной или реберной связности [3]. Учитывая это, в дальнейшем будем говорить, просто о силе связности графа $G_m(t)$, понимая под этим вершинную связность ξ Пусть ξ, согласно [3], обозначает наименьшее число вершин, удаление которых приводит к несвязному графу.

В настоящей работе приводится явный вид распределения величины ξ, указываются условия сходимости к пуассоновскому распределению.

Асимптотическое поведение силы связности графа $G_m(t)$

Рассмотрим событие $\{\xi = n\}$; если оно осуществляется, то это, в частности, означает следующее: в графе $G_m(t)$ можно выделить n вершин, при удалении которых он распадется на некоторое число компонент. Определим через p_j вероятность того, что граф, образованный n фиксированными вершинами и соединяющими их ребрами, будет в момент времени t связным.

Если случайный граф образуется в соответствии с указанной схемой, то распределение вероятностей случайной величины ξ имеет вид [4]:

$$P\{\xi = n\} = A_{n-1}^{m-1} \prod_{j=0}^{n-1} p_j \,. \qquad (1)$$

Здесь A_{n-1}^{m-1} – обобщенные числа Стирлинга 2-го рода. Эти числа удовлетворяют рекуррентной формуле

$$A_n^m = A_{n-1}^{m-1} + q_n A_n^{m-1}, \; m = \overline{1,\infty}, \; n = \overline{1,\infty},$$

причем полагают: $A_m^m = 1$, $m = \overline{1,\infty}$, $A_n^m = 0$, если $m < n$ или $n < 0$.

Заметим, что согласно [5] производящая функция для чисел A_{n-1}^{m-1} имеет вид:

$$A_n(t) = \sum_{m=n}^{\infty} A_n^m t^m = t^n \prod_{j=0}^{n} (1 - q_j t)^{-1}, \quad t \neq q_j^{-1}, \; j = \overline{0,n}. \qquad (2)$$

Предположим, что вероятности p_j и q_j, участвующие в распределении (1), меняются вместе с n: $p_j = p_j^{(n)}$, $q_j = q_j^{(n)} = 1 - p_j^{(n)}$. Тогда это распределение можно записать в виде [2]:

$$P\{\xi = n\} = P\{\xi\, n = m\} = A_{n-1}^{m-1} \prod_{j=0}^{n-1} p_j^{(n)} \,. \qquad (3)$$

Утверждение. *Если случайный граф $G_m(t)$ формируется по вышеуказанной схеме, то для того что бы при $n \to \infty$ в момент времени $t \to 0$*

$$P\{\xi = n\} \to \frac{\lambda^n}{n!} e^{-\lambda}, \; 0 < \lambda < \infty,$$

необходимо и достаточно:

$$\max_{0 \le j \le n-1} q_j^{(n)} \to 0 \text{ и } \sum_{j=0}^{n-1} q_j^{(n)} \to \lambda \,.$$

Доказательство построим на применении теоремы о непрерывности производящих функций [4].

Производящая функция распределения (3), согласно (2), запишется:

$$P_n(t) = \sum_{n=0}^{\infty} P\{\xi = n\} t^n = \prod_{j=0}^{n-1} \frac{1 - q_j^{(n)}}{1 - q_j^{(n)} t} \,. \qquad (4)$$

Прологарифмируем (4):

$$\ln P_n(t) = \sum_{j=0}^{n-1} \ln(1 - q_j^{(n)}) - \sum_{j=0}^{n-1} \ln\left(1 - q_j^{(n)} t\right). \qquad (5)$$

При $\max\limits_{0 \le j \le n-1} q_j^{(n)} \to 0$ и любом $0 \le t < 1$ [6]:

$$\ln\left(1 - q_j^{(n)}\right) \to -q_j^{(n)} + o\left(q_j^{(n)}\right)$$

и

$$\ln\left(1 - q_j^{(n)} t\right) \to -q_j^{(n)} t + o\left(q_j^{(n)}\right). \qquad (6)$$

Следовательно,

$$\ln P_n(t) = \sum_{j=0}^{n-1} q_j^{(n)} + o\left(\sum_{j=0}^{n-1} q_j^{(n)}\right). \quad (7)$$

Учитывая условия утверждения $\sum_{j=0}^{n-1} q_j^n \to \lambda$, имеем:

$$\ln P_n(t) \to \lambda(t-1), \quad (8)$$

или

$$P(t) \to \lim_{n\to\infty} P_n(t) = e^{\lambda(t-1)}. \quad (9)$$

В (9) правая часть есть производящая функция Пуассона [4], то есть

$$\sum_{r=0}^{\infty} e^{-\lambda} \frac{\lambda^n}{n!} = e^{-\lambda+\lambda t}. \quad (10)$$

Согласно теореме о непрерывности производящих функций [3], имеем, что стремление производящей функции распределения (4) к производящей функции распределения Пуассона обеспечивает стремление распределения (1) к распределению Пуассона.

В заключение приведем некоторые качественные соображения о структуре графа $G_m(t)$. В полном графе G_m каждая вершина связана с другими *m–1* ребрами. В графе $G_m(t)$ часть этих ребер удаляется. Число этих ребер случайно и распределено по биномиальному закону с параметрами *m–1* и $p = 1 - e^{-t}$. Если *m* и *t* меняются таким образом, что $m\to\infty$ и $t\to 0$, то в пределе число ребер, примыкающих к данной точке или, что то же, число вершин, непосредственно с ней связанных, распределено по закону Пуассона с параметром λ. Каждая из этих «соседних» точек в свою очередь связана со случайным числом вершин, распределенных опять-таки, по закону Пуассона и т. д. Ясно, что в графе $G_m(t)$ все эти вершины принадлежат одной компоненте. Таким образом, в первом приближении, отправляясь от любой вершины, можно представлять себе, что содержащая ее компонента образована «потомками» одной частицы – вершины – в ветвящемся процессе Гальтона – Ватсона [7]. При $\lambda < 1$ среднее число потомков одной частицы меньше единицы и с вероятностью 1 процесс вырождается. При этом можно ожидать, что все компоненты будут деревьями с небольшими числами вершин. Если $\lambda > 1$, то ветвящийся процесс с положительной вероятностью не вырождается. В графе $G_m(t)$ невырожденности процесса, начинающегося с некоторой вершины, должен отвечать тот факт, что эта вершина принадлежит «большой» компоненте. Поэтому при $\lambda > 1$ следует ожидать появления «больших» компонент или одной большой компоненты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колчин В. Ф. Случайные графы. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004. 256 с.
2. Евсевлеева Л. Г., Кузьмин О. В.Случайные графы в изучении химических реакций в условиях потока // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2010. № 3 (27). С. 175–179.
3. Харари Ф. Теория графов. М. : Мир, 1973. 293 с.
4. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. М. : Мир, 1984. Т. 1. 528 с.
4. Кузьмин О. В. Комбинаторные методы моделирования дискретных распределений. Иркутск. : Изд-во Иркут. гос. ун-та. 2006. 138 с.
5. Де Брейн Н. Г. Асимптотические методы в анализе. М. : Мир, 1987. 245 с.
6. Кузьмин О. В. Обобщенные пирамиды Паскаля и их приложения. Новосибирск : Наука, 2000. 289 с.

УДК 621.926

Свиридов Дмитрий Петрович,
старший преподаватель кафедры УАТ
Ангарской государственной технической академии, тел. (3955)52-23-88, e-mail: dmitriy999@inbox.ru
Семенов Иван Александрович,
к. т. н., доцент кафедры ХТТ Ангарской государственной технической академии, тел. (3955)52-23-88
Ульянов Борис Александрович,
д. т. н., профессор кафедры ХТТ Ангарской государственной технической академии, тел. (3955)52-23-88

ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ КАВИТАЦИОННОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

D.P. Sviridov, I.A. Semenov, B.A. Ulyanov

ENERGY PERFORMANCE OF CAVITATION GRINDING

Аннотация. *Рассмотрен способ вычисления энергетического КПД процесса измельчения. Предложена методика расчета кавитационного измельчителя.*

Ключевые слова: *измельчение, кавитация.*

Abstract. *Calculation of energy efficiency koefficient for cavitation grinding process is discussed. Method of cavitaion grinder design is suggested.*

Keywords: *grinding, cavitation.*

Затраты энергии на измельчение материалов являются одним из важнейших параметров процесса, от которого зависят экономические показатели и, в конечном счете, целесообразность использования того или другого способа измельчения. Общие затраты энергии на проведение процесса обычно легко поддаются оценке и измерению. Однако не вся затраченная энергия расходуется на достижение заданной степени измельчения. Часть энергии неизбежно теряется на перемещение инертной среды и измельчаемого материала, на преодоление сопротивлений привода и т. д. [4].

Авторами рассмотрены закономерности ультразвукового кавитационного измельчения и выполнена оценка энергетической эффективности этого процесса на примере скорлупы кедрового ореха, которая в измельченном виде может использоваться для получения ценных пищевых продуктов.

Исследование процесса измельчения скорлупы ореха в условиях воздействия мощного ультразвука, приводящего к возникновению кавитации, проводилось на установке, принципиальная схема которой представлена на рис. 1. Установка включала в себя ультразвуковой генератор 1 (УЗГ 3–4), ванну 2, и магнитострикционный преобразователь 3 со звуковой мощностью 1 кВт и номинальной частотой излучения 22 кГц. Для предотвращения нагрева преобразователя было предусмотрено его водяное охлаждение 4.

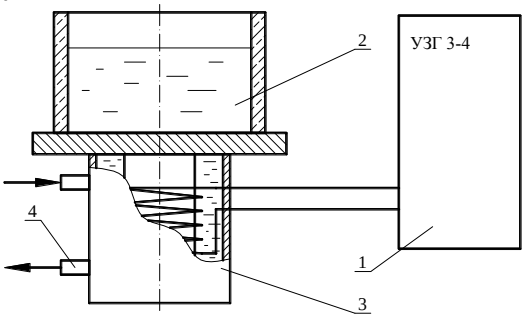


Рис. 1. Схема установки для обработки взвеси ультразвуком

Скорлупа подвергалась первичному механическому измельчению в роторной мельнице с последующим определением гранулометрического состава образовавшейся взвеси.

Вследствие малых размеров частиц и небольшой разности плотностей среды и материала, использование известных методов анализа гранулометрии оказалось неэффективным. Это обстоятельство побудило к разработке нового способа определения гранулометрического состава измельчаемого материала путем осаждения частиц в поле центробежных сил [2, 3]. Жидкость, содержащая взвешенные частицы, через канал 1 поступала в успокоительную камеру быстро вращающегося осадителя 2 (рис. 2) и под напором перемещалась вверх к каналу отвода фугата. Частицы под действием центробежных сил осаждались на осадительную пластинку 3. Причем более крупные располагались ближе к входу суспензии, а мелкие – ближе к выходу фугата. После этого осади-

тельную пластину вместе с осадком извлекали, осадок разделяли на фракции. Фракции взвешивали и путем микроскопирования измеряли размеры частиц в каждой из них. Это позволяло установить распределение частиц по размерам. Способ и устройство для определения гранулометрического состава защищены патентами РФ.

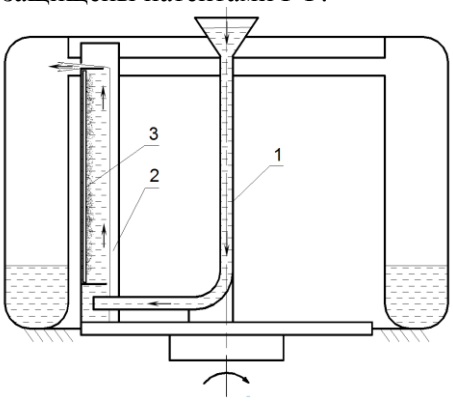


Рис. 2. Принципиальная схема осадителя

Было установлено, что распределение частиц по размерам в механически измельченном материале близко нормальному закону (кривая 1 на рис. 3).

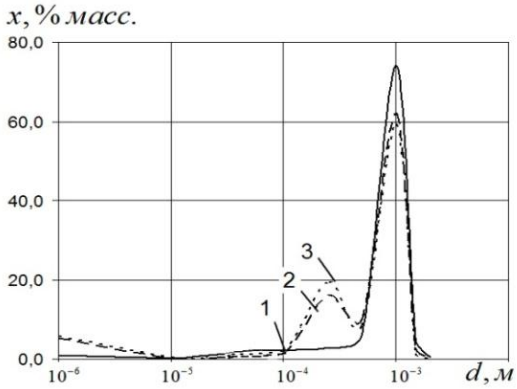


Рис. 3. Распределение частиц по размерам: 1 – исходная проба материала; 2, 3 – после ультразвуковой обработки 10 и 20 минут соответственно

После этого пробы материала смешивались с дистиллированной водой, помещались в ультразвуковую ванну и производился запуск ультразвукового генератора.

В ходе экспериментов исследовалась зависимость эффективности процесса измельчения от продолжительности обработки, которая оценивалась по гранулометрическому составу обработанных ультразвуком проб (кривые 2, 3 на рис. 3).

Было установлено, что с увеличением продолжительности обработки гранулометрический состав постепенно смещается в сторону фракций с меньшим размером частиц. Кроме того, было отмечено, что процесс кавитационного измельчения протекает неравномерно, приводя к постепенному росту массовой доли фракции со средним размером частиц ~ 250 мкм.

Устойчивость частиц такого размера можно объяснить, исходя из механизма кавитационного измельчения. Известно, что разрушение частиц при кавитации происходит с помощью ударных волн и микроструек, образующихся при схлопывании пузырьков. Первый из этих эффектов проявляется в том случае, если размер кавитационного пузырька превосходит размеры измельчаемых частиц, а второй – напротив, когда пузырек значительно меньше частицы.

Размеры кавитационного пузырька, до которого он растет под воздействием ультразвука, называется резонансным. Средний резонансный радиус пузырька R_P может быть приближенно оценен из уравнения:

$$f = \frac{1}{2\pi R_P}\sqrt{\frac{3\gamma}{\rho_Ж}\left(\mathrm{P}_0 + \frac{2\sigma}{R_\mathrm{P}}\right)}, \qquad (1)$$

где f – частота ультразвука, Гц; R_P – резонансный радиус, м; P_0 – внешнее давление, Па; σ – поверхностное натяжение, Н/м; $\rho_Ж$ – плотность жидкости, кг/м^3; γ – показатель политропы.

Решение (1) относительно R_P представляет собой кубическое уравнение

$$\frac{4}{3}\frac{\pi^2 f^2 \rho_Ж}{\gamma} R_P^3 - P_0 R_P - 2\sigma = 0. \qquad (2)$$

Для расчета резонансного размера пузырька взяты условия эксперимента, а именно f = 22 кГц, $\rho_Ж$ = 998 кг/м^3, P_0 = 1,013·10^5 Па, σ = 72,8·10^{-3} Н/м, так как рост и схлопывание пузырька протекает с огромной скоростью. Поэтому можно допустить, что процесс образования и разрушения пузырька протекает адиабатически, и принять показатель γ равным показателю адиабаты трехатомного газа (γ = 1,333).

Решение уравнения (2) для указанных условий имеет три действительных корня R_P : –145,05 мкм; –1,437 мкм; 146,5 мкм. Отрицательные значения радиусов не имеют физического смысла, поэтому в качестве решения принимаем единственное оставшееся значение радиуса R_P= 146,5 мкм и, соответственно, d = 293 мкм.

Частицы размером ~ 250 мкм оказываются соизмеримы с размерами генерируемых пузырьков, и оба механизма разрушения становятся малоэффективными. Полученный результат позволяет рекомендовать для ультразвуковой кавитационной обработки взвеси с размерами частиц не более 250 мкм.

Для оценки энергетической эффективности ультразвукового кавитационного измельчения определена полезная работа, затрачиваемая на измельчение материала исходных частиц до размера, обеспечивающего кинетическую устойчивость взвеси:

$$A_{ПОЛ} = \Delta S \cdot a, \qquad (3)$$

где ΔS – изменение поверхности частиц, связанное с уменьшением их размера, м^2; α – удельная работа, затрачиваемая на образование 1 м^2 поверхности, Дж/м^2.

Изменение поверхности частиц ΔS определялось по убыли массы исходной фракции, среднему размеру частиц в исходной смеси и диаметру частиц, обеспечивающих устойчивую взвесь (1,5 мкм). Энергия, затрачиваемая на более тонкое измельчение, считалась непроизводительной и относилась к потерям. Величина удельной работы принималась равной $\alpha = 2600$ Дж/м^2.

Если принять диаметр частиц равный d_∞ = 1,5 мкм как предел измельчения, то увеличение поверхности ΔS можно представить состоящим из двух составляющих: поверхности образовавшихся частиц размерами 1,5 мкм ΔS_1 и изменения поверхности более крупных частиц ΔS_2:

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2. \qquad (4)$$

Поверхность частиц диаметром d_∞ может быть рассчитана по уравнению:

$$\Delta S_1 = \frac{6\,m}{d_\infty \rho_ч}\ , \qquad (5)$$

где $\rho_ч$ – плотность измельчаемого материала, кг/м^3.

Массу мелких частиц m можно определить как разность массы крупных частиц до измельчения и после измельчения m_2.

Допуская, что крупные частицы так же имеют шарообразную форму, изменение их поверхности может быть рассчитано по уравнению:

$$\Delta S_2 = \frac{6}{\rho_ч}\left(\frac{m_2}{d_{CP2}} - \frac{m_1}{d_{CP1}}\right), \qquad (6)$$

где d_{CP1} и d_{CP2} – средние диаметры крупных частиц до и после кавитационного измельчения соответственно, м.

Средний энергетический КПД рассчитывался как отношение полезной работы измельчения к энергии, затраченной на обработку среды ультразвуком, т. е. к энергии, потребленной из сети электроснабжения:

$$\eta = A_{ПОЛ} / E\,. \qquad (7)$$

С учетом ур. (4–7) величину η можно выразить следующим уравнением:

$$\eta = \frac{6a}{\rho_ч}\left(\frac{m_1 - m_2}{d_ч} + \frac{m_2}{d_{CP2}} - \frac{m_1}{d_{CP1}}\right) / E\,. \qquad (8)$$

На рис. 4 показана зависимость полезной работы и КПД от продолжительности ультразвуковой обработки.

Видно, что процесс ультразвукового измельчения имеет низкую эффективность. Кроме того, длительное воздействие кавитации приводит к уменьшению КПД.

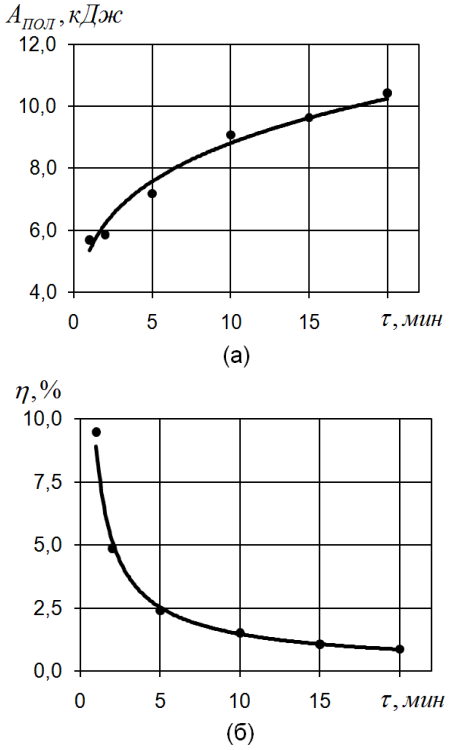


Рис. 4. Зависимость полезной работы (а) и энергетического КПД (б)от продолжительности ультразвуковой обработки материала

Снижение эффективности процесса измельчения можно объяснить тем, что со временем образуются частицы размерами меньше 1,5 мкм, а, по определению, энергия на их образование относится к потерям. Другой причиной снижения КПД является изменение формы частиц в процессе обработки. Выполненное нами микроскопирование показало, что продолжительная обработка приводит к выравниванию поверхности. Частицы принимают более гладкую и округлую форму и становятся более устойчивыми к кавитационному воздействию. В этой связи целесообразно сочетание кавитационной обработки с механическим измельчением.

Для осуществления процесса диспергирования в условиях акустической кавитации разработан диспергатор [1], который предусматривает возможность регулирования расхода обрабатываемой среды и времени воздействия облучения. Он состоит из источника излучения 1, корпуса 2, опоры 3, лабиринта 4, крышки 5, штуцеров подвода и отвода обрабатываемой среды 6 и 7 (рис. 5).

Обрабатываемый продукт поступает через входной штуцер, начинает движение по каналам, образованным стенками лабиринта и излучающей поверхностью, подвергаясь при этом ультразвуковому облучению на протяжении всего времени нахождения в лабиринте. Оперируя с помощью запорной арматуры высотой слоя продукта и скоростью ее движения, осуществляют регулировку интенсивности обработки при заданном значении

расхода. На конструкцию диспергатора получен патент РФ.

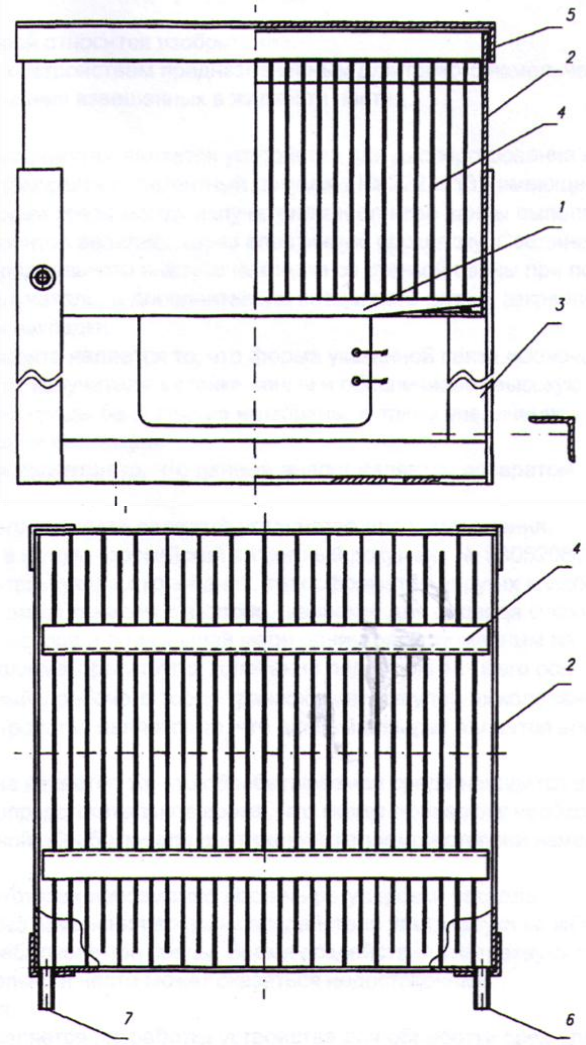


Рис. 5. Диспергатор ультразвуковой лабиринтный (вид сбоку и вид сверху)

Важно, чтобы ультразвуковой диспергатор проектировался и работал в резонансе с обрабатываемой средой, при котором эффективность процесса достигает своего максимального значения. При поиске этих условий нами использован критерий эрозийной активности χ:

$$\chi = \frac{R_{MAX}^3}{R_{MIN}^3 \Delta\tau f}, \qquad (9)$$

где R_{MAX}, R_{MIN} – максимальный радиус кавитационного пузырька в фазе роста и минимальный – при схлопывании соответственно, м; $\Delta\tau$ – продолжительность фазы схлопывания пузырька, с; f – частота ультразвука, Гц.

Величина R_{MAX} определялась путем моделирования фазы роста пузырька с помощью уравнения:

$$\left[R\frac{d^2R}{d\tau^2}+\frac{3}{2}\left(\frac{dR}{d\tau}\right)^2+4\mu\frac{dR}{d\tau}\right]\rho_{Ж}-\left[\left(P_0-P_{П}+\frac{2\sigma}{R_0}\right)\left(\frac{R_0}{R}\right)^3+P_{П}-\frac{2\sigma}{R_0}\right]- \qquad (10)$$
$$-P_A Sin(2\pi f\tau)+P_0=0.$$

Радиус зародыша пузырька R_0, который служил также начальным условием при решении ур. (10), определялся по уравнению:

$$R_0=\frac{4}{3}\frac{\sigma}{(0{,}7P_A+P_{П}-P_0)}, \qquad (11)$$

где P_0 и $P_{П}$ – внешнее давление и давление паров воды, Па; μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с; σ – поверхностное натяжение, Н/м.

Максимальное акустическое давление рассчитывалось по уравнению:

$$P_A = 2\pi f \rho c A, \qquad (12)$$

где c – скорость звука в воде (c = 1485 м/с); A – амплитуда звуковой волны, м.

Максимальное значение радиуса пузырька R_{MAX} и время окончания фазы роста τ_{MAX} определялось из тех соображений, что в точке максимума производная $dR/d\tau$ становится равной нулю.

Фаза схлопывания кавитационного пузырька моделировалась с помощью уравнения:

$$\left[R\frac{d^2R}{d\tau^2}+\frac{3}{2}\left(\frac{dR}{d\tau}\right)^2+4\mu\frac{dR}{d\tau}\right]\rho_{Ж}-$$
$$-\left[\left(P_0-P_{П}+\frac{2\sigma}{R_0}\right)\left(\frac{R_0}{R_{МАКС}}\right)^3+P_{П}\right]\left(\frac{R_{МАКС}}{R}\right)^{3\gamma}+ \qquad (13)$$
$$+\frac{2\sigma}{R}-P_A Sin(2\pi f\tau)+P_0=0,$$

где γ – показатель адиабаты ($\gamma = 1{,}333$).

Начальными условиями для уравнения (13) были: $\tau = \tau_{MAX}$; $R = R_{MAX}$; $dR/d\tau = 0$.

Решение осуществлялось в математическом пакете MathCAD методом Рунге – Кутта 4-го порядка с автоматическим изменением шага интегрирования.

На рис. 6 представлен график изменения радиуса кавитационного пузырька во времени при f = 22·10^3 Гц и A = 4·10^{-6} м (R_{MAX} = 456,8 мкм, R_{MIN} = 6,3 мкм, $\Delta\tau$ = 15,1 мкс). Значение критерия эрозийной активности, рассчитанное по ур. (9): χ = 1,159 ·10^6.

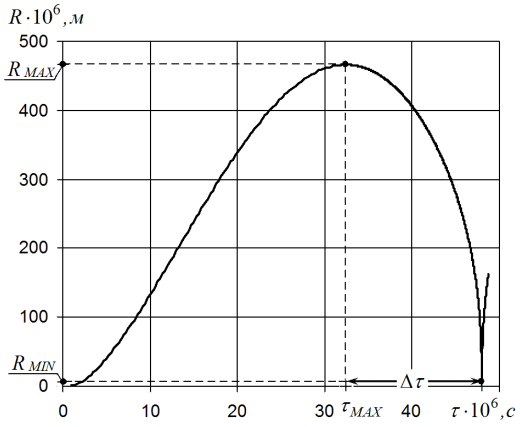


Рис. 6. Изменение радиуса кавитационного пузырька во времени

Аналогичные расчеты были выполнены для других частот и амплитуд колебаний. При этом были получены различные уровни критерия χ (рис. 7). Полученные данные позволили получить соотношение между амплитудой и частотой колебаний, при котором критерий эрозийной активности достигает максимального значения:

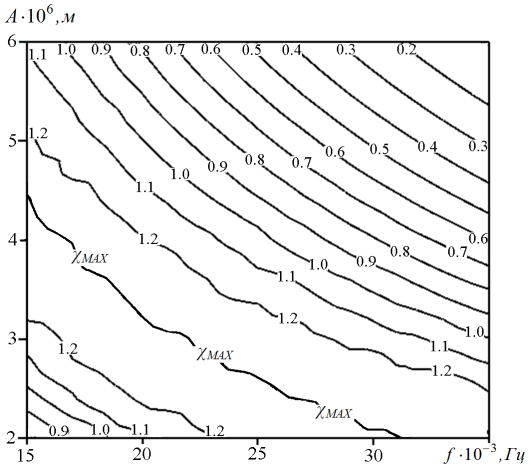


Рис. 7. Уровни критерия $\chi \cdot 10^{-6}$ при различных частотах и амплитудах колебаний

$$A \cdot f = 6{,}538 \cdot 10^{-2}. \qquad (14)$$

Ур. (14) справедливо для частот f от 15 кГц до 32 кГц и может быть использовано при проектировании ультразвуковых диспергаторов. На его основе определено оптимальное значение интенсивности ультразвука, которое для воды составило I = 62,53 кВт/м^2.

На рис. 8 представлена блок-схема проектного расчета ультразвукового кавитационного диспергатора.

Результаты расчета излучающей поверхности и затрачиваемой мощности на производительность по продукту (кедровому молоку) V = 200 л/сут представлены в таблице 1.

Видно, что при увеличении размера частиц исходного материала с 10 мкм до 100 мкм величина излучающей поверхности возрастает с 700 см^2 до 810 см^2, а затрачиваемая мощность – с 17,4 кВт до 20,1 кВт.

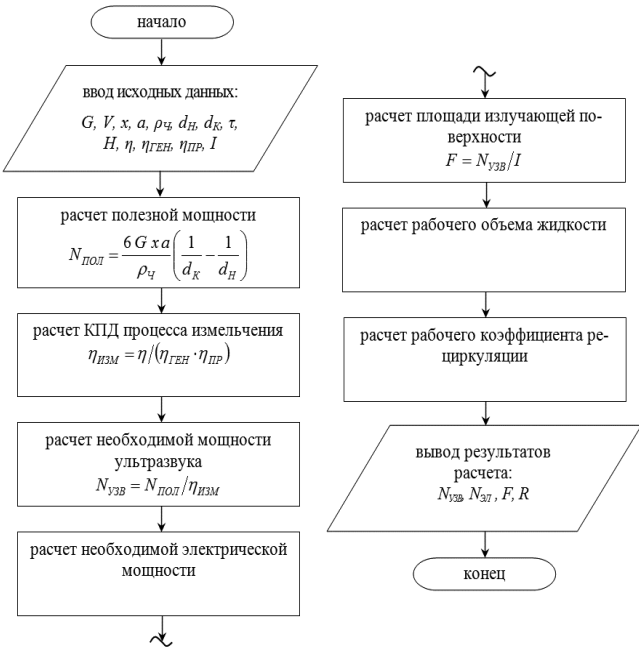


Рис. 8. Блок-схема проектного расчета ультразвукового кавитационного диспергатора

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патент RU 2325231 C2 МПК B02C 19/18. Гомогенизатор ультразвуковой лабиринтный / Свиридов Д. П., Ульянов Б. А., Сучков Д. Н., Кущин А. А. 2008. Бюл. № 11.
2. Патент RU 2322306 C2, МПК B04B 11/00. Центрифуга с регулируемым отбором продуктов разделения / Свиридов Д. П., Ульянов Б. А., Сучков Д. Н., Кущин А. А. 2008. Бюл. № 11.
3. Определение гранулометрического распределения частиц во взвесях / Свиридов Д. П., Семенов И. А., Ульянов Б. А, Сучков Д. Н. // Химия химические технологии. Техническая кибернетика : сб. науч. тр. Ангарск : АГТА, 2008. С. 97–101.
4. Ультразвуковая технология / Агранат Б. А., Башкиров В. И., Китайгородский Ю. И., Хавский Н. Н. М. : Металлургия, 1974. 504 с.

Таблица 1

Параметры ультразвукового диспергатора при измельчении скорлупы ореха кедрового до размера частиц d_∞ = 1,5 мкм

Размер частиц исходного материала d_H, мкм	10	20	40	60	100
Мощность ультразвука $N_{УЗВ}$, кВт	4,4	4,7	4,9	5,0	5,1
Затрачиваемая мощность $N_{ЭЛ}$, кВт	17,4	18,9	19,7	20,0	20,1
Излучающая поверхность F, м^2	0,07	0,076	0,079	0,08	0,081
Коэффициент рециркуляции R	14,0	15,4	16,0	16,3	16,4

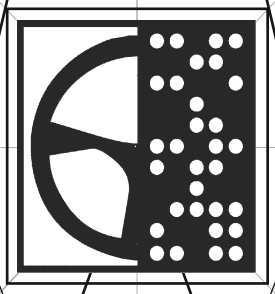
Министерство образования и науки Российской Федерации
Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта

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

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование



Раздел 2.

Информатика, вычислительная техника и управление. Приборостроение. Метрология. Информационно-измерительные приборы и системы

ОСНОВНЫМИ НАУЧНЫМИ НАПРАВЛЕНИЯМИ ЖУРНАЛА ЯВЛЯЮТСЯ:

- математика и механика;
- электроника, измерительная техника, радиотехника и связь;
- энергетика, электрификация и энергетическое машиностроение;
- машиностроение;
- строительство и архитектура;
- транспорт;
- управление, вычислительная техника и информатика;
- экономика и управление.

УДК 551.326.85

Паршин Александр Вадимович,
аспирант Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, e-mail:lsarhin@rambler.ru
Руш Елена Анатольевна,
д. т. н., профессор, зав. кафедрой «Безопасность жизнедеятельности и экология»
Иркутского государственного университета путей сообщения
тел. (3952) 63-83-52, e-mail: lrush@mail.ru
Спиридонов Александр Михайлович,
д. г.-м. н. профессор, зам. директора Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН
e-mail: spiridonov@igk.irk.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ОЗЕРА БАЙКАЛ С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ГИС И WEB-ТЕХНОЛОГИЙ

A.V. Parshin, E.A. Rush, A.M. Spiridonov

AUTOMATION OF PROVIDING PROCESS FOR LAKE BAIKAL ECOLOGICAL MONITORING ON THE BASE OF MODERN GIS AND WEB TECHNOLOGIES

Аннотация. *Приведены результаты исследований по автоматизации процесса обеспечения экологического мониторинга озера Байкал на основе использования ГИС и web-технологий в целях решения задач защиты окружающей среды.*

Ключевые слова: *геоинформационные системы, база данных, экологический мониторинг.*

Abstract. *The results of studies in automation providing process for Lake Baikal monitoring on the base of GIS and Web-technologies for the decision of environment protection tasks are considered.*

Keywords: *geo-informational systems, database, ecological monitoring.*

Государственный мониторинг водных объектов является типовой задачей природопользования и осуществляется на всей территории Российской Федерации. При рассмотрении уникального природного объекта – озера Байкал организация системы мониторинга становится особенно актуальной и сложной задачей.

Как известно, Байкал является крупнейшим в мире пресным озером, его берега представлены уникальными по своей живописности ландшафтами, требующими своего сохранения в естественном виде, согласно Конвенции об охране всемирного культурного и природного наследия ЮНЕСКО и природоохранному законодательству Российской Федерации. Для оперативного получения всесторонней и достоверной информации о состоянии экосистемы озера Байкал необходимо формирование системы мониторинга, адекватной по своей полноте и научно-техническому уровню, и степени ответственности за сохранность уникальной экосистемы озера Байкал [1, 2, 3].

Озеро Байкал характеризуется рядом особенностей, которые не только делают его уникальным природным объектом, но и затрудняют осуществление наблюдений за состоянием его экосистемы. Такие особенности, как большие линейные размеры, отсутствие каких-либо коммуникаций на большой протяженности береговой линии, суровые природные условия (сильные ветры, шторма), вода с низкими фоновыми концентрациями большинства химических элементов, предъявляют повышенные требования к надежности и чувствительности используемого оборудования, программному обеспечению, обслуживающему персоналу. Создание как самой системы мониторинга, так и технических средств для ее осуществления, является важной хозяйственной и научной задачей.

Информация о состоянии и динамике биологических компонентов экосистем позволяет понять причинно-следственные связи в таких комплексах, как абиотические – биотические составляющие природной среды и антропогенные факторы – окружающая среда. Многолетний опыт

научно-исследовательских организаций, вовлеченных в экологический мониторинг экосистемы озера Байкал, позволяет утверждать, что для достижения его главной цели – предотвращения неблагоприятных последствий изменения состояния окружающей природной среды необходимо осуществлять мониторинг биотических сообществ, входящих в состав экологических систем, с обязательным изучением гидрохимических свойств водных акваторий [2].

В настоящее время гидрохимические наблюдения за акваторией озера Байкал осуществляет подразделение Министерства природных ресурсов РФ – ФГУ «Востсибрегионводхоз».

Эти картограммы являются основой ежегодных «Аналитических отчетов о результатах наблюдений за состоянием каскада Ангарских водохранилищ и озера Байкал» и, кроме того, должны быть переданы заинтересованным службам и ведомствам в максимально короткий срок после окончания рейса. Однако следует отметить, что представленные на рис. 1 картограммы не могут быть получены при использовании ПО корабельного комплекса. Обработка данных осуществляется за пределами судна обычными пользовательскими ГИС, поскольку программное обеспечение комплекса «Акватория-Байкал» не обладает требуемой на данный момент функциональностью.

В период 2001–2009 г.г. обработка данных производилась раз в год, по окончании сезона работ перед выпуском отчета. Фактически в указанное время система не позволяла эффективно решать основные задачи программы мониторинга: своевременное выделение и прогнозирование развития негативных процессов, а также оперативное уведомление необходимых ведомств.

В 2010 году были получены данные, позволяющие четко сформулировать требования к корабельной системе для осуществления экологического мониторинга, в связи с чем ФГУ «Востсибрегионводхоз» было принято решение о модернизации как программной, так и аппаратной частей комплекса.

В настоящее время наиболее удобным инструментом для получения, хранения, визуализации и анализа пространственно распределенной информации являются географические информационные системы (ГИС). При этом под термином «геоинформационная система» подразумевается не программное средство – визуализатор базы данных (БД), а комплекс программно-аппаратных средств, служащий для сбора, хранения, обработки и выдачи пространственно распределенных данных. Структура разработанной нами ГИС для мониторинга водных объектов представлена на рис. 2.

Современная корабельная система для ведения гидрохимического мониторинга должна осуществлять: получение данных с приборов; получение координат с GPS-ресивера; хранение полу-

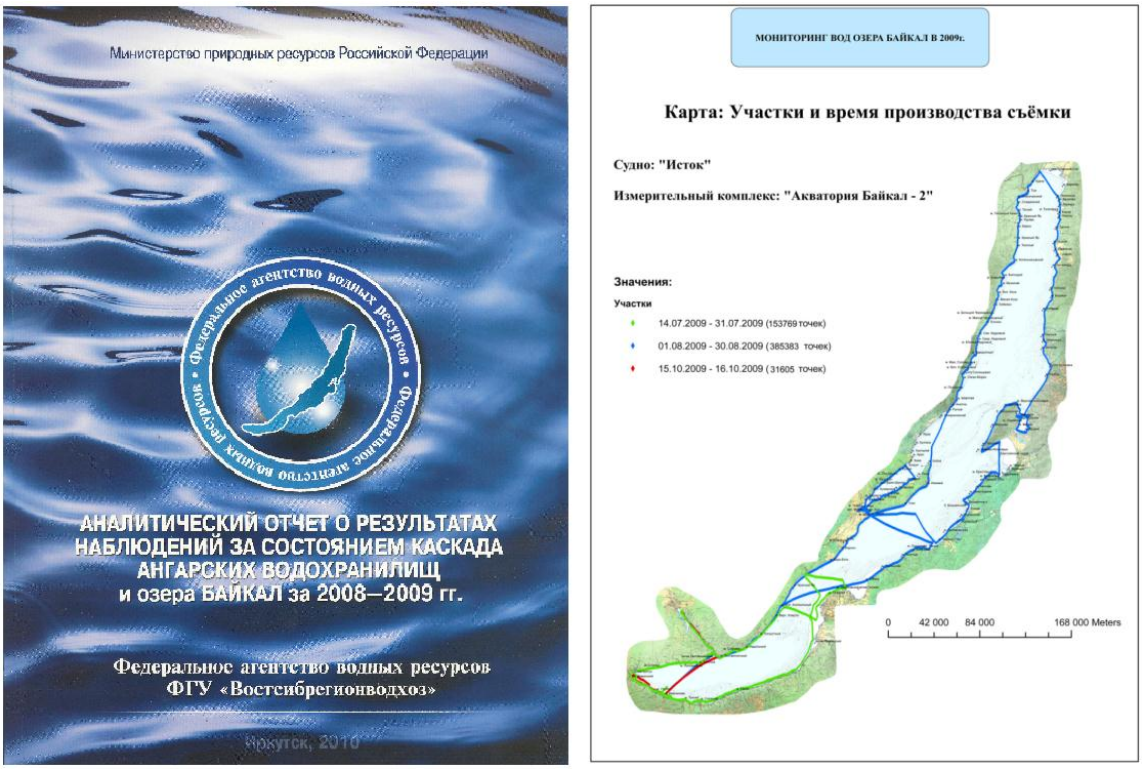


Рис. 1. Аналитический отчет о результатах мониторинговых наблюдений и картограммы

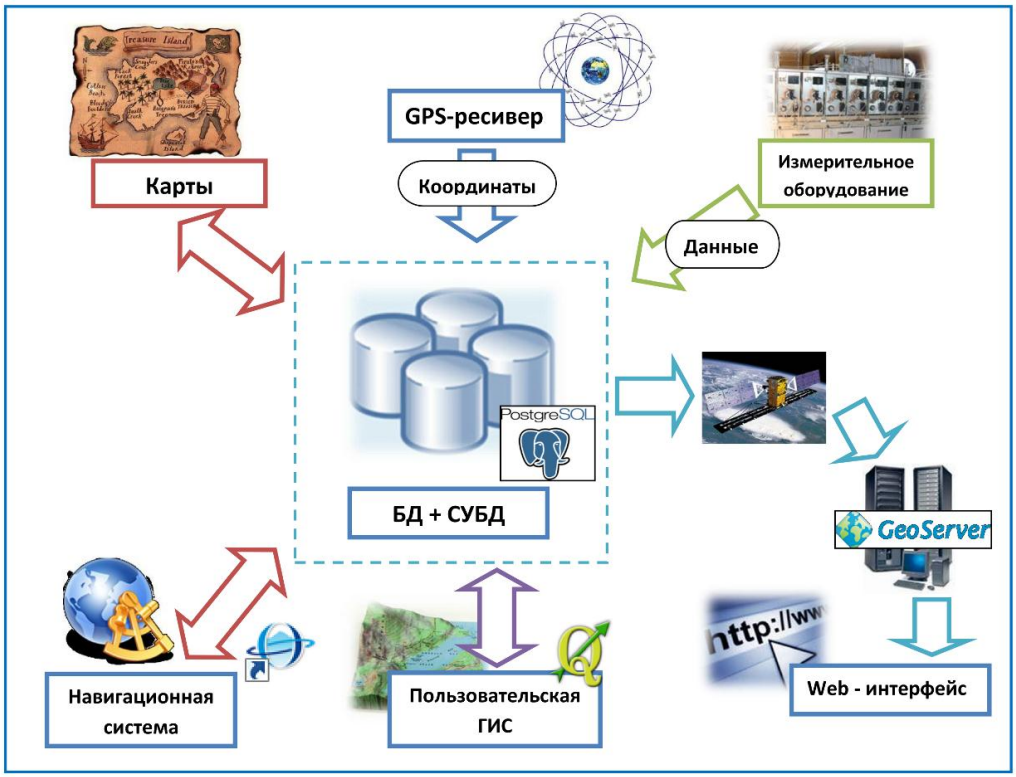


Рис. 2. Структура разработанной ГИС для мониторинга водных объектов

ченной пространственной информации в базе данных; автоматическую классификацию данных в соответствии с установленными нормативами ПДК для выделения аномалий концентраций химических элементов; передачу полученных картограмм распределений в ответственные ведомства; хранение навигационной информации, поддержку навигации судна.

Кроме того, все компоненты системы должны быть способны работать в условиях низких температур и сильных вибраций.

Итак, для соответствия системы требованиям «Программы экологического мониторинга озера Байкал» в процессе исследований нам представлялось необходимым повысить надежность аппаратной составляющей, внедрить современные средства оперативного представления результатов мониторинга.

Главная задача исследований – создание ГИС, которая позволила бы получать результаты наблюдений непосредственно после производства измерений, причем в автоматическом режиме. Проблема надежности ПК решалась за счет использования устойчивых к качке и вибрации компонентов (вибростойкие подвесы для накопителей), а также внедрения системы клонирования жестких дисков и их быстрой замены.

Для снижения требований системы к человеческим ресурсам нами было разработано программное обеспечение, позволяющее отказаться от участия человека в процессах сохранения, предварительного анализа и представления данных. Необходимость в человеческом участии существует только при обслуживании гидрохимического оборудования, а также на этапе принятия решений по готовым картограммам.

Ядром данной системы является база данных PostgreSQL с пространственным расширением PostGIS. В ней хранится гидрофизикохимическая, батиметрическая, навигационная информация. В процессе движения судна база данных непрерывно пополняется информацией с приборов и координатами с GPS-ресивера для осуществления пространственной привязки результатов измерений и простейшей математической обработки. После этого данные становятся доступны для просмотра и/или редактирования в трех интерфейсах: пользовательской ГИС, навигационной ГИС и веб-интерфейсе.

Пользовательская ГИС предназначена для просмотра и анализа результатов мониторинга специалистом-гидрохимиком непосредственно во время рейса. Основой для нее является геоинформационная система Quantum GIS, снабженная дополнительными плагинами.

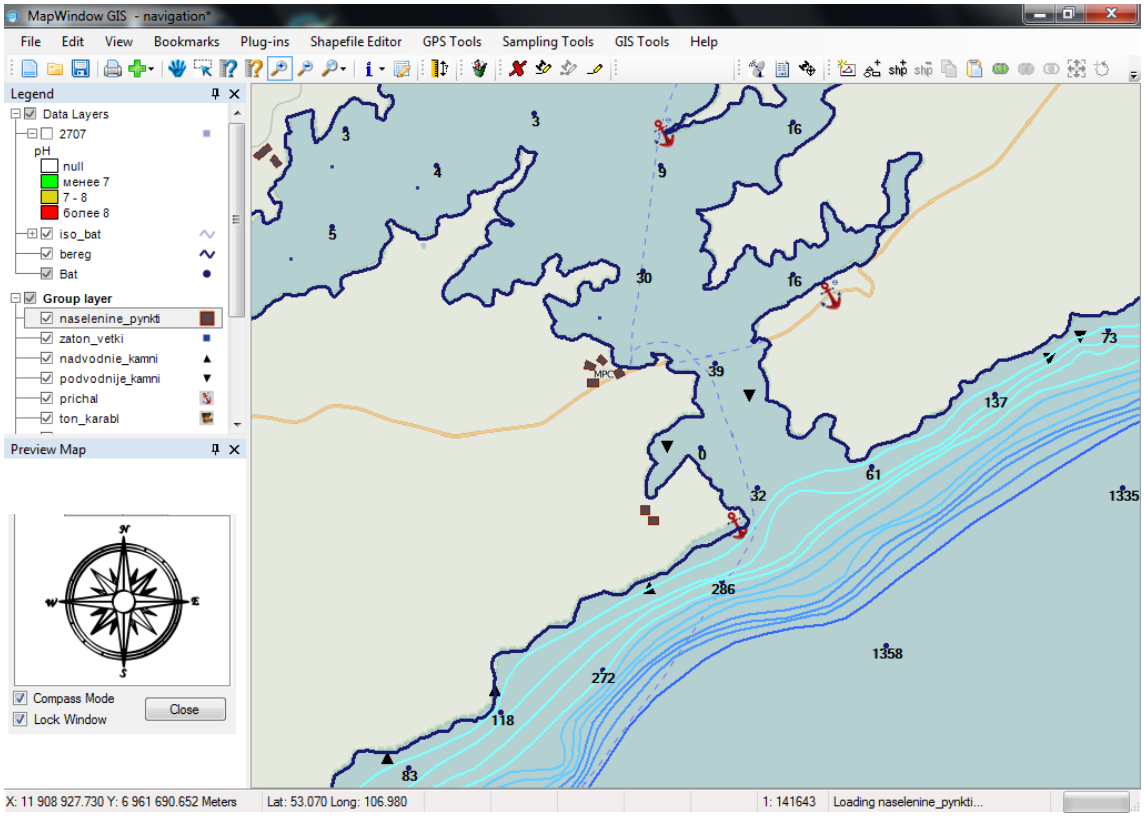


Рис. 3. Интерфейс навигационной системы

Навигационная ГИС (рис. 3) предназначена для обеспечения безопасного судовождения и представляет собой особый вид информационной системы, обладающей как типично навигационными, так и стандартными ГИС-возможностями.

Отличие от классической навигационной системы заключается в наличии развитых возможностей по импорту данных и редактированию информации «на лету», присущих географическим информационным системам, и гарантирующих своевременное получение актуальной навигационной информации. В данном случае навигационная система не является обособленным узкоспециализированным средством. Реализованный в ней алгоритм обратной связи позволяет как получать пространственную информацию из БД, так и дополнять ее получаемыми с эхолота данными батиметрии, что делает ее дополнительным каналом получения информации об озере Байкал. В отличие от обычных навигационных систем, информация которых со временем устаревает и требует обновления, представленная ГИС со временем станет развиваться и дополняться. После интеграции гидролокатора бокового обзора батиметрические исследования приобретут отдельную ценность.

Навигационная ГИС реализована в виде защищенного ПК с сенсорным экраном; программной платформой служит открытая ГИС MapWindow GIS, также дополненная необходимыми плагинами.

Формат веб-публикации является третьим интерфейсом корабельной геоинформационной системы. Пример веб-представления из базы данных приведен на рис. 4. В перспективе на основе имеющейся базы данных возможно создание фонда информационных ресурсов, включающего данные о состоянии, использовании и охране оз. Байкал и Иркутского водохранилища. Для реализации веб-представления используется картографический сервер Института геохимии СО РАН. В настоящее время, по причине отсутствия на судне «Исток» спутникового терминала, нет возможности осуществлять потоковую передачу данных напрямую с корабля на сервер ИГХ СО РАН, репликация «корабельной» и «внешней» базы данных осуществляется только после окончания рейса. Результирующие картограммы могут быть представлены в вышестоящие инстанции только после доставки данных в Институт геохимии СО РАН.

В результате исследований установлено, что для оперативного контроля параметров водной среды можно использовать пользовательскую ГИС на судне и в случае возникновения чрезвычайной ситуации сообщить о ней по спутниковому теле-

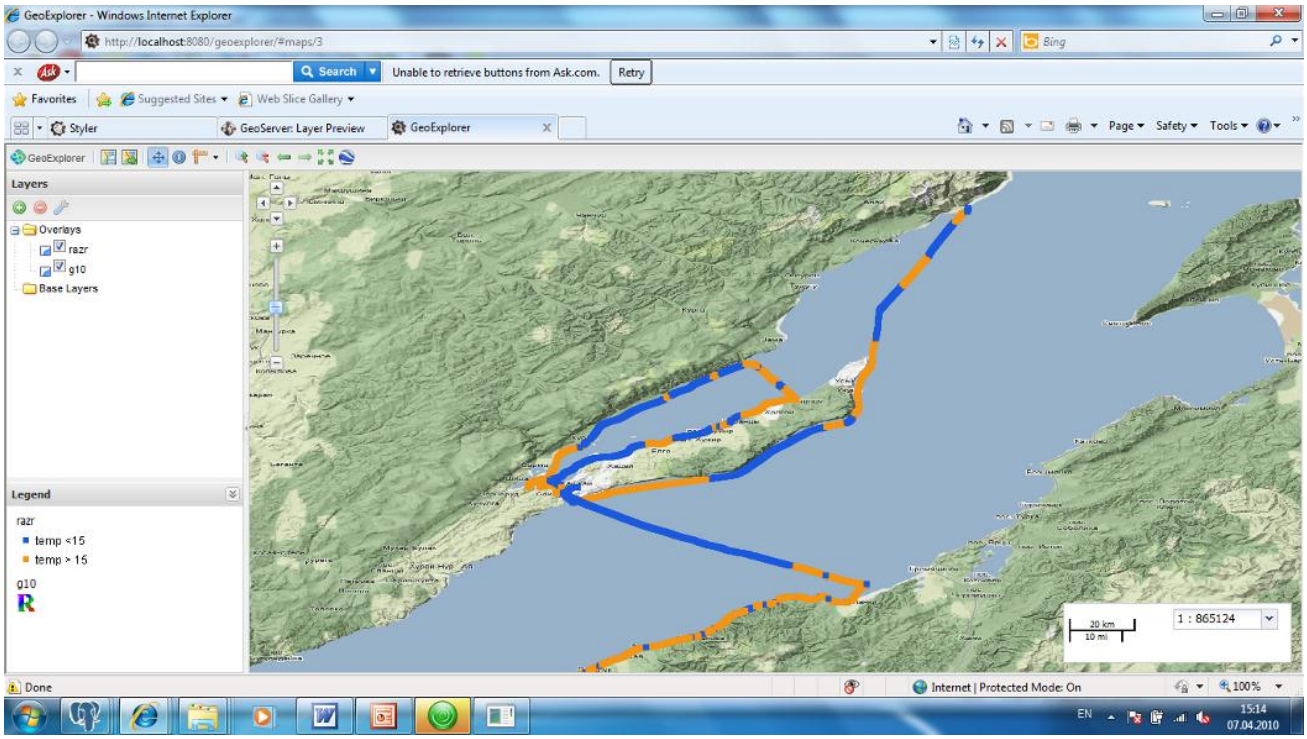


Рис. 4. Пример веб-представления информации из БД

фону. При внедрении терминала система позволяет формировать веб-картограммы один раз в несколько часов в автоматическом режиме, однако в связи с отсутствием у ФГУ «Востсибрегионводхоз» собственного веб-ресурса они доступны для просмотра только в интрасети ИГХ СО РАН.

За 2009–2010 гг. с использованием комплекса проведено 8 маршрутных съемок по озеру Байкал, общее количество точек измерения составило 1464031.

Полученные данные о качестве вод поверхностного слоя озера свидетельствуют о сохранности чистоты вод Байкала в целом. В тоже время выявлены отдельные участки с высокими концентрациями химических элементов, превышающих ПДК. Большее число их расположено в южной части Байкала – это районы расположения Байкальского ЦБК, г. Слюдянки и п. Култук, в северной части озера – район г. Северобайкальска. Особый интерес представляют наблюдения за зоной влияния БЦБК. Так, в 2009 году, по сравнению с предшествующими годами, в зоне деятельности БЦБК выявлено снижение концентраций в поверхностной толще отдельных элементов (сульфатов, нефтепродуктов) до уровня фона, однако с повторным запуском комбината в 2010 г. наблюдалось явное повышение концентраций сульфатов до уровня, втрое превышающего фоновые концентрации. Картограмма распределения сульфат-иона в районе деятельности Байкальского целлюлозно-бумажного комбината представлена на рис. 5.

В настоящее время работа по созданию ГИС продолжается. Для получения законченного автоматизированного решения необходимо внедрение спутникового терминала и создание веб-сайта ФГУ «Востсибрегионводхоз», на котором можно было бы разместить результаты мониторинга. Однако уже внедренные компоненты позволили повысить надежность системы и оперативность обработки данных.

Кроме того, накопленная за 2009–2010 годы база данных концентраций химических элементов в озере Байкал не только служит для документирования текущего состояния природной среды и выявления аномалий, но также дополняет имеющуюся информацию о гидрохимии вод озера и, соответственно, представляет научную ценность.

Особенностью представленной системы является использование при ее создании исключительно открытых («open source») данных и программных продуктов.

Полученный нами определенный опыт работы с создаваемой ГИС позволяет сделать вывод о состоятельности современных геоинформационных систем как необходимого и достаточного инструмента решения геоэкологических задач.

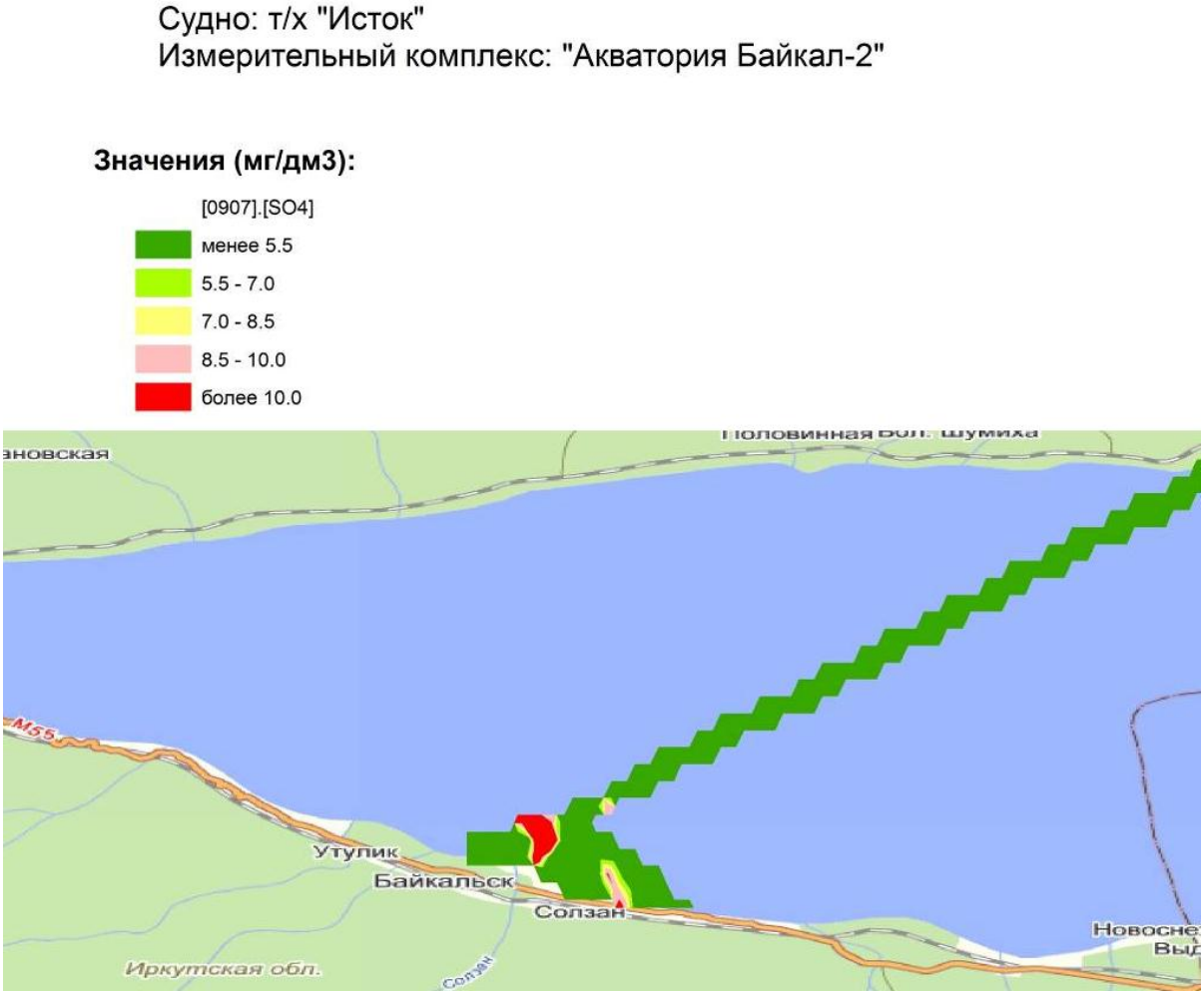


Рис. 5. Картограмма распределения сульфат-иона в районе деятельности БЦБК, 2010 г.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. О разработке плана мероприятий по совершенствованию государственной системы мониторинга уникальной экосистемы озера Байкал : информ.-аналит. материалы к заседанию межвед. комис. по вопр. охраны оз. Байкал. Иркутск, 2008.
2. Ющук В. А., Иванюта С. А., Соснина И. Г., Минаева Т. В. Аналитический отчет о результатах наблюдений за состоянием каскада Ангарских водохранилищ и озера Байкал за 2008–2009 гг. / ФГУ «Востсибрегионводхоз». Иркутск, 2009.
3. Российская Федерация. Федеральный закон об охране озера Байкал № 94-ФЗ от 01.05.1999 [Электронный ресурс] : принят Гос. Думой 2 апр. 1999 г. : одобрен Советом Федер. 22 апр. 1999 г.). – URL : http://www.magicbaikal.ru/ecology/law-baikal.htm (дата обращения : 20.03.2011).

УДК 519.237.5

Базилевский Михаил Павлович,
аспирант кафедры «Информационные системы» ИрГУПС,
ассистент кафедры «Высшая математика» ИрГУПС, e-mail: mik2178@yandex.ru
Носков Сергей Иванович,
д. т. н., профессор, директор Института информационных технологий
и моделирования ИрГУПС, e-mail: noskov_s@irgups.ru

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ЛИНЕЙНОМУЛЬТИПЛИКАТИВНОЙ РЕГРЕССИИ

M.P. Bazilevskiy, S.I. Noskov

THE ALGORITHM FOR A LINEARMULTIPLICATIVE REGRESSION CONSTRUCTION

Аннотация. *Рассмотрена технология организации «конкурса» линейномультипликативных регрессионных моделей. Для данного класса уравнений предложены три стратегии формирования множества их альтернативных вариантов. Рассмотренный алгоритм реализован в программном комплексе автоматизации процесса построения регрессионных моделей.*

Ключевые слова: *регрессионный анализ, «конкурс» моделей, метод «идеальной» точки, число Стирлинга второго рода.*

Abstract. *In this paper the technology of «competition» of linearmultiplicative regression models organization is considered. For this class of equations three strategies to formation the set of alternatives are proposed. This algorithm is implemented in the program complex for automation construction process of regression models.*

Keywords: *regression analysis, «competition» of models, «ideal» point method, Stirling number of the second kind.*

Введение

При построении регрессионных моделей одной из основных проблем является выбор формы связи между переменными (факторами) в уравнении. В настоящее время в рамках анализа данных разработано значительное количество таких форм (см., например, обзор в [1]). В данной работе авторами рассмотрен класс линейно-мультипликативных регрессий (ЛМР). Для выбора наилучшей формы связи между переменными из этого класса целесообразно реализовывать «конкурс» моделей [1], который заключается в формировании множества альтернативных вариантов уравнения и, при наличии совокупности критериев адекватности, последующем выборе лучшего из них в заданном смысле. В связи с тем, что реализация «конкурса» моделей вручную слишком трудоемка, возникает необходимость в автоматизации данного процесса, а это, в свою очередь, требует разработки соответствующего программного обеспечения.

Технология построения ЛМР

К настоящему времени в регрессионном анализе не существует аналитических или итерационных методов, гарантирующих построение оптимальных по форме моделей. Известны лишь полуэвристические процедуры, реализация которых приводит к построению «хороших» моделей, например методы включения и исключения [2–4], а также пошаговая процедура при использовании метода наименьших квадратов (МНК) [2]. Также известно, что построение оптимальных моделей возможно только с использованием процедур переборного характера, поэтому, с целью получения более качественных регрессий, в данной работе авторами была применена технология проведения «конкурса» моделей.

Рассмотрим линейную регрессионную модель:

$$y_k = \alpha_0 + \sum_{i=1}^{m} \alpha_i x_{ki} + \varepsilon_k, \quad k = \overline{1,n}, \qquad (1)$$

где n – число наблюдений (длина выборки); y_k и x_{ki}, $k = \overline{1,n}$, $i = \overline{1,m}$ – значения зависимой и независимых переменных соответственно; α_i, $i = \overline{1,m}$ – подлежащие оцениванию параметры; ε_k, $k = \overline{1,n}$ – ошибки аппроксимации.

Это уравнение отражает влияние каждого из m независимых факторов в отдельности на выходной показатель y. Оставаясь в классе линейных по параметрам моделей, в качестве регрессоров условимся использовать различные комбинации произведений независимых переменных. Тогда из уравнения (1) можно получить (если $m=4$), например, следующий вариант линейномультипликативной регрессии:

$$y=\alpha_0+\alpha_1x_1+\alpha_2x_2x_3x_4+\alpha_3x_1x_2. \qquad (2)$$

Отметим, что такие модели являются нелинейными по факторам, но линейными по параметрам и обладают определенным содержательным смыслом. Например, слагаемое $\alpha_3x_1x_2$ в правой части уравнения (2) указывает на то, что факторы x_1 и x_2 оказывают совместное влияние на зависимую переменную y, и это влияние имеет кумулятивный характер. В литературе рекомендуется (см., например, [3,4]) соблюдение условия

$$p\le\left[\frac{n}{4}\right], \qquad (3)$$

где p – количество слагаемых в модели вида (2); $[a]$ – целая часть числа a.

В общем случае все возможные ЛМР можно представить в виде:

$$y_k=\alpha_0+\sum_{i=1}^{p}\alpha_i\prod_{j=1}^{m}x_{kj}^{\sigma_{sji}}+\varepsilon_k,\ s=\overline{1,r},\ k=\overline{1,n}, \qquad (4)$$

где r – общее число ЛМР (варианты комбинаций булевых переменных); σ_{sji} – булева переменная, заданная по правилу:

$$\sigma_{sji}=\begin{cases}1, & \textit{если в s-й регрессии } j\textit{-я переменная } x_j \textit{ входит в i-е слагаемое;}\\ 0, & \textit{в противном случае.}\end{cases}$$

Для того, чтобы построить все возможные варианты ЛМР, необходимо перебрать все элементы трехмерной матрицы Ω:

$$\Omega=\left\|\sigma_{sji}\right\|,\ s=\overline{1,r},\ j=\overline{1,m},\ i=\overline{1,p}.$$

Очевидно, что общее число ЛМР r будет зависеть от заданного количества независимых переменных m и от количества слагаемых p.

Пусть было построено множество ЛМР из r вариантов:

$$\mathcal{M}=\{M_1,M_2,\ldots,M_r\}.$$

Для оценивания неизвестных параметров α для каждого такого варианта обычно используется метод наименьших квадратов (МНК) или модулей (МНМ). Затем из множества $\mathcal{M}$ нужно выбрать наиболее приемлемую модель, используя множество наиболее часто применяемых критериев адекватности:

$$K=\{R,F,S,E,DW\},$$

где R – критерий множественной детерминации, F – критерий Фишера, S – величина остаточной дисперсии, E – ошибка аппроксимации, DW – критерий Дарбина – Уотсона. Формальное определение этих критериев приводится в многочисленной литературе по анализу данных [1, 3, 4].

Пусть из множества K выделено l критериев адекватности. Тогда для выбора лучшей модели из множества вариантов $\mathcal{M}$ будем руководствоваться матрицей критериев $\mathcal{K}$:

$$\mathcal{K}=\left\|K_i\left(M_j\right)\right\|,\ i=\overline{1,l},\ \ j=\overline{1,r}.$$

В теории принятия решений разработано большое количество эффективных алгоритмов решения многокритериальных задач, многие из которых вполне применимы и при выборе лучшего варианта регрессионной зависимости. Одним из наиболее популярных из них является метод «идеальной» точки [1], идея которого состоит в следующем.

Прежде всего, элементы матрицы $\mathcal{K}$ нормируются по правилу:

$$\tilde{K}_i\left(M_j\right)=\frac{K_i\left(M_j\right)-K_i^-}{K_i^+-K_i^-},\ i=\overline{1,l},\ j=\overline{1,r},$$

где $K_i^-=\min\limits_{M\in\mathcal{M}}K_i(M),\ \ K_i^+=\max\limits_{M\in\mathcal{M}}K_i(M).$

Затем задаётся «идеальная» точка, которая представляет собой вектор, каждый элемент которого равен максимальному значению соответствующего критерия матрицы $\tilde{K}_i(M_j)$. В нашем случае «идеальная» точка будет иметь вид

$$K^*=(\underbrace{1,\ldots,1}_{l}).$$

Для реальных задач многокритериального выбора лучшего варианта регрессионного уравнения обычно отсутствует альтернатива, доставляющая максимум всем критериям одновременно. Поэтому метод «идеальной» точки предполагает поиск альтернативы M^*, образ которой в критериальном пространстве наиболее близок к точке K^*:

$$M^*=\arg\min_{M\in\mathcal{M}}\sum_{i=1}^{l}\left(K_i^*-\tilde{K}_i(M)\right)^2.$$

Авторами предложено три стратегии задания характера вхождения независимых переменных в модель (4):

1. Не требуется обязательного вхождения каждой независимой переменной в ЛМР.

2. Каждая независимая переменная входит в ЛМР только 1 раз.

3. Каждая независимая переменная входит в ЛМР хотя бы 1 раз.

Рассмотрим подробнее каждую из них.

1. Не требуется обязательного вхождения каждой независимой переменной в ЛМР.

Эта стратегия не накладывает никаких ограничений на вхождение независимых переменных в правую часть уравнения (4), то есть каждая переменная может входить в модель ровно 1 раз, либо более 1 раза, либо вообще не входить. Найдем общее число таких моделей r. Если в уравнение (4) входит m независимых переменных, то количество комбинаций булевых переменных w будет равно:

$$w = 2^m - 1. \qquad (5)$$

В формуле (5) учитывается что нельзя формировать комбинацию булевых переменных из всех нулей, поэтому необходимо от общего числа из 2^m вариантов отнять единицу. Если задано p слагаемых, то варианты комбинаций булевых переменных (общее число моделей) будут отличаться друг от друга только составом элементов, то есть получим сочетания без повторений. Тогда общее количество моделей для этой стратегии:

$$r = C_w^p = C_{2^m-1}^p. \qquad (6)$$

Результаты вычислений, полученных по формуле (6) (для $1 \le m \le 6$ и $1 \le p \le 10$), приведены в табл. 1.

Таблица 1

Общее количество ЛМР, в которых не требуется обязательного вхождения каждой независимой переменной

m / p	1	2	3	4	5	6
1	1	3	7	15	31	63
2	0	3	21	105	465	1953
3	0	1	35	455	4495	39711
4	0	0	35	1365	31465	595665
5	0	0	21	3003	169911	7028847
6	0	0	7	5005	736281	67945521
7	0	0	1	6435	2629575	553270671
8	0	0	0	6435	7888725	3872894697
9	0	0	0	5005	20160075	23667689815
10	0	0	0	3003	44352165	127805525001

Для расширения множества альтернативных вариантов моделей для данной стратегии при заданном числе независимых переменных m необходимо указать число слагаемых p в виде интервала $[p_1, p_2]$, где p_1 – минимальное число слагаемых, p_2 – максимальное число слагаемых. Причём $p_1, p_2 \in [1,10]$. Тогда общее количество таких моделей можно вычислить по формуле

$$\sum_{i=p_1}^{p_2} C_{2^m-1}^i$$

либо по табл. 1, суммировав в заданном интервале элементы одноименного столбца.

Результаты вычислений в табл. 1 показывают, что данная стратегия весьма трудоёмка и требует значительного времени при построении ЛМР. Поэтому с целью сокращения количества альтернатив были введены следующие более «жесткие» требования на вхождение независимых переменных в модель (4).

2. Каждая независимая переменная входит в ЛМР только 1 раз.

На формальном языке эта стратегия имеет вид:

$$\sum_{i=1}^{p} \sigma_{sji} = 1, \quad s = \overline{1,r}, \quad j = \overline{1,m}. \qquad (7)$$

Такое «жесткое» условие позволяет значительно снизить количество альтернативных вариантов моделей, при этом сохраняя учет всех независимых переменных. Для вычисления количества таких моделей воспользуемся числами Стирлинга второго рода (см., например, [5, 6]).

Число Стирлинга второго рода $S(h, k)$ равно количеству способов разбиения множества из h элементов на k непустых подмножеств. Например, $S(4, 2) = 7$, так как существует ровно 7 разбиений множества $\{1, 2, 3, 4\}$ на два подмножества:

$$\{\{1, 2, 3\}, \{4\}\}$$
$$\{\{1, 2, 4\}, \{3\}\}$$
$$\{\{1, 3, 4\}, \{2\}\}$$
$$\{\{1, 2\}, \{3, 4\}\}.$$
$$\{\{1, 3\}, \{2, 4\}\}$$
$$\{\{1, 4\}, \{2, 3\}\}$$
$$\{\{1\}, \{2, 3, 4\}\}$$

В нашем случае необходимо разбить множество из m независимых переменных на p слагаемых. Количество таких разбиений и будут определять числа Стирлинга второго рода, которые удовлетворяют рекуррентному соотношению

$$S(m, p) = S(m-1, p-1) + pS(m-1, p), \quad 0 < p < m,$$

причём $S(m,m)=1$ для $m\geq 0$, а $S(m,0)=0$ для $m>0$.

Числа Стирлинга можно вычислять в виде суммы

$$S(m,p)=\frac{1}{p!}\sum_{i=0}^{p}(-1)^i C_p^i (p-i)^m . \qquad (8)$$

Пользуясь формулой (8), рассчитаем количество моделей, удовлетворяющих условию (7), в зависимости от числа независимых переменных m и числа слагаемых p. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Общее количество ЛМР, в которые каждая независимая переменная входит только 1 раз

m / p	1	2	3	4	5	6
1	1	1	1	1	1	1
2	0	1	3	7	15	31
3	0	0	1	6	25	90
4	0	0	0	1	10	65
5	0	0	0	0	1	15
6	0	0	0	0	0	1

3. Каждая независимая переменная входит в ЛМР хотя бы 1 раз.

Или на формальном языке:

$$\sum_{i=1}^{p}\sigma_{sji}\geq 1,\quad s=\overline{1,r},\quad j=\overline{1,m}. \qquad (9)$$

Для вычисления количества r_0 таких моделей воспользуемся комбинаторной формулой включения-исключения [5,7]:

$$r_0 = r-\sum_{j_1=1}^{m} r(j_1)+\sum_{1\leq j_1<j_2\leq m} r(j_1,j_2)-\ldots$$
$$\ldots+(-1)^k\sum_{1\leq j_1<\ldots<j_k\leq m} r(j_1,j_2,\ldots,j_k)+\ldots \qquad (10)$$
$$\ldots+(-1)^{m-1} r(j_1,j_2,\ldots,j_m),$$

где $r(j_1,j_2,\ldots,j_k)$ – количество моделей, в которых отсутствуют j_1-я, j_2-я, …, j_k-я независимые переменные; r – число ЛМР, не требующих вхождения каждой независимой переменной в правую часть уравнения (4), которое можно вычислить по формуле (6).

Найдем $r(j_1,j_2,\ldots,j_k)$, т. е. количество таких моделей, для которых выполняется условие

$$\forall j\in(j_1,\ldots,j_k),\quad \sum_{i=1}^{p}\sigma_{sji}=0,\quad s=\overline{1,r}. \qquad (11)$$

Пусть в s-м варианте комбинаций булевых переменных трехмерной матрицы Ω отсутствуют k независимых переменных: j_1-я, j_2-я, …, j_k-я. Это означает, что соответствующие элементы матрицы равны 0. Заполним оставшиеся ненулевые элементы матрицы Ω вариантами комбинаций булевых переменных из $2^{m-k}-1$ элементов по p слагаемым. Они отличаются друг от друга только составом элементов, поэтому являются сочетаниями без повторений $C^{p}_{2^{m-k}-1}$. Тогда общее количество ЛМР, удовлетворяющих условию (11), равно

$$r(j_1,j_2,\ldots,j_k)=C^{p}_{2^{m-k}-1}. \qquad (12)$$

Найдем $\sum_{1\leq j_1<\ldots<j_k\leq m} r(j_1,j_2,\ldots,j_k)$. Для этого необходимо расставить все k независимых переменных, которые отсутствуют в модели, на m позиций. Эти комбинации отличаются друг от друга только составом, тогда, с учетом равенства (12), имеем:

$$\sum_{1\leq j_1<\ldots<j_k\leq m} r(j_1,j_2,\ldots,j_k)=C_m^k\cdot C^{p}_{2^{m-k}-1}. \qquad (13)$$

Используя уравнение (13), заменим соответствующие суммы в равенстве (10). Тогда формула для вычисления числа моделей r_0, удовлетворяющих условию (9), примет вид

$$r_0 = C^{p}_{2^m-1}-C_m^1\cdot C^{p}_{2^{m-1}-1}+C_m^2\cdot C^{p}_{2^{m-2}-1}-\ldots$$
$$\ldots+(-1)^k C_m^k\cdot C^{p}_{2^{m-k}-1}+\ldots+(-1)^{m-1}, \qquad (14)$$

или

$$r_0=\sum_{i=0}^{m-1}(-1)^i\cdot C_m^i\cdot C^{p}_{2^{m-i}-1}. \qquad (15)$$

Вычисленное по формуле (15) количество моделей, в которые каждая независимая переменная входит хотя бы 1 раз, отражает табл. 3.

Таблица 3

Общее количество ЛМР, в которые каждая независимая переменная входит хотя бы 1 раз

m / p	1	2	3	4	5	6
1	1	1	1	1	1	1
2	0	3	12	39	120	363
3	0	1	32	321	2560	18881
4	0	0	35	1225	24990	426650
5	0	0	21	2919	155106	2655786
6	0	0	7	4977	711326	63602770
7	0	0	1	6431	2597410	537589726
8	0	0	0	6435	7856550	3825658872
9	0	0	0	5005	20135050	23546804440
10	0	0	0	3003	44337150	127539457056

Заключение

Предложенный в данной работе алгоритм построения линейно-мультипликативной регрес-

сии (ЛМР) был реализован в новой версии программного комплекса автоматизации процесса построения регрессионных моделей (ПК АППРМ) [8] и позволил существенно расширить его возможности. Включение алгоритма в данный комплекс предоставляет пользователям возможность построения ещё более точных математических моделей, по которым, в отличие от предыдущей версии, можно судить о характере и степени совместного влияния независимых факторов на выходную переменную.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Носков С. И. Технология моделирования объектов с нестабильным функционированием и неопределенностью в данных. Иркутск : Облинформпечать, 1996. 320 с.
2. Сенин А. Методы отбора переменных в регрессионные модели [Электронный ресурс] // Технологии анализа данных. URL : http://www.basegroup.ru/library/analysis/regression/feature_selection/ (дата обращения 2.02.2011).
3. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ : в 2 кн. М. : Финансы и статистика, 1986. Кн. 1. 366 с.
4. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ : в 2 кн. М. : Финансы и статистика, 1987. Кн. 2. 351 с.
5. Липский В. Комбинаторика для программистов. М. : Мир, 1988. 200 с.
6. WolframMathWorld [Электронный ресурс]. URL : http://mathworld.wolfram.com/StirlingNumberoftheSecondKind.html (дата обращения 17.01.2011).
7. WolframMathWorld [Электронный ресурс]. URL : http://mathworld.wolfram.com/Inclusion-ExclusionPrinciple.html (дата обращения 19.01.2011)
8. Базилевский М. П., Носков С. И. Технология организации конкурса регрессионных моделей // Информационные технологии и проблемы математического моделирования сложных систем. Иркутск : ИрГУПС, 2009. Вып. 7. С. 77–84.

УДК 62-233.2

Дороничев Александр Владимирович,
аспирант, кафедра «Станции, узлы, технология грузовой и коммерческой работы», Дальневосточный государственный университет путей сообщения, тел. 89141829202 (моб.), 407671 (раб.), force_reason@mail.ru

Константинов Константин Витальевич,
к. т. н., доцент, кафедра «Электроника, электромеханика и электропривод» Дальневосточный государственный университет путей сообщения 631709 (моб.), const@festu.khv.ru

ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА ВИБРОДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ И ПЛАНИРОВАНИЯ РЕМОНТОВ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ ПО ТЕКУЩЕМУ ТЕХНИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ НА ОСНОВЕ ВНЕДРЕНИЯ ВЕЙВЛЕТ-ТЕХНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

A.V. Doronichev, K.V. Konstantin

EXPERT SYSTEM FOR VIBRODIAGNOSTING ROTATING BEARINGS STATUS AND REPAIR PLANNING IN CONNECTION WITH CURRENT TECHNICAL CONDITIONS ON THE BASIS OF WAVELET-TECHNOLOGIES INTRODUCTION IN THE FIELD RAILWAY TRANSPORTATION OBJECTS

Аннотация. *В статье рассмотрены перспективы использования вейвлет-технологий для оценки технического состояния подшипниковых узлов колесно-редукторных блоков и электродвигателей локомотивов, обнаружения дефектов подшипников качения на самых ранних стадиях их*

развития. Приведен графический пример вейвлет-преобразования реальных сигналов, полученных с помощью стационарной системы вибрационной диагностики КПА-1В колесно-редукторных блоков локомотивов ЭП-1 и ВЛ-80 в процессе ежемесячного осмотра и обслуживания в локомотивных депо Смоляниново, Хабаровска и Комсомольска-на-Амуре.

Ключевые слова: *вибродиагностика, неразрушающий контроль, вейвлет.*

Abstract. *In the article we considered prospects of discrete wavelet-transformation use for estimation of a bearing knots of wheel-geared blocks and electric motors of locomotives technical condition, rolling bearings defects detection at the earliest stages of their development. The graphic example of real signals received by means of stationary of vibrating diagnostics system КПА-1В for wheel-geared blocks of locomotives ЭП-1 and ВЛ-80 in the course of monthly survey and service in locomotive depots Smoljaninovo, Khabarovsk and is resulted Komsomolsk-on-Amur wavlet-transformation is given.*

Keywords: *vibrodiagnostic, nondestructive control, wavelet.*

Практикуемые в настоящее время способы контроля параметров технического состояния машин и механизмов (при эксплуатации и ремонте) предполагают полную или частичную разборку оборудования [2, 3]. Эта процедура нарушает приработку узлов и сокращает срок безаварийной службы.

Ущерб, причиняемый периодическим профилактическим осмотром (ремонтом) механического оборудования во время эксплуатации, столь велик, что одной из первостепенных проблем в различных областях техники стала проблема перехода от эксплуатации по заранее назначенному ресурсу к эксплуатации и техническому обслуживанию механизмов по данным систематического безразборного контроля параметров технического состояния и результатам диагностирования. Эта технология, известная под названием «эксплуатация и обслуживание по состоянию», призвана устранить неожиданные поломки, обеспечить надежную работу механизмов и экономию средств [4]. Здесь источником достоверной информации о техническом состоянии узлов машин и механизмов является виброакустический сигнал, изменения свойств которого коррелированы с изменением параметров технического состояния, вызванного физическим износом узлов, изменением геометрических размеров деталей, уходом параметров регулировок и т. д. Также методы виброакустической диагностики позволяют не только выявить уже развившуюся неисправность и предотвратить катастрофические разрушения моторно-якорных подшипников тяговых двигателей локомотивов, но и обнаружить развивающийся дефект на очень ранней стадии, что дает возможность прогнозировать аварийную ситуацию и обоснованно планировать сроки и объем ремонта оборудования.

Известно, что подшипники качения являются одними из наиболее распространенных элементов машин и механизмов подвижного состава. Они работают в широком диапазоне климатических условий (большие перепады температур, влажности) при больших переменных нагрузках. Подшипники относятся к лимитирующим узлам подвижного состава и в основном определяют эксплуатационные показатели изделий, в частности их надежность, а в ряде случаев являются причиной аварийных отказов с риском для жизни обслуживающего персонала, с большими экономическими потерями (количество порч и неисправностей для якорных подшипников электровозов на 1 млн км пробега колеблется от 0,44 до 3,68). Анализ статистических данных по неисправностям тяговых двигателей электровозов, выявленных в процессе ремонта, позволил установить, что 15 % неисправностей приходится на повреждения моторно-якорных подшипников, а именно отказам подвержены подшипники качения [4].

Вышесказанное обусловливает актуальность диагностирования состояния подшипников методами безразборного контроля. Решение проблемы раннего диагностирования подшипников позволит в локомотивном хозяйстве сократить объем ремонтных работ и, соответственно, снизить затраты на производство ТР и ТО на 25 %, за счет повышения качества ремонта увеличить пробеги между ТР-1 и ТО-3, сократить количество ТР-2, заменив их на ТР-1 [6]. Снижаются затраты и на неплановые ремонты за счет обоснованного прогнозирования сроков безотказной работы оборудования и назначения их ресурса в соответствии с фактическим состоянием подшипниковых узлов.

Основное назначение разработанного программного комплекса вибродиагностики и планирования ремонтов – повышение надежности работы вращающегося оборудования. Это достигается за счет оперативной оценки текущего технического состояния оборудования, своевременного выявления дефектов, оптимального планирования сроков проведения ремонтов.

Основная цель внедрения разработанной программы на основе вейвлет-технологий – реали-

зация системы обслуживания оборудования по фактическому техническому состоянию, в соответствии с которым обслуживание проводится только в том случае и в том месте, где оно оказывается абсолютно необходимым.

Программный комплекс предназначен для использования эксплуатационным и ремонтным персоналом в локомотивных депо:

• контроля текущего технического состояния роторного (вращающегося) оборудования с отслеживанием динамики развития неисправностей;

• определения возможности дальнейшей эксплуатации оборудования без ремонта;

• подготовки информации о необходимых регламентных и ремонтных работах, их объеме и сроках проведения.

Система измерения и анализа вибрации на базе виртуального анализатора может работать в автономном режиме и в тяжелых промышленных условиях. Вид пользовательского графического интерфейса пользователя виртуального анализатора на основе вычислительной среды MATLAB [1] представлен на рис. 1, который обеспечивает представление и визуализацию данных и результатов в удобной и наглядной форме. В основе используемых процедур лежит относительно новая теория разложения сигналов по специальным функциям – всплескам (wavelet), главные особенности которых – ограниченность во времени, самоподобие и компактная локализация энергии по времени и частоте.

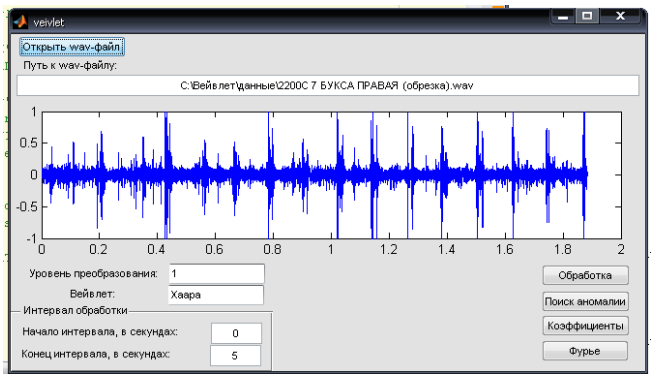


Рис. 1. Рабочий экран программы

Программа состоит из четырех разделов:

– «обработка» сигналов одним из шести видов вейвлетов (Хаара, Добеши, симлеты, койфлеты, биортогональные, Мейера) с выбором диапазона сигнала (на рис. 2);

– «поиск аномалии» – автоматизированный анализ с выборкой первого признака зарождающегося дефекта;

– «коэффициенты» – дискретное wavelet-преобразование на уровни преобразования по выбору пользователя (рис. 3);

– «фурье» – спектральный анализ на базе быстрого преобразования Фурье.

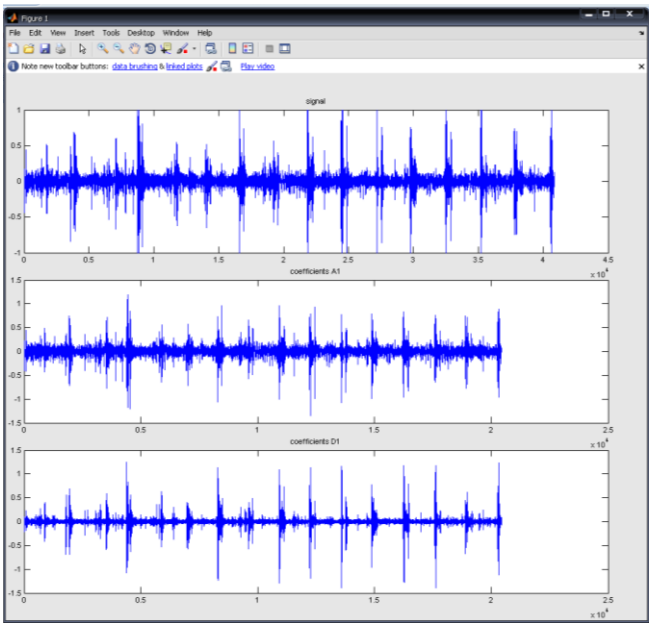


Рис. 2. Обнаружение аномалий в сигнале на уровне шума с разложением по аппроксимирующим и детализирующим коэффициентам первого порядка

В качестве загружаемых данных могут использоваться сигналы, введенные извне в виде звукового файла wav или с помощью звуковой карты, а также полученные с помощью пьезоэлектрических преобразователей.

Дискретное wavelet-преобразование (рис. 3) исключительно изящно и практически удобно представлено на основе теории цифровой фильтрации. Используются два особым образом сконструированных КИХ-фильтра и прореживание по времени: сигнал пропускается через два фильтра высокой и низкой частоты с передаточными функциями H(z) и G(z) соответственно и одинаковой нормированной частотой среза, равной π/2. В результате фильтрации в два раза уменьшаются ширина спектра каждого сигнала на выходах фильтров и частота дискретизации высокочастотной и низкочастотной составляющих. Затем отсчеты высокочастотной составляющей, называемые wavelet-коэффициентами, запоминаются, а с низкочастотной составляющей происходит аналогичная операция. Это означает, что на каждом этапе происходит фильтрация низкочастотной составляющей, полученной на предыдущем этапе разложения, то есть разделение исходного спектра на

две составляющие: низкочастотную и высокочастотную.

Сохранения wavelet-коэффициентов на диске происходит в папке с установленной программой.

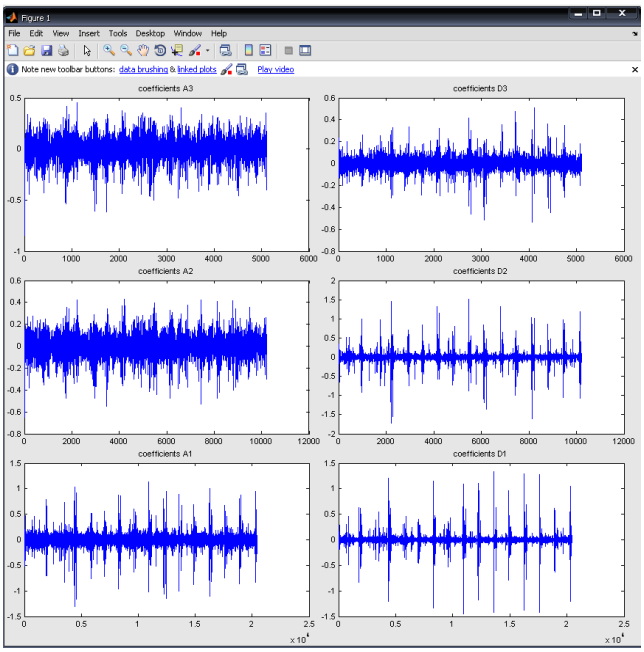


Рис. 3. Пример окна обработки виброакустического сигнала неисправного подшипника качения правой буксы моторно-якорного блока электровоза ВЛ-80 в режиме графического вывода всех коэффициентов разложения

Регулярное проведение измерений вибрации оборудования позволяет выявлять неисправности на ранней стадии возникновения, отслеживать динамику их развития, определять рациональные сроки проведения ремонтов.

Один сотрудник за месяц в условиях компактно расположенного локомотивного хозяйства может при помощи программного комплекса и переносного виброметра с памятью контролировать вибрацию на 200 типовых агрегатах (два механизма на агрегате – 4 подшипника), заносить сведения в компьютер, получать диагнозы по состоянию, готовить информацию для принятия решений о сроках проведения ремонтов и составе ремонтных работ. Два сотрудника могут контролировать вибрацию на 500 агрегатах.

Внедрение программного комплекса дает реальный экономический эффект: на ряде локомотивных депо достигается уменьшение числа ремонтов и обслуживаний до десяти раз при снижении общей стоимости проводимых ремонтов в четыре раза. Это, конечно, экстремальные значения, а в среднем достигается уменьшение количества ремонтов в 2–4 раза. К примеру, такая довольно частая неисправность локомотива, как заклинивание якоря тягового двигателя, приводит к разрушению опорных подшипников – ремонт обходится в триста тысяч рублей.

Внедрение в локомотивных депо программного комплекса в уже существующие системы вибродиагностики обслуживания по фактическому состоянию способствует:

• увеличению времени между ремонтами – и, как следствие, росту производительности и снижению затрат на проведение ремонтов;

• предотвращению прогнозируемых поломок, что способствует повышению надежности работы;

• устранению вторичных поломок, например поломки редуктора из-за неисправностей подшипника;

• устранению ненужного расхода деталей, исключению замены еще исправных деталей;

• уменьшению объема запасных частей, так как заранее известны номенклатура и количество необходимых деталей и запасных частей;

• уменьшению общей продолжительности ведения ремонтных работ, так как все необходимые работы планируются заранее.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. СПб. : Питер, 2002. 608 с.
2. А. С. 2133454, G01M13/04, 20.07.1999. Захаров С. И. Способ диагностики подшипников качения.
3. Коллакот Р. Диагностика повреждений : пер. с англ. М. : Мир, 1989. 512 с.
4. ГОСТ ИСО 5347-0-95. Вибрация. Методы калибровки датчиков вибрации и удара.
5. Ликеш И., Ляга Й. Основные таблицы математической статистики : пер. с чешск. М. : Финансы и статистика, 1985. 345 с.
6. Локомотив : ежемес. производственно-техн. науч.-попул. журн. [Электронный ресурс]. 2003. № 6. URL : www.rzd.ru (дата обращения 01.03.2011).
7. Евразия Вести : междунар. информ.-аналит. обозрение. [Электронный ресурс]. 2005. № 7. URL : http://www.eav.ru.

УДК 519.6:311

Краковский Юрий Мечеславович,
д. т. н., профессор, зав. кафедрой ИС ИрГУПС, тел. 89149269992
Жарий Дмитрий Иосифович,
соискатель, Восточно-Сибирский филиал ФПК, тел. 89086564733

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ НА ПОКАЗАТЕЛИ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК

Y.M. Krakovsky, D.I. Zhariy

INITIAL DATA UNCERTAINTY INFLUENCE ON PASSENGER TRANSPORTATION VALUES INVESTIGATION

Аннотация. *Приводится математическая постановка, исходные данные и результаты разработанной имитационной модели, реализующей вероятностный анализ безубыточности. Результаты моделирования включают исследования влияния цены перевозки пассажиров, постоянных и переменных затрат, дотаций и других факторов на доходность, операционный риск, рентабельность и срок окупаемости инвестиций регионального перевозчика пассажиров дальнего следования.*

Ключевые слова: *имитационное моделирование, пассажирские перевозки дальнего следования, вероятностный анализ безубыточности.*

Abstract. *The authors propose the final ranking procedure of problematic territories based on experts' information which in its turn uses the improved McKinsey's model. This kind of improvement is connected with the fact that ranking results are displayed not only with the help of matrix but by means of ranking rhombus and ranking bar. This procedure is a part of general system of selection and ranking methods of problematic administrative-territorial units based on fire security indexes.*

Keywords: *fire security, ranking, weighting coefficient, expert information.*

Введение

Пассажирские перевозки – важнейший компонент перевозок на различных видах транспорта (железнодорожном, автобусном, водном, воздушном). В пассажирских железнодорожных перевозках выделяют перевозки в дальнем следовании и в пригородном сообщении. В структуре пассажирооборота по видам транспорта в дальнем следовании железнодорожный занимает около двух третей.

Особенностью пассажирских перевозок является их убыточность. В работе [1] отмечается, что «важнейшей задачей реформирования пассажирского комплекса становится создание условий для безубыточной работы пассажирской компании, осуществляющей перевозки в дальнем следовании».

Принципиально новым этапом реформирования пассажирского комплекса РФ стало создание Федеральной пассажирской компании (ФПК) в форме дочернего общества ОАО «РЖД». Целью создания ФПК является организация эффективного бизнеса в сфере перевозки пассажиров в дальнем следовании.

Одной из процедур совершенствования управления ФПК является внедрение динамического ценообразования и управление доходностью пассажирских перевозок [2]. Основные вопросы, на которые помогает ответить технология управления доходностью, – это: а) как сгладить всплески спроса в пиковые периоды и б) как заполнить мощности вне пиковых периодов.

Эффективным инструментом исследования цепочки «издержки-продажи-прибыль» является анализ безубыточности – аналитический подход к изучению взаимосвязи между издержками и доходами при различных уровнях производства товаров, услуг или иной продукции.

В рамках анализа безубыточности используется формат отчета о прибыли, ориентированный на планирование, когда издержки делятся на постоянные и переменные. Для целей планирования используется так называемый формат отчета

о прибыли на основе маржинального или вложенного дохода (разница между выручкой и переменными затратами). Вложенный доход должен покрывать все постоянные издержки и обеспечивать заданное значение прибыли [3].

Для целей более детального структурного анализа используется формат, содержащий новый элемент для анализа – вложенный доход на единицу продукции, который остается постоянным, пока не изменится цена единицы продукции и переменные затраты на единицу продукции.

Одним из подходов к анализу безубыточности с учетом неопределенности исходных данных является создание имитационной модели оценки основных показателей, в котором предполагается, что величины постоянных и удельных переменных затрат на единицу продукции подвергнуты влиянию случайных факторов, что оказывает случайное воздействие на точку безубыточности и операционную прибыль. Таким образом, в отличие от классического подхода, в данном методе используется вероятностная модель анализа безубыточности.

Целью работы является создание и апробация имитационной модели для исследования влияния цены перевозки пассажиров, постоянных и переменных затрат, дотаций и других факторов на доходность, операционный риск, рентабельность и срок окупаемости инвестиций регионального перевозчика пассажиров дальнего следования.

Математическое описание задачи

Введем следующие обозначения.

1. Затраты за год

$$V = X \cdot Q + K, \quad (1)$$

где Q – объем перевозки пассажиров в натуральных единицах (число пассажиров либо пассажирооборот); X – переменные затраты на единицу пассажирооборота; K – постоянные затраты.

2. Доход за год

$$G = Y \cdot Q + D, \quad (2)$$

где Y – цена единицы пассажирооборота D – размер дотации.

3. Точка безубыточности (для детерминированного случая – величина пассажирооборота при нулевой прибыли)

$$Q_0 = \frac{K - D}{Y - X} = \frac{K - D}{Z}, \quad (3)$$

где $Z = Y - X$ – вложенный доход на единицу пассажирооборота.

4. Вложенный доход (CM) и операционная прибыль (OP)

$$CM = (Y - X) \cdot Q + D = Z \cdot Q + D = G - X \cdot Q; \quad (4)$$

$$OP = CM - K. \quad (5)$$

5. Операционный рычаг

$$OR = MCM / MOP, \quad (6)$$

где MCM, MOP – математические ожидания вложенного дохода и операционной прибыли.

6. Запас безопасности

$$ZBN = (Q - Q_0) / Q, \quad (7)$$

$$ZBY = (Q - Q_0) \cdot Y, \quad (8)$$

$$ZB(\%) = (MQ - MQ_o)/MQ. \quad (9)$$

Здесь ZBN – запас безопасности, когда объем продукции измеряется в натуральных единицах; ZBY – запас безопасности, когда объем продукции измеряется в стоимостном исчислении; $ZB(\%)$ – запас безопасности в процентах; MQ и MQ_o – математические ожидания объема продукции и точки безубыточности.

7. Операционный риск, содержащий три показателя:

s_{op} – среднеквадратическое отклонение (СКО) операционной прибыли;

v_{op} – коэффициент вариации операционной прибыли в процентах

$$v_{op} = 100 \cdot s_{op}/MOP; \quad (10)$$

R – операционный риск, как вероятность события

$$R = P\,(OP < OP_3); \quad (11)$$

где MOP – математическое ожидание операционной прибыли; OP_3 – заданная операционная прибыль.

8. Показатель рентабельности инвестиций (%)

$$ROI = (OP/In) \cdot 100, \quad (12),$$

где In – объем инвестиций.

9. Риск по показателю рентабельности инвестиций как вероятность события

$$RROI = P\,(ROI < ROI_3), \quad (13)$$

где ROI_3 – заданное значение показателя рентабельности инвестиций.

10. Срок окупаемости инвестиций (в годах)

$$TO = MIn/MOP, \quad (14)$$

где MIn – математическое ожидание инвестиций.

Увеличение прибыльности перевозок пассажиров является лишь одним из необходимых условий эффективности инвестиционного проекта. Не менее важным фактором является срок окупаемости инвестиций.

В нашем исследовании законы распределений случайных величин выбираются из следующего набора:

1) нормальный закон (N);

2) усеченный нормальный закон (UN) на интервале $(0, \infty)$;

3) бета-распределение (B) на интервале (a, b);

4) гамма-распределение (G);

5) логарифмически-нормальное распределение (LN);

6) распределение Бирнбаума – Саундерса (BS).

Выбор бета-распределения связан с наличием двух параметров формы, что обеспечивает ему большую гибкость. Нормальный закон при определенном соотношении между математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением удовлетворяет условию положительности точки безубыточности. Для практики вполне достаточно, чтобы это соотношение было больше 3,5. Поэтому нормальный закон также может быть моделью для наших случайных величин. Для остальных законов значения случайной величины принадлежат интервалу $(0, \infty)$.

При решении задач методом имитационного моделирования возникает необходимость получать на ЭВМ последовательности выборочных значений случайной величины с заданным распределением. Этот вопрос рассмотрен в работе [4].

Исходные данные и задачи моделирующей программы

Иркутским университетом путей сообщения (ИрГУПС) совместно с Восточно-Сибирским филиалом (ВСФ) ОАО «ФПК» разработана имитационная модель в виде моделирующей программы, реализующая вероятностный анализ безубыточности, для исследования пассажирских перевозок дальнего следования.

В качестве исходных данных были взяты данные ВСФ за 2009 год (средние значения): а) постоянные затраты – 2430,3 млн руб.; б) переменные затраты – 0,631; в) цена единицы пассажирооборота – 1,052; г) дотация – 1158,8 млн руб.; д) пассажирооборот – 3702 млн пасс-км. Расчет по формуле (3) (расчет по средним) дает следующий результат для точки безубыточности – 3020,2 млн пасс-км. Операционная прибыль в 2009 году составила 288,9 млн руб.

Исследование показателей (3–14) реализуется четырьмя модулями моделирующей программы (четыре задачи):

1. Моделирование точки безубыточности (Q_0) и вложенного дохода на единицу пассажирооборота (*Z*), формула (3). При имитационном моделировании для точки безубыточности и вложенного дохода на единицу продукции определяются гистограммы относительных частот, а также точечные и интервальные оценки математического ожидания. Для этой задачи необходимы следующие исходные данные: *n* – объем выборки, *m* – число интервалов для гистограммы, функции распределения случайных величин *X, Y, K, D* и их числовые характеристики.

2. Моделирование операционной прибыли (*OP*) и вложенного дохода (*CM*), формулы (4)–(5), операционного рычага (6), запаса безопасности (7)–(9). При имитационном моделировании для вложенного дохода и операционной прибыли определяются: а) гистограммы относительных частот б) точечные и интервальные оценки математического ожидания в) точечная оценка коэффициента корреляции между вложенным доходом и операционной прибылью. Для этой задачи необходимы следующие исходные данные: *n* – объем выборки, *m* – число интервалов для гистограммы, функции распределения случайных величин *X, Y, K, D, Q* и их числовые характеристики.

3. Моделирование операционного риска (S_{op}, V_{op} , *R*), формулы (10), (11). Для операционного риска (11) определяется оценка вероятности и доверительный интервал. Помимо трех показателей операционного риска определяются две зависимости: 1) $R(OP_з)$ при заданном объеме пассажирооборота ($Q_з$), $T1 < OP_з < T2$; 2) *R(Q)* при заданной операционной прибыли, $Q1 < Q < Q2$. Для этой задачи необходимы следующие исходные данные: *n* – объем выборки, *m* – число интервалов для гистограммы, функции распределения случайных величин *X, Y, K, D, Q* и их числовые характеристики. Необходимы также значения *T1, T2, Q1, Q2,*
$OP_з$, $Q_з$.

4. Моделирование показателя рентабельности инвестиций (12), срока окупаемости (14), риска по показателю рентабельности инвестиций (13). Для показателя риск (*ROI*) определяется оценка вероятности и доверительный интервал. Дополнительно определяется зависимость *ROI(Q)* при заданном значение показателя рентабельности инвестиций, $Q1 < Q < Q2$. Для этой задачи необходимы следующие исходные данные: *n* – объем выборки, *m* – число интервалов для гистограммы, функции распределения случайных величин *X, Y, K, D, Q, In* и их числовые характеристики. Необходимы также значения *Q1, Q2,* ROI_3.

Результаты исследований

При проведении исследований исходные данные рассматривались как случайные величины с коэффициентом вариации (7–10) % по созданной моделирующей программе. Экспериментально установлено, что даже при незначительных коэффициентах вариации исходных данных коэффициент вариации операционной прибыли имеет значительное значение.

Ниже приведены результаты исследования, связанного с анализом влияния неопределенности исходных данных на показатели пассажирских перевозок.

Базовый вариант (А) имеет такие значения:

– величина K распределена по нормальному закону с числовыми характеристиками $m_k = 2430{,}3$ и $s_k = 243{,}0 – N(m_k, s_k)$;

– величина X распределена по нормальному закону с числовыми характеристиками $m_x = 0{,}631$ и $s_x = 0{,}050 – N(m_x, s_x)$;

– величина Y распределена по закону гамма-распределения с числовыми характеристиками $m_y = 1{,}052$ и $s_y = 0{,}074 – G(m_y, s_y)$;

– величина D распределена по закону бета-распределения: $m_d = 1158.8$, $s_d = 115.9$, $a = 958.1$, $b = 1359{,}5 – B(m_d, s_d)$;

– величина Q распределена по закону Бирнбаума – Саундерса с числовыми характеристиками $m_q = 3800$ и $s_q = 380 – BC(m_q, s_q)$;

– величина In распределена по закону логарифмически-нормального распределения с числовыми характеристиками $m_{in} = 600$ и $s_{in} = 60 – Ln(m_{in}, s_{in})$.

Для варианта А по созданной моделирующей программе получены следующие результаты: 1) оценка математического ожидания величины точки безубыточности (3) равна 3186,2 млн пасс-км, а доверительный интервал для математического ожидания (3165,2–3207,2); 2) оценка математического ожидания величины операционной прибыли (5) равна 326,8 млн руб., а доверительный интервал для математического ожидания (317,7–336,0); 3) оценка коэффициента вариации операционной прибыли (10) равна 143,6 %; таким образом, вследствие случайности исходных данных операционная прибыль имеет значительный разброс; 4) оценка операционного риска (11) при заданной операционной прибыли, равной 0, равна 0,248, а доверительный интервал для риска (0,240–0,256); в этом случае операционный риск характеризует вероятность убытка; 5) оценка срока окупаемости инвестиций (14) равна 1,82 года, а доверительный интервал срока окупаемости (1,77–1,87).

Далее был создан вариант Б, для которого дотация была уменьшена на 100 млн руб. Для варианта Б: а) оценка математического ожидания величины операционной прибыли равна 227,6 млн руб., а доверительный интервал для математического ожидания (218,7–236,6); б) оценка операционного риска при заданной операционной прибыли, равной 0, равна 0,248, а доверительный интервал для риска (0,240–0,256); в) оценка срока окупаемости инвестиций равна 2,57 лет, а доверительный интервал срока окупаемости (2,47–2,67). Вследствие уменьшения дотации показатели по сравнению с вариантом А ухудшились.

Далее был создан вариант В, у которого относительно варианта Б на 10 % уменьшены постоянные затраты. Для варианта В: а) оценка математического ожидания величины операционной прибыли равна 471,7 млн руб., а доверительный интервал для математического ожидания (462,9–480,4); б) оценка операционного риска при заданной операционной прибыли, равной 0, равна 0,138, а доверительный интервал для риска (0,131–0,144); в) оценка срока окупаемости инвестиций равна 1,30 года, а доверительный интервал срока окупаемости (1,27–1,32). Вследствие уменьшения постоянных затрат показатели по сравнению с вариантом Б улучшились.

Далее был создан вариант Г, у которого относительно варианта Б на 6 % увеличена цена единицы пассажирооборота. Для варианта Г: а) оценка математического ожидания величины операционной прибыли равна 423,8 млн руб., а доверительный интервал для математического ожидания (414,3–433,3); б) оценка операционного риска при заданной операционной прибыли, равной 0, равна 0,191, а доверительный интервал для риска (0,183–0,199); в) оценка срока окупаемости инвестиций равна 1,42 года, а доверительный интервал срока окупаемости (1,39–1,46). Вследствие увеличения цены единицы пассажирооборота показатели по сравнению с вариантом Б улучшились.

Таким образом, можно планировать различные варианты исходных данных и по моделирующей программе вычислять показатели пассажирских перевозок. Далее путем сравнения этих вариантов возможно создать программу развития региональной дирекции по перевозке пассажиров. Преимуществом имитационно-аналитического подхода является учет неопределенности исходных данных и количественная оценка показателей пассажирских перевозок.

Моделирующая программа имеет развитую систему графического представления информации. На рис. 1–4 представлены возможности графического представления для варианта Г: на рис. 1 представлена гистограмма относительных частот величины операционной прибыли; на рис. 2 представлена гистограмма относительных частот точки безубыточности; на рис. 3 – гистограмма относительных частот показателя рентабельности инвестиций; на рис. 4 – зависимость операционного риска (11) от заданной операционной прибыли при заданном объеме пассажирооборота.

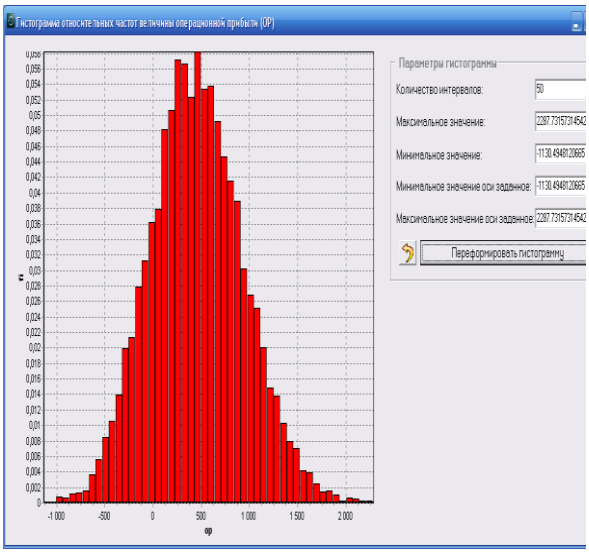


Рис. 1. Гистограмма относительных частот величины операционной прибыли

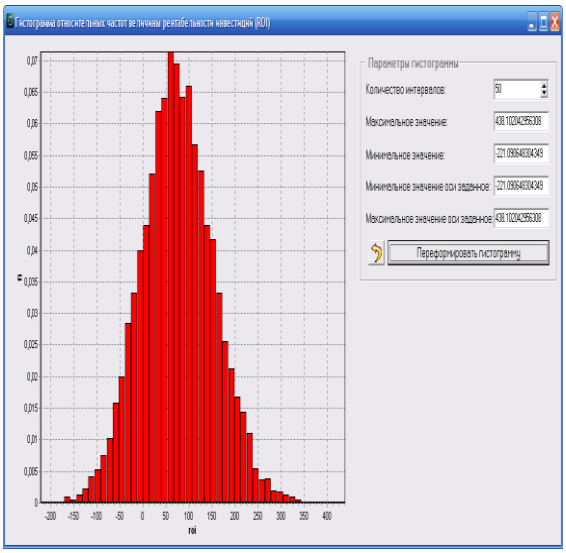


Рис. 3. Гистограмма относительных частот показателя рентабельности инвестиций

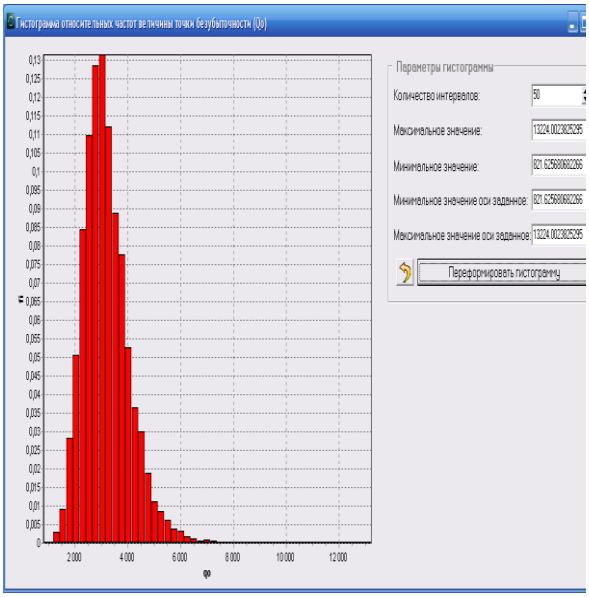


Рис. 2. Гистограмма относительных частот точки безубыточности

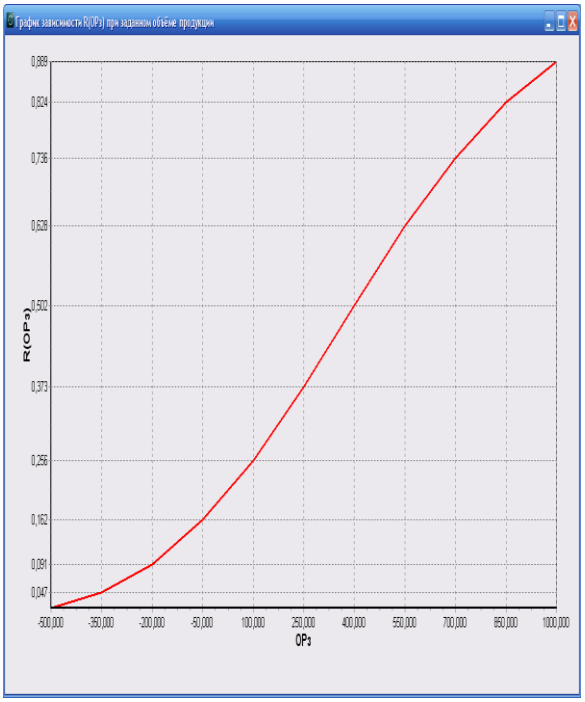


Рис. 4. Зависимость операционного риска от заданной операционной прибыли

Выводы

1. Необходимость управления доходностью пассажирских перевозок требует создания специальных инструментов для моделирования взаимодействия расходов, доходов, ценообразования, операционной прибыли, рентабельности инвестиций и срока их окупаемости.

2. Учитывая, что это моделирование должно основываться на прогнозных значениях исходных данных, в качестве такого инструмента предложен и разработан вероятностный анализ безубыточности, реализованный в виде имитационной модели.

3. Наличие имитационной модели для вероятностного анализа безубыточности особенно важно для региональных филиалов ФПК, так как она позволит разработать обоснованные программы снижения издержек с сохранением необходимой прибыли и рентабельности. Это связано с тем, что имеется возможность не качественной, а количественной оценки ситуации в будущем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кожевников Р. А., Паристый И. С. Реформа ориентирует на доход // Мир транспорта. 2009, №2. С. 60–65.
2. Акулов М. П. О создании дочернего общества ОАО «РЖД» в сфере перевозок пассажиров в дальнем следовании // Ж.-д. трансп. 2010. № 1. С. 22–26.
3. Савчук В. П. Управление прибылью и бюджетирование. М. : БИНОМ, 2005. 432 с.
4. Краковский Ю. М., Калиновский С. Г., Селиванов А. С. Математическое обеспечение моделирования случайной величины при вероятностном анализе безубыточности // Информационные технологии и проблемы математического моделирования сложных систем. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2009. Вып. 7. С. 137–143.

621.311: 621.331

Алексеенко Владимир Александрович,
аспирант ГОУ ВПО Иркутский государственный университет путей сообщения,
e-mail: bezvoprosov03@mail.ru
Крюков Андрей Васильевич,
д. т. н., профессор, ГОУ ВПО Иркутский государственный университет путей сообщения,
e-mail: avk@irgups.ru

ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ АНАЛИЗА ПОВРЕЖДАЕМОСТИ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

V.A. Alekseenko, A.V. Kryukov

APPLICATION OF STATISTICAL METHODS FOR THE RAILWAY ELECTRICAL POWER SUPPLY DEVICES DAMAGEABILITY ANALYSIS

Аннотация. *Предложена методика статистического анализа повреждаемости электрооборудования систем тягового электроснабжения железных дорог переменного тока. Результаты такого анализа можно использовать: при разработке мероприятий по повышению надежности электроснабжения; при корректировке стратегий оперативного управления режимами СТЭ; для анализа причин возникновения аварийных ситуаций.*

Ключевые слова: *системы тягового электроснабжения железных дорог переменного тока, статистический анализ повреждаемости электрооборудования.*

Abstract. *The technique of the statistical analysis of an alternating current railway electrical power supply traction systems electric equipment damageability is proposed. Results of such analysis can be used: by working out actions for reliability augmentation of electrical power supply; at updating strategy of an operational control by modes of railway electrical power supply traction systems; for the analysis of emergencies occurrence reasons.*

Keywords: *alternating current railway electrical power supply traction systems, the statistical analysis of electric equipment damageability.*

Введение

Увеличение масс грузовых поездов является одним из основных резервов роста пропускной способности железных дорог и положительно сказывается на экономике ОАО «РЖД» и его филиалов. Однако движение тяжеловесных поездов создает значительные нагрузки на элементы систем тягового электроснабжения (СТЭ), увеличивая износ электрооборудования. Кроме того, в отдельные моменты времени, например при восстановлении графика движения в послеоконный период, имеют место режимы, которые создают пиковые нагрузки на элементы СТЭ, значительно превышающие номинальные.

Указанные обстоятельства диктуют необходимость разработки научно-обоснованного комплекса методов и средств, направленных на повышение эксплуатационной надежности СТЭ. Такой комплекс должен базироваться на детальном анализе повреждаемости электрооборудования

СТЭ с применением современных математических моделей и методов [1–5].

В настоящей статье представлены результаты исследований, направленных на создание компьютерных технологий анализа повреждаемости электрооборудования СТЭ. Результаты такого анализа можно использовать:

– при разработке мероприятий по повышению надежности электроснабжения;
– при корректировке стратегий оперативного управления режимами СТЭ;
– для анализа причин возникновения аварийных ситуаций.

Анализ на основе принципа Парето

Для решения задач повышения надежности электрооборудования, т. е. сокращения частоты возникновения отказов? можно применить статистические методы повышения качества. Часто большинство повреждений обусловлено незначительным числом типов оборудования. Выяснив причины появления существенно важных отказов, можно устранить почти все простои, сосредоточив усилия на ликвидации именно этих причин. Такого рода проблемы можно успешно решать с помощью диаграмм Парето, позволяющих выявить важные факторы, оказывающие наибольшее влияние на отказы, с тем чтобы сосредоточить первоочередные усилия на устранение их влияния.

Диаграмма Парето, построенная на основании данных по ВСЖД за 10 лет (табл. 1), приведена на рис. 1. Из этого рисунка видно, что на 50 % оборудования приходится 80 % повреждений.

Таблица 1

Распределение числа повреждений по видам оборудования

Тип оборудования	Число повреждений	Доля, %
Выключатели	126	36,00
Измерительные трансформаторы	54	15,43
Токоведущие части	44	12,57
Разъединители и отделители	38	10,86
Изоляторы	28	8,00
Силовое оборудование	24	6,86
Разрядники и ОПН	17	4,86
Вторичные цепи	15	4,29
Компенсирующие устройства	4	1,14
ИТОГО	350	100,00

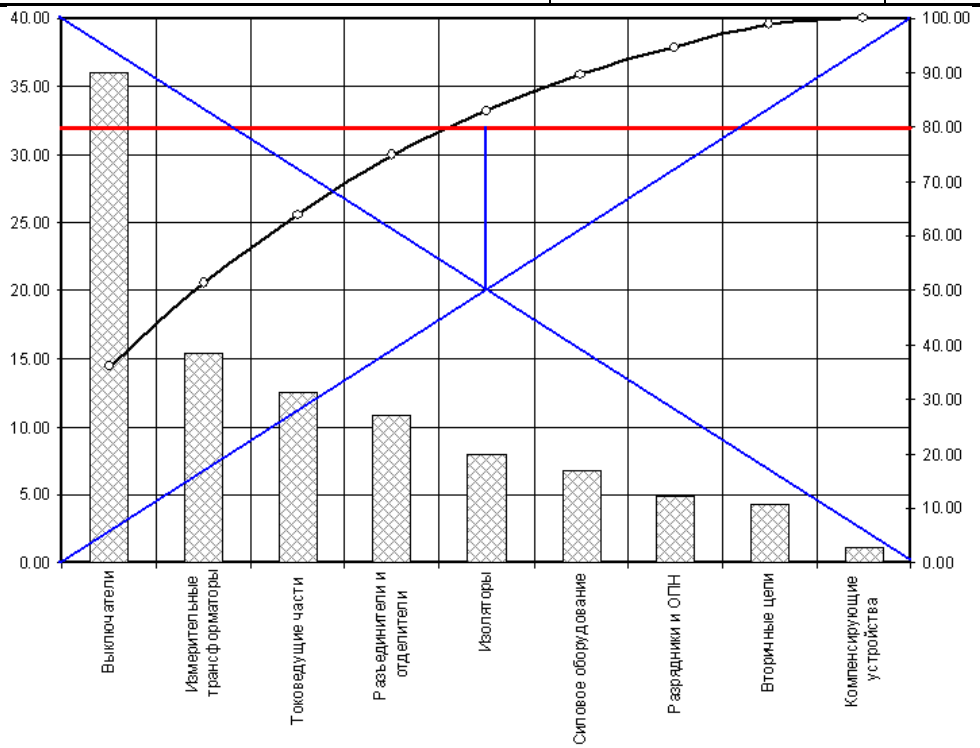


Рис. 1. Диаграмма Парето по видам оборудования

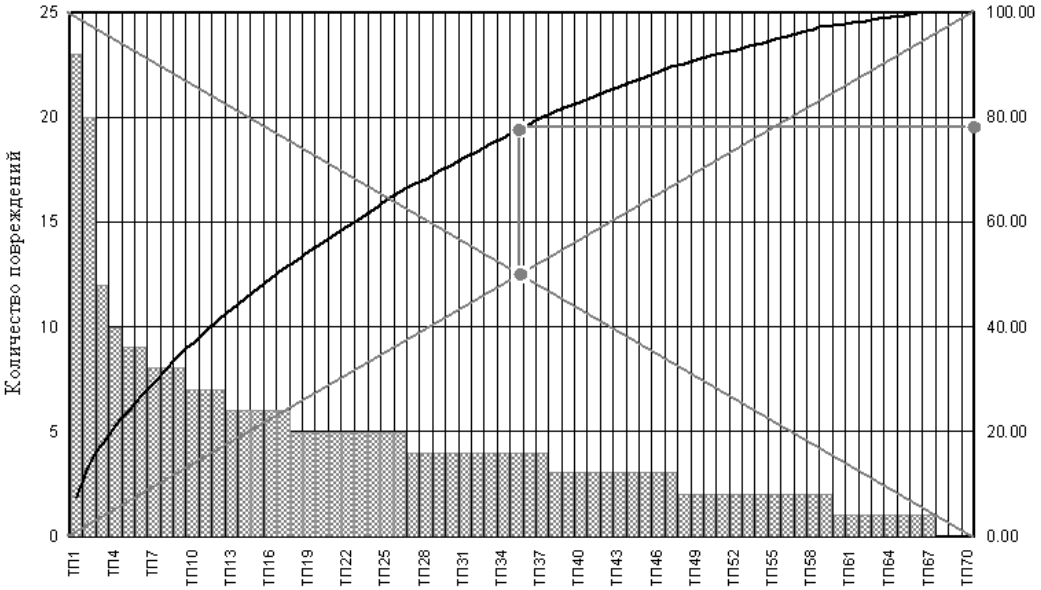


Рис. 2. Диаграмма Парето по ТП

Аналогичный анализ может быть выполнен и по тяговым подстанциям (рис. 2). Из анализа представленной на рис. 2 диаграммы можно сделать вывод о том, что 80 % повреждений приходится примерно на 50 % тяговых подстанций.

Таким образом, анализ на основании принципа Парето позволяет сделать следующие выводы:

1. Наиболее проблемным видами оборудования, на которые приходится до 80 % повреждений, являются: выключатели, измерительные трансформаторы, токоведущие части, разъединители и отделители, изоляторы.

2. Большая часть (80 %) повреждений электрооборудования приходится на 50 % тяговых подстанций ТП1…ТП35.

Корреляционный анализ повреждаемости

Интенсивность потока отказов электрооборудования должна быть статистически связана с интенсивностью его использования. Последняя может быть оценена по годовому объему перерабатываемой на ТП электроэнергии W_{CP}. Результаты корреляционного анализа между числом повреждений за период с 2002 по 2008 годы и среднегодовым объемом перерабатываемой электроэнергии для ряда дистанций электроснабжения (ЭЧ) ВСЖД приведены на диаграмме, представленной на рис. 3.

В соответствии с общепринятой классификацией корреляционных связей для ЭЧ-8 и 9 наблюдается сильная (или тесная) корреляционная связь, для ЭЧ-1 эта связь может быть оценена как средняя, для ЭЧ-2 и ЭЧ-5 как умеренная, а для ЭЧ-10 как слабая. Для небольшой части оставшихся ЭЧ (6, 7 и 11) ВСЖД отсутствует корреляционная связь между повреждаемостью и объемом перерабатываемой электроэнергии, что может

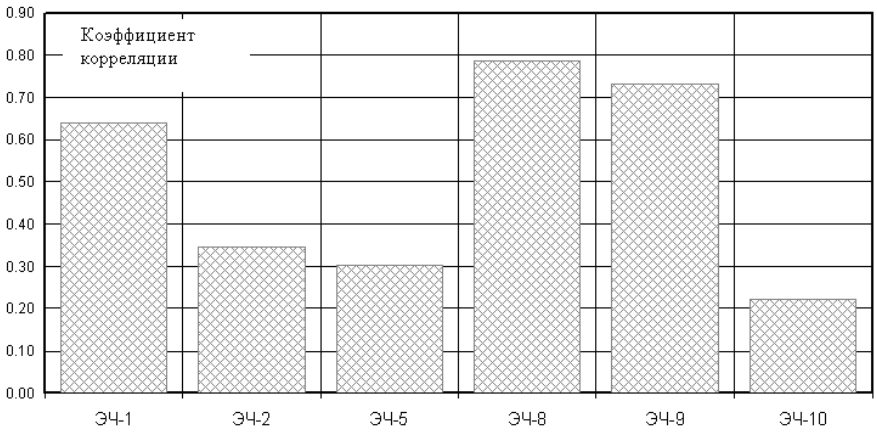


Рис. 3. Коэффициент корреляции, выражающий зависимость количества повреждений от среднегодового объема перерабатываемой электроэнергии

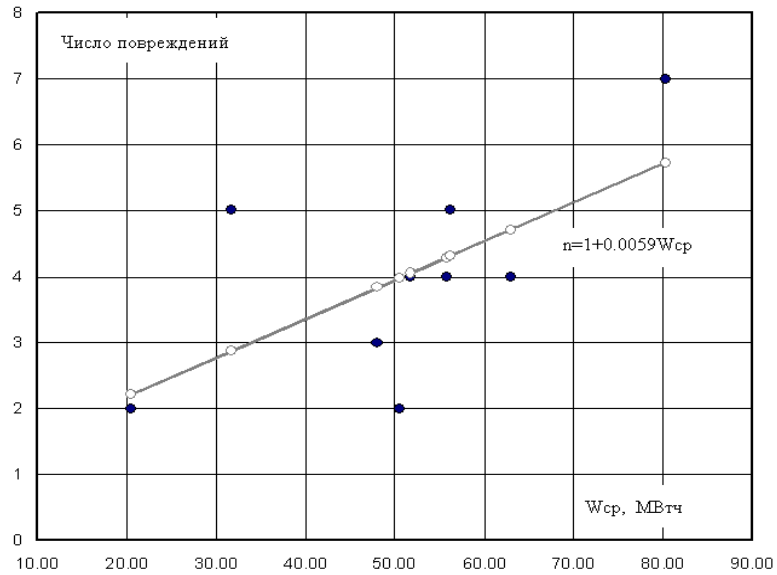


Рис. 4. Регрессионный анализ повреждаемости для ЭЧ-1: проверка по критерию Фишера Fр=4,82> Fзн=0,064

быть объяснено, в частности, недостаточно высоким качеством предоставляемой из этих подразделений статистической информации.

Регрессионный анализ повреждаемости

На основе результатов предыдущего раздела может быть проведен регрессионный анализ с помощью которого возможно выполнение оценочных прогнозов повреждаемости для ЭЧ, имеющих значимые корреляционные связи между объемами перерабатываемой ЭЭ и повреждениями электрооборудования. В качестве примера ниже приведены результаты регрессионного анализа для ЭЧ-1 (рис. 4).

Связь повреждаемости электрооборудования с геомагнитными явлениями

В работах [1, 2] отмечается влияние геомагнитных явлений на повреждаемость электрооборудования и надежность электроснабжения. В частности, вследствие электромагнитных бурь возникают геоиндуктированные токи, протекающие в контурах нулевой последовательности протяженных ЛЭП и вызывающие насыщение стали сердечников силовых трансформаторов. При характерной частоте токов 0,001…0,1 Гц их амплитуда может достигать 200 А. В случае протекания таких квазипостоянных токов в протяженной электрической сети кривые намагничивания сердечников трансформаторов могут сместиться, что приведет к их насыщению. В результате происходит увеличение токов намагничивания и рост уровня гармоник в электрической сети, что, в свою очередь, приводит к перегрузке емкостных элементов оборудования, локальным перегревам обмоток и элементов конструкций трансформаторов, деградации изоляции. Таким образом, геомагнитные воздействия имеют кумулятивные эффекты, снижающие срок службы оборудования. Сказанное в полной мере относится к системам тягового электроснабжения, представляющим собой протяженные электрические сети, питающиеся от трансформаторов с заземленными нейтралями. Ниже приведены данные, свидетельствующие достаточно тесной корреляционной связи годового числа повреждений электрооборудования ВСЖД с солнечной активностью, характеризуемой среднегодовыми числами Вольфа (табл. 2 и рис. 5). Эта связь может быть использована для оценочных прогнозов повреждаемости при управлении системой тягового электроснабжения.

Таблица 2

Связь числа повреждений с солнечной активностью. ВСЖД

Год	Среднегодовые числа Вольфа V	Число повреждений
2001	102	32
2002	104,1	39
2003	63,6	32
2004	40,4	28
2005	29,8	30
2006	15,2	22
2007	7,5	14

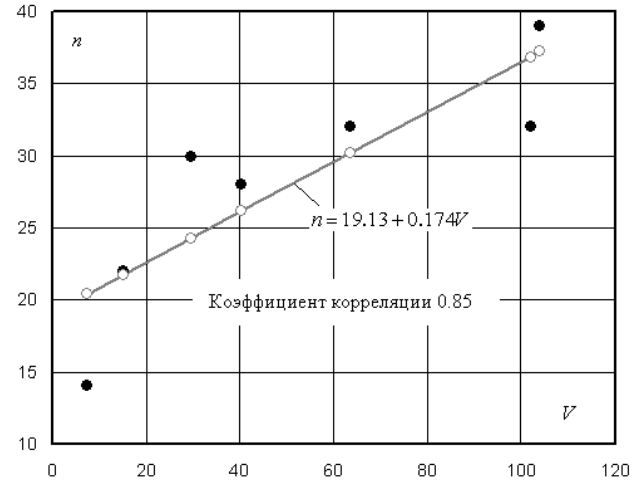


Рис. 5. Связь повреждаемости с солнечной активностью. ВСЖД, проверка по критерию Фишера
F = 13,12; $F_{зн}$ = 0,015

Аналогичные результаты наблюдаются и для Красноярской железной дороги (рис. 6 и 7). Причем в данном случае имеет место максимум повреждаемости, приблизительно совпадающий с пиком солнечной активности.

Рис. 6. Повреждаемость электрооборудования КрасЖД и среднегодовые числа Вольфа: V – число повреждений

Заключение

На этапах планирования режимов СТЭ, разработки мероприятий по повышению надежности и бесперебойности электроснабжения, выработки оптимальных стратегий оперативного управления режимами тяговых сетей можно применять предложенные в настоящей статье статистические методы анализа повреждаемости электрооборудования.

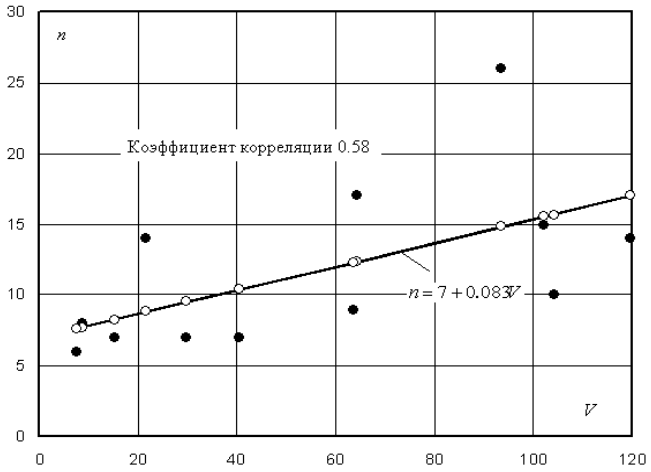


Рис. 7. Регрессионный анализ: проверка по критерию Фишера ***F = 5,15; $F_{зн}$ = 0,046***

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воздействие геомагнитных явлений на качество и надежность электроснабжения / Платонова Е. В., Чистякова Г. Н., Еремина Е. А. // Девятая Рос. науч.-техн. конф. по электромагн. совместимости техн. средств и электромагн. безопасности : сб. докл. – СПб., 2006. – С. 77–81.
2. Lehtinen M., Pirjola R. Currents Produced in Earthed Conductor Networks by Geomagnetically – Induced Electric Filds // Anales Geophysical. 1985. Vol. 3, no. 4.
P. 479–484.
3. Калашников Б. Г., Морошкин Ю. В., Скопинцев В. А. Оценка сезонных циклов аварийности в электроэнергетических системах // Электричество. 2002. № 7. С. 2–8.
4. Скопинцев В. А. Циклы аварийности в электроэнергетических системах // Электрические станции. 1997. № 7. С. 31–37.
5. Крюков А. В., Закарюкин В. П., Алексеенко В. А. Анализ повреждаемости электрооборудования тяговых подстанций на основе многомерных статистических методов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. № 1 (21). С. 99–102.

УДК 007, 519

Истомин Андрей Леонидович,
проректор по учебной работе Ангарской государственной технической академии (АГТА),
к. т. н., доцент, тел. (3955) 67-88-45, e-mail: istomin@agta.irmail.ru
Баденников Артем Викторович,
ректор Ангарской государственной технической академии,
к. т. н., доцент, тел. (3955) 67-89-06, e-mail:rector@agta.irmail.ru
Балакирев Валентин Сергеевич,
профессор кафедры технической кибернетики и автоматики
Московского государственного университета инженерной экологии,
д. т. н., профессор, тел. (495) 267-12-67

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ПЛАНИРОВАНИИ И ОРГАНИЗАЦИИ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА В ВУЗЕ

A.L. Istomin, A.V. Badenikov, V.S. Balakirev

SYSTEM DECISION SOFTWARE IN PLANNING HIGHER EDUCATIONAL PROCESS

Аннотация. *Предложена комплексная математическая модель задачи оптимизации планирования учебного процесса в вузе, реализованная в двухуровневой системе принятия решений.*

Ключевые слова: *вуз, учебный процесс, оптимизация.*

Abstract. *The complex optimization mathematical model of the university educational process planning in two-level system decision is offered.*

Keywords: *higher education, educational process, optimization.*

Введение

Современный вуз представляет собой сложную организационно-экономическую систему, эффективность функционирования которой существенно зависит от качества управления этой системой. Традиционно сложилось, что сбор информации в вузе, а также задачи ее обобщения и осмысления и, самое главное, оптимизации возлагаются на управленческий персонал. При управлении вузом органы управления опираются на большие объемы информации, отражающие основные стороны функционирования вуза. Процесс поиска оптимального или просто приемлемого в каком-либо смысле, управления вузом в этих условиях носит интуитивный характер и осуществляется методом «проб и ошибок», что часто приводит не только к значительным материальным потерям, но и к потере качества подготовки специалистов.

В вузе одновременно протекает большое число процессов, различающихся как по своему назначению, так и по основным показателям. В то же время характер управленческих решений, принимаемых в вузе, масштаб последствий от принятия решений позволяют выделить в качестве основного учебный процесс. Именно учебный процесс обеспечивает выполнение уставных задач вуза; на учебный процесс направляются основные ресурсы; от организации учебного процесса зависят основные показатели функционирования вуза, его эффективность и качество подготовки специалистов.

Широкое внедрение ЭВМ в практику управления вузом позволило значительно улучшить качество организации и планирования учебного процесса, в том числе с помощью решения оптимизационных задач на базе математических моделей. В последние годы были достигнуты значительные практические результаты в области системного исследования отдельных технологических процессов, протекающих в вузе. С помощью математических методов решались задачи проектирования учебных планов, появилось большое количество автоматизированных систем составления расписания занятий, на базе ЭВМ разработаны автоматизированные системы учета контингента студентов, расчета заработной платы и стипендий и т. д. Вместе с тем надо признать, что управление различными процессами в вузах до сих пор носит разрозненный характер, принципы системного анализа используются недостаточно, автоматиза-

ция в вузе в основном сводится к внедрению автоматизированных рабочих мест управленческого персонала, отсутствует общесистемная проработка целей управления, принятие решений в вузе осуществляется без учета экономических факторов. Зачастую при наборе студентов на первый курс, формировании учебных планов, распределении ресурсов между подразделениями, составлении расписания занятий господствуют не экономические, а «образовательно-педагогические» критерии, ориентированные на то, чтобы «любой ценой» под плановые цифры, далекие подчас от экономической оправданности, обеспечить «требуемую» подготовку специалистов с высшим образованием. Вот почему на нынешнем этапе развития работ по совершенствованию управления в высшей школе особую важность приобретают работы, посвященные формализованному планированию и организации учебного процесса в вузе на основе экономических критериев, современных методов теории управления и оптимизации. Пока теоретические основы такого рода задач в управлении учебным процессом в вузе разработаны недостаточно. В этой связи актуальными становятся разработка и внедрение моделей, методов и алгоритмов информационной поддержки принятия решений при планировании и организации учебного процесса в вузе, обеспечивающих его экономическую эффективность.

Планирование и организация учебного процесса в вузе

В соответствии с логико-временной последовательностью принятия решений при организации учебного процесса в вузе можно выделить следующие основные подзадачи, каждая из которых может рассматриваться как обособленный объект управления:

1) планирование контингента студентов, в том числе установление плана приема и формирование контингента студентов 1-го курса;

2) планирование содержания, форм и методов подготовки специалистов (график учебного процесса, учебные планы образовательных программ);

3) распределение материальных, трудовых и финансовых ресурсов при планировании учебного процесса;

4) составление расписания учебных занятий.

Рассмотрим эти подзадачи планирования учебного процесса, определим их экономический смысл и элементы, оказывающих на них влияние.

Контингент студентов является важнейшим экономическим показателем эффективности учебного процесса. От контингента студентов зависит штатное расписание ППС, суммарная нагрузка преподавателей, количество групп и потоков, требуемое количество аудиторий в расписании занятий, единиц литературы в фондах библиотеки, объем государственного финансирования обучения бюджетных студентов, объем средств, поступивших от обучающихся на платной основе, и т. д. При известном контингенте студентов на всех курсах, кроме первого, планирование контингента студентов сводится к нахождению плана приема студентов на первый курс. Зачастую при формировании плана приема вузы используют наиболее простой принцип управления «от достигнутого», когда план устанавливается на основе плана предшествующего периода с некоторой корректировкой по всем или отдельным образовательным программам. Основные недостатки принципа планирования от достигнутого уровня достаточно очевидны: новый план, с одной стороны, повторяет возможно несовершенную структуру прошлого плана, а с другой, может оказаться неосуществимым, как в силу внутренних обстоятельств, например из-за недостатка ресурсов, так и в силу внешних, например отсутствия спроса на ту или иную образовательную программу. Поэтому наибольший интерес вызывает подход к планированию, известный как оптимальное планирование. Следовательно, нахождение плана приема студентов на первый курс, экономически выгодного для вуза, является важнейшей задачей в планировании учебного процесса.

Учебные планы образовательных программ задают учебную нагрузку обучающихся, объем учебных поручений кафедр, определяют затраты на организацию учебного процесса, задают качество подготовки специалиста. Составление учебных планов в вузах осуществляется специалистами высокой квалификации, требует значительных трудозатрат и зачастую производится под влиянием субъективных предпочтений. Следовательно, процесс составления учебных планов в вузе, основанный на опыте и интуиции работников высшей школы, нуждается в серьезном совершенствовании и научном обосновании принимаемых решений. Поэтому задача автоматизированного проектирования учебного плана с учетом накладываемых ресурсных ограничений, требований, задаваемых ФГОС и вузом, также является важнейшей задачей в планировании учебного процесса.

Расписание занятий определяет загрузку учебных площадей вуза, конкретизирует учебную нагрузку ППС и последовательность прохождения дисциплины по видам занятий в течение семестра, рабочей недели; оно определяет учебную работу

студентов во время аудиторных и самостоятельных занятий. Имея расписание, можно в полном объеме оценить затраты на реализацию учебного процесса. Вопросами разработки автоматизированных расписаний так или иначе занимаются многие вузы, но трудности остаются: программы несовершенны, пригодны лишь для вузов, для которых разрабатывались, трудно переносятся на другие вузы, не позволяют учесть все требования к расписанию. Кроме того, главный недостаток традиционной схемы составления расписания занятий в том, что она не предусматривает обратной связи между расписанием занятий, ресурсами вуза и экономическими показателями его реализации.

Среди задач, которые приходится решать в процессе планирования и организации учебного процесса, важнейшее место занимают задачи *распределения ресурсов*, так как от их решения также зависит экономическая эффективность учебного процесса (вуз может обладать огромными ресурсами, но распоряжаться ими крайне нерационально, и наоборот, вуз, способный оптимизировать имеющиеся ресурсы, может нормально функционировать даже при их недостатке). Из множества видов ресурсов, необходимых для обеспечения учебного процесса, важнейшими являются профессорско-преподавательский состав и фонд учебных помещений, используемый в учебном процессе. Именно от использования этих видов ресурсов в первую очередь зависят «затратность» учебного процесса и его качество. Поэтому необходим научный подход и формализованные методы, позволяющие находить наилучшее распределение ресурсов в вузе как с точки зрения качества учебного процесса, так и с экономической точки зрения.

Очевидно, что перечисленные выше задачи не могут решаться изолированно друг от друга, поскольку они взаимно влияют друг на друга. Поэтому для получения решений необходим интегрированный подход. Но чтобы реализовать такой подход, необходимо выявить возможные способы расчленения процесса принятия решений на несколько этапов, чтобы построить адекватные модели выработки отдельных решений, найти эффективные алгоритмы их решения, отладить программы для ЭВМ, построить механизмы взаимодействия результатов решений между разными подзадачами, обеспечить количественную оценку решения подзадач учебного процесса.

Математическая модель задачи

В работе предложена математическая модель задачи оптимального планирования учебного процесса в вузе в комплексе рассмотренных выше задач на базе интегрированного подхода. Из множества различных критериев эффективности планирования учебного процесса была выбрана прибыль вуза, связанная с подготовкой специалистов, поскольку прибыль вуза как никакой другой показатель наиболее полно отражает эффективность учебного процесса, объем и качество предоставляемых образовательных услуг, состояние производительности труда, уровень себестоимости, четко отражает сопоставимость и соизмеримость его результатов с затратами ресурсов.

Поскольку общая задача оптимального планирования учебного процесса в вузе характеризуется большой размерностью переменных, предложен метод декомпозиции исходной задачи на подзадачи меньшей размерности, позволяющий найти решение исходной задачи за счет распределения процедур решения между двумя уровнями иерархии. На нижнем уровне решаются локальные задачи оптимизации со своим критерием оптимальности и известными ограничениями без обмена информацией с верхним уровнем и другие локальные задачи. На верхнем уровне решается глобальная задача оптимального планирования учебного процесса.

К локальным задачам отнесены: 1) нахождение плана приема студентов в вуз, при котором доход вуза будет наибольшим; 2) нахождение оптимальной структуры ППС, при которой затраты на использование ППС будут наименьшими; 3) нахождение оптимальной структуры учебных помещений, при которой затраты на использование учебных помещений будут наименьшими.

В каждой i-й локальной задаче находится вектор оптимальных решений $\mathbf{x}_i^*$, принадлежащий $\overline{D}_i$, такой что соответствующий локальный критерий $f_i(\mathbf{x}_i)$ достигает на нем экстремума например максимума, т. е.

$$\max_{\mathbf{x}_i} f_i(\mathbf{x}_i) = f(\mathbf{x}_i^*),\ \mathbf{x}_i \in \overline{D}_i,\ \overline{D}_i = D_i \bigcap U_i, \quad (1)$$

где D_i – множество допустимых решений локальной задачи; U_i – множество допустимых решений, заданных глобальной задачей.

Модели локальных задач сформулированы следующим образом:

1-я локальная задача (нахождение оптимального плана приема студентов в вуз) [1, 2]: максимизировать

$$f_1 = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} \bar{U}_{ij}^1 \int_{-\infty}^{\bar{C}_{ij}^1} b_{ij} f(b_{ij};\mu_{ij;}\sigma_{ij})db_{ij} +$$

$$+\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} \bar{U}_{ij}^1 \bar{C}_{ij}^1 \int_{\bar{C}_{ij}^1}^{\bar{C}_{ij}^1+C_{ij}^1} f(b_{ij};\mu_{ij;}\sigma_{ij})db_{ij} +$$

$$+\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} U_{ij}^1 \int_{\bar{C}_{ij}^1}^{\bar{C}_{ij}^1+C_{ij}^1} (b_{ij}-\bar{C}_{ij}^1) f(b_{ij};\mu_{ij;}\sigma_{ij})db_{ij} + \quad (2)$$

$$+\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} \bar{U}_{ij}^1 \bar{C}_{ij}^1 \int_{\bar{C}_{ij}^1+C_{ij}^1}^{\infty} f(b_{ij};\mu_{ij;}\sigma_{ij})db_{ij} +$$

$$+\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} U_{ij}^1 C_{ij}^1 \int_{\bar{C}_{ij}^1+C_{ij}^1}^{\infty} f(b_{ij};\mu_{ij;}\sigma_{ij})db_{ij} \to \max$$

при условиях

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\sum_{p=1}^{k}\left[\alpha_j\left(\bar{C}_{ij}^p + C_{ij}^p\right)\right] \le Q, \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\sum_{p=1}^{k}\left[a_{vij}\left(\bar{C}_{ij}^p + C_{ij}^p\right)\right] \le b_v,\ v=\overline{1,w}, \quad (4)$$

$$\bar{C}_{ij}^1 \ge 0,\ C_{ij}^1 \ge 0,\ i=\overline{1,n},\ j=\overline{1,m}, \quad (5)$$

где $\bar{C}_{ij}^p$ – количество бюджетных студентов на i-й образовательной программе ($i=\overline{1,n}$), j-й форме обучения ($j=\overline{1,m}$), p-го года обучения ($p=\overline{1,k}$); C_{ij}^p – количество коммерческих студентов на i-й образовательной программе, j-й формы обучения, p-го года обучения; $\bar{U}_{ij}^1$ – государственное финансирование на подготовку бюджетного студента *1*-го года обучения на i-й образовательной программе по j-й форме обучения; U_{ij}^1 – оплата за обучение на коммерческой основе студента *1*-го года i-й образовательной программы j-й формы обучения; α_j – коэффициент приведения численности обучающихся на j-й форме обучения к численности студентов очной формы обучения; Q – предельно допустимый приведенный контингент студентов; b_v – объем v-го ресурса ($v=\overline{1,w}$), a_{vij} – норма расхода v-го ресурса на подготовку одного студента по i-й образовательной программе на j-й форме обучения.

В отличие от существующих моделей формализованного планирования приема студентов в вуз, где для нахождения оптимального плана используются детерминированные линейные модели, в настоящей работе предложена принципиально новая модель задачи оптимизации плана приема студентов вуз, в которой реализована вероятностная оценка эффективности плана. Модель задачи основывается только на располагаемой априорной информации, а решение задачи оптимизации состоит в максимизации математического ожидания целевой функции на определенном интервале времени. Это связано с тем, что в задаче формирования приема студентов его планирование происходит в условиях неопределенности, когда спрос на образовательные программы неизвестен или представляет собой случайную величину.

В выражении (2) символом b_{ij} обозначен вероятный спрос на i-ю образовательную программу j-й формы обучения, который представляет собой случайную переменную, подчиненную закону нормального распределения с плотностью $f(b_{ij};\mu_{ij};\sigma_{ij})$, математическим ожиданием μ_{ij} и стандартным отклонением σ_{ij}.

Нахождение оптимального плана приема заключается в определении количества бюджетных $\bar{C}_{ij}^1$ и коммерческих C_{ij}^1 мест на каждую образовательную программу, каждой формы обучения, при которых суммарная ожидаемая прибыль вуза максимальна.

При решении задачи все переменные считаются непрерывными.

Особенностью задачи (2)–(5) является то, что она содержит нелинейную целевую функцию (2), что относит ее к классу задач нелинейного программирования. Но, поскольку целевая функция (2) является сепарабельной, нелинейную целевую функцию можно заменить кусочно-линейными функциями, аппроксимирующими f_1 на интервале изменения переменных $\bar{C}_{ij}^1$ и C_{ij}^1, $i=\overline{1,n}$, $j=\overline{1,m}$. В результате приближенная задача становится задачей линейного программирования, которая может быть решена симплексным методом.

2-я локальная задача (нахождение оптимальной структуры ППС) [3]:

максимизировать

$$f_2 = -\left[\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\sum_{p=1}^{k}\sum_{r=1}^{s} З_r H_{ijp}^r \left(1+\lambda_{УВП/ППС}\bar{З}_{УВП}\right)\right]\times \quad (6)$$

$$\times(1+H_{ECH}/100) \to \max$$

при условиях и связях

$$\sum_{r=1}^{s} \beta^r H_{ijp}^r = \bar{Q}_{ijp},\ i=\overline{1,n},\ j=\overline{1,m},\ p=\overline{1,k}, \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\sum_{p=1}^{k}\sum_{r=1}^{s} H_{ijp}^{r} \le НЧ\,, \qquad (8)$$

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\sum_{p=1}^{k}\sum_{r=1}^{s} З_r H_{ijp}^{r} \le ФОТ\,, \qquad (9)$$

$$Z\left(\sum_{j=1}^{m}\sum_{p=1}^{k}\sum_{r=1}^{s} H_{ijp}^{r}\right) - \sum_{j=1}^{m}\sum_{p=1}^{k}\sum_{r_1=1}^{s_1} H_{ijp}^{r_1} \le 0\,,\ i=\overline{1,n}\,, \qquad (10)$$

$$H_{ijp}^{r} \ge 0\,,\ i=\overline{1,n}\,,\ j=\overline{1,m}\,,\ p=\overline{1,k}\,,\ r=\overline{1,s}\,, \qquad (11)$$

где H_{ijp}^{r} – количество ставок, занятых преподавателями r-й категории должностей ($r=\overline{1,s}$), обеспечивающих подготовку студентов p-го года обучения по i-й образовательной программе и по j-й форме обучения; $З_r$ – затраты, связанные с использованием преподавателя r-й категории должностей; $\lambda_{УВП/ППС}$ – коэффициент, учитывающий соотношение численности ставок учебно-вспомогательного персонала (УВП) и ППС; $\overline{З}_{УВП}$ – средняя заработная плата УВП; H_{ECH} – норматив начислений на заработную плату (ставка единого социального налога); $\overline{Q}_{ijp}$ – объем учебной нагрузки по i-й образовательной программе, j-й формы обучения, p-го года обучения (рассчитывается исходя из рабочих учебных планов и контингента обучающихся); β^{r} – норма учебной нагрузки в часах на одну ставку преподавателя r-й категории; Z – заданное (лицензионный норматив) значение доли ставок преподавателей с учеными степенями или учеными званиями к общему числу ставок преподавателей; $H_{ijp}^{r_1}$ – количество ставок, занятых преподавателями с учеными степенями r_1-й категории должностей ($r_1=\overline{1,s_1}$), обеспечивающих подготовку студентов p-го года обучения по i-й образовательной программе и по j-й форме обучения, ($r_1 \subset r$, $s_1 \subset s$).

Нахождение оптимальной структуры ППС заключается в определении количества H_{ijp}^{r} ставок, занятых преподавателями r-й категории должностей, обеспечивающих подготовку студентов p-го года обучения по i-й образовательной программе и по j-й форме обучения, при которых затраты на использование ППС минимальны.

Действительно, ограничение (7) контролирует выполнение учебной нагрузки по каждой образовательной программе, форме и году обучения. Условия (8) и (9) устанавливают контроль за тем, чтобы штат ППС не превысил нормативную численность, а затраты на использование ППС – фонд заработной платы. Условия (10) отвечают за то, чтобы доля ставок преподавателей с учеными степенями и учеными званиями в общем количестве ставок преподавателей по всем программам была не меньше норматива.

Задача оптимизации (6)–(11) является задачей линейного программирования, которая решается симплексным методом.

3-я локальная задача (нахождение оптимальной структуры учебных помещений) [4]:

максимизировать

$$f_3 = -\sum_{q=1}^{h} Э_q y_q \to \max \qquad (12)$$

при условиях

$$\sum_{q=1}^{h} e_{gq} x_{gq} = 1\,,\ g=\overline{1,v}\,, \qquad (13)$$

$$\sum_{g=1}^{v} x_{gq}\tau_g \le B_q \cdot y_q\,,\ q=\overline{1,h}\,, \qquad (14)$$

$$x_{gq} \in \{0,1\}\,,\ g=\overline{1,v}\,,\ q=\overline{1,h}\,, \qquad (15)$$

где y_q – количество учебных помещений q-й группы ($q=\overline{1,h}$); $Э_q$ – затраты на содержание одного учебного помещения q-й группы (эксплуатационные расходы, текущие ремонты, аренда, охрана и т. д.); B_q – фонд времени (или крайний срок) использования учебных помещений q-й группы в неделю или две недели (зависит от типа расписания, принятого в вузе).

Будем считать, что все учебные помещения q–й группы являются идентичными, например лекционные аудитории, вмещающие до одной группы обучающихся, двух групп и т. д. Группа учебных помещений может состоять и из одного учебного помещения, если оно отличается от всех остальных по функциональным признакам, вместимости и прочим характеристикам, например специализированная лаборатория по отдельной дисциплине.

Учебные помещения разных групп могут быть не вполне взаимозаменяемыми по отношению к некоторым занятиям, т. е. персональная совместимость учебных помещений q-й группы с занятиями из множества $\Im = \{T_1, T_2, ..., T_v\}$ стеснена булевой $v \times h$-матрицей $\mathbf{E} = \|e_{gq}\|$, каждый элемент которой $e_{gq}=1$ означает допустимость назначения занятия T_g в учебное помещение q-й группы, а элемент вида $e_{gq}=0$ соответствует запрету на такое назначение ($g=\overline{1,v}$, $q=\overline{1,h}$). Каждая строка матрицы $\mathbf{E}$ содержит не менее чем один, отличный от нуля элемент, т. е. для каждого

занятия множества $\Im$ подмножество совместимых с ним учебных помещений непусто.

Поясним смысл интерпретации задачи. Величина $x_{gq} \in \{0,1\}$ есть показатель того, будет ли назначено занятие T_g в учебные помещения q-й группы. Так, если $x_{gq} = 1$, то в расписании занятие T_g будет проводиться в учебных помещениях q-й группы, если $x_{gq} = 0$, то занятие T_g не будет проводиться в учебных помещениях q-й группы. Условие (13) требует, чтобы все занятия были выполнены, а наложение условия целочисленности на x_{gq} означает, что занятие T_g может быть проведено только в одном учебном помещении, так как расписание реализуется без прерываний. Условие (14) означает ограничение на длину расписания или максимальный объем времени использования учебных помещений q-й группы.

Тогда (12) означает, что задача состоит в нахождении таких значений y_q, $q = \overline{1,h}$, при которых значение f_3 (суммарные затраты на использование учебных помещений) минимально.

Следует отметить, что модель задачи (12)–(15) не учитывает взаимозависимости занятий. Однако общая практика составления расписаний занятий в вузах показывает, что общее число пар в расписании занятий в неделю или две недели в зависимости от расписания, принятого в вузе, много больше, чем число взаимозависимых или взаимосвязанных занятий у одних и тех же обучающихся или преподавателей.

Задача нахождения оптимальной структуры учебных помещений (12)–(15) сформулирована как задача целочисленного линейного программирования с булевыми переменными, принимающими значения 0 или 1, и является классической задачей дискретной оптимизации.

В глобальной задаче ищется максимум прибыли вуза, связанной с подготовкой обучающихся. Эта задача выступает как сумма целевых функций подзадач:

$$P = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} \bar{Ц}_{ij}^{1} \int_{-\infty}^{\bar{C}_{ij}^{1}} b_{ij} f(b_{ij};\mu_{ij},\sigma_{ij})db_{ij} +$$

$$+\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} \bar{Ц}_{ij}^{1}\bar{C}_{ij}^{1} \int_{\bar{C}_{ij}^{1}}^{\bar{C}_{ij}^{1}+C_{ij}^{1}} f(b_{ij};\mu_{ij},\sigma_{ij})db_{ij} +$$

$$+\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} Ц_{ij}^{1} \int_{\bar{C}_{ij}^{1}}^{\bar{C}_{ij}^{1}+C_{ij}^{1}} (b_{ij} - \bar{C}_{ij}^{1}) f(b_{ij};\mu_{ij},\sigma_{ij})db_{ij} +$$

$$+\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} \bar{Ц}_{ij}^{1}\bar{C}_{ij}^{1} \int_{\bar{C}_{ij}^{1}+C_{ij}^{1}}^{\infty} f(b_{ij};\mu_{ij},\sigma_{ij})db_{ij} +$$

$$+\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} Ц_{ij}^{1}C_{ij}^{1} \int_{\bar{C}_{ij}^{1}+C_{ij}^{1}}^{\infty} f(b_{ij};\mu_{ij},\sigma_{ij})db_{ij} +$$

$$+\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\sum_{p=2}^{k} \bar{Ц}_{ij}^{p}\bar{C}_{ij}^{p} + \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\sum_{p=2}^{k} Ц_{ij}^{p}C_{ij}^{p} - \qquad (16)$$

$$-\left[\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\sum_{p=1}^{k}\sum_{r=1}^{s} З_r H_{ijp}^{r}\left(1+\lambda_{УВП/ППС}\bar{З}_{УВП}\right)\right]\times$$

$$\times(1+H_{ECH}/100) - \sum_{q=1}^{h} Э_q y_q.$$

В глобальной задаче находится управляющее воздействие (множество $U = \bigcup_i U_i$) по соответствующему вектору $\mathbf{x}^* = \{\mathbf{x}_1^*, \mathbf{x}_2^*, \mathbf{x}_3^*\}$, характеризующему найденные в локальных задачах оптимальные решения. При этом требуется, чтобы выполнялись все ограничения и достигал максимума глобальный критерий оптимальности $P(\mathbf{x}^*)$. Эту задачу можно представить в следующем виде:

$$\max_U P(\mathbf{x}^*), \ \mathbf{x}^* \in D, \qquad (17)$$

$$\mathbf{x}^* = (\mathbf{x}^* : \mathbf{x}_i^* = Arg\max f_i(\mathbf{x}_i), \mathbf{x}_i^* \in \bar{D}_i, i = \overline{1,3}), \qquad (18)$$

где D – множество ограничений глобальной задачи, которые характеризуют взаимосвязь между отдельными локальными задачами как по входным и выходным переменным, так и по используемым ресурсам.

Для достижения оптимального решения глобальной задачи требуется неоднократно решать локальные задачи для разного множества $U = \bigcup_i U_i$, с помощью которого глобальная задача влияет на локальные задачи. При заданных величинах управляющих воздействий, а следовательно, заданном множестве $U = \bigcup_i U_i$ в каждой локальной задаче находится максимум своего локального критерия оптимальности и определяется значения вектора $\mathbf{x}_i^*$, $i = \overline{1,3}$, которые затем передаются глобальной задаче для вычисления глобального критерия оптимальности. Таким образом, управлениями для локальных задач являются множества U_i, а решением глобальной задачи – совокупность векторов $\mathbf{x}_i^*$, $i = \overline{1,3}$, получаемых после решения локальных задач оптимизации и доставляющих максимум глобальному критерию оптимальности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Истомин А. Л. Сумарокова Н. Н. Математическое обеспечение системы принятия решений при приеме студентов в вуз // Открытое образование. 2007. № 1. С. 16–20.
2. Истомин А. Л., Сумарокова Н. Н. Оптимальное планирование приема студентов в ВУЗ // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2010. № 2 (26). С. 148–155.
3. Истомин А. Л. Определение оптимальной структуры профессорско-преподавательского состава вуза и его распределение среди образовательных программ // Системы управления и информационные технологии. 2010. № 4.1 (42). С. 154–158.
4. Истомин А. Л. Декомпозиция, агрегирование и локальная оптимизация в задаче построения расписания занятий в вузе // Современные проблемы информатизации : сб. тр. XV Междунар. науч. конф. СПИ-2010. Моделирование и социальные технологии. Воронеж, 2010. С. 183–185.

УДК 621.371

Башкуев Юрий Буддич,
д. т. н., профессор, зав. лабораторией геоэлектромагнетизма Отдела физических проблем Бурятского научного центра СО РАН, профессор кафедры «Телекоммуникационные системы» ИрГУПС, e-mail: buddich@mail.ru
Аюров Дашинима Баирович,
научный сотрудник лаборатории геоэлектромагнетизма Отдела физических проблем Бурятского научного центра СО РАН, тел.: 89644053891, e-mail: dawu@mail.ru
Буянова Дарима Гармаевна,
к. ф.-м. н., доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории геоэлектромагнетизма Отдела физических проблем Бурятского научного центра СО РАН, тел.: (3012) 43-32-10, e-mail: dbuy@mail.ru

СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ДАННЫХ СПУТНИКА DEMETER

Yu.B. Bashkuev, D.B. Ayurov, D.G. Buyanova

THE DEMETER SATELLITE DATA AUTOMATED PROCESSING AND ANALYSING SYSTEM

Аннотация. *Рассмотрена система автоматизированной обработки и анализа данных спутника DEMETER. Проведен анализ данных электрического датчика ICE на примере ионосферных сейсмоэлектромагнитных эффектов Култукского землетрясения 27 августа 2008 г.*

Ключевые слова: *спутник DEMETER, информационная система, база данных, землетрясения.*

Abstract. *The demeter satellite data automated processing and analysing system is considered. The analysis of electrical sensor ICE's data as an example of ionospheric seismo-electromagnetic effects of Kultuk's earthquake on August 27, 2008 is lead.*

Keywords: *DEMETER satellite, information system, database, earthquakes.*

Введение

Спутник DEMETER – Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions был запущен 29 июня 2004 года на круговую полярную орбиту с наклонением 98,3° и высотой ~700 км и закончил работу в декабре 2010 г. Спутник разработан в CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) и контролировался из Тулузы (Франция). Спутник двигался по солнечно-синхронной орбите с параметрами: расстояние между соседними орбитами 2500 км в средних широтах, ночные полуорбиты приходятся на 22 LT, дневные полуорбиты – на 10 LT. Научные цели программы DEMETER: исследование возмущений ионосферы, связанных с сейсмической активностью, изучение до- и послесейсмических эффектов; изучение ионосферных возмущений, связанных с антропогенной деятельностью, и механизмов генерации этих возмущений; получение динамических данных о глобальном электромагнитном окружении Земли на высоте ~700 км. Для достижения этих целей DEMETER измерял шесть компонент электромагнитного поля в широком диапазоне частот и определял параметры плазмы: ионный состав, электронную концентрация и температуру, потоки энергичных электронов. Научное оборудование состояло из пяти инструментов: ICE измерял три компоненты электрического поля от постоянного тока (DC)
до 3,5 МГц; IMSC – три магнитных датчика прово-

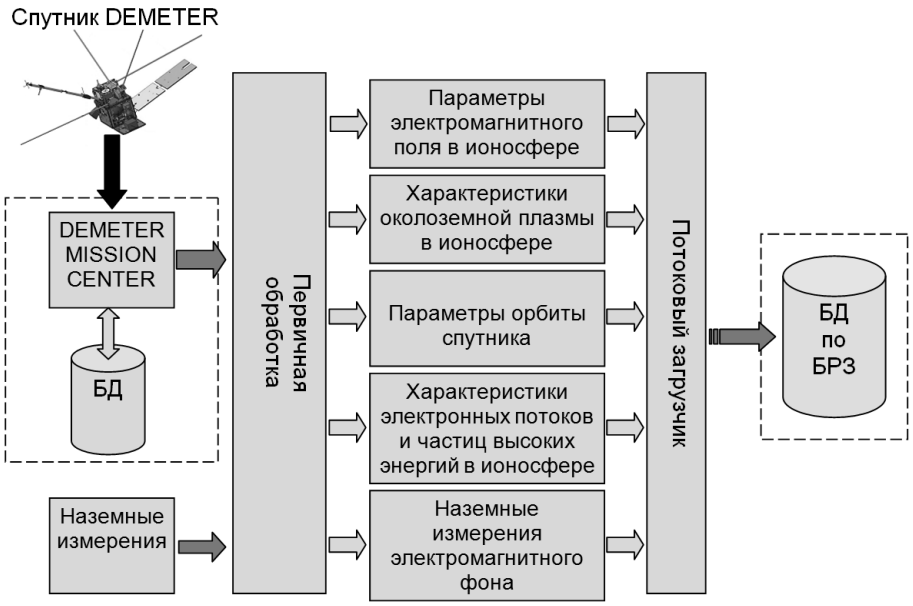


Рис. 1. Схема первичной обработки и загрузки информации в базу данных

дили измерения компонент магнитного поля от нескольких Гц до 20 кГц; IAP – анализатор ионов; IDP – детектор энергичных частиц; ISL – детектор Лэнгмюра измерял концентрацию электронов и ионов в плазме и электронную температуру [1, 2].

Система обработки и анализа данных

На основе анализа имеющихся подходов и программных средств для обработки и анализа данных спутника DEMETER установлено, что существующие решения не обеспечивают эффективного управления информационными потоками и являются узкоспециализированными. Предложена, разработана и реализована система автоматизированной обработки и анализа данных спутника DEMETER, представляющая собой эффективный инструмент для мониторинга электромагнитного окружения Земли на высотах 660–710 км. Схема первичной обработки и загрузки информации в базу данных представлена на рис. 1.

Основой разработанного программного комплекса является база данных под управлением реляционной СУБД. База данных (БД) выступает в роли централизованного хранилища результатов измерений, полученных со спутника. Она может размещаться как локально, так и на удаленном сервере сети Интернет. Таким образом, информация становится доступной группе пользователей, работающей с различными приложениями вне зависимости от их местоположения.

В случае локального размещения БД доступ к информации организуется для исследовательской группы в рамках рабочего проекта (например, локальный мониторинг состояния ионосферы). В случае удаленного размещения БД доступ к базе данных возможен из любой точки земного шара, а исследования могут носить глобальный характер, т. к. операции обработки исследовательских данных могут выполняться на самом сервере, выдавая только результат выборки из огромного массива данных для последующей обработки и интерпретации.

Ключевым моментом является организация структуры базы данных. Возможности файловой системы ограничены, и исследователю приходится продумывать способы хранения и организации экспериментальных данных. В свою очередь, СУБД предоставляют более эффективный способ обработки и управления информацией в сравнении с файловой системой. Поэтому в работе предложено хранить информацию в базе данных, более того, хранить только те параметры, которые действительно необходимы пользователю. Модель взаимодействия пользователя с БД показана на рис. 2.

Разработан способ хранения и управления информацией со спутника DEMETER на основе реляционной СУБД MySQL, позволяющий оптимизировать информационные потоки. Весь процесс обработки данных электромагнитных измерений в околоземном космическом пространстве разделен на первичную и вторичную обработку. Тестирование и оценка тактико-технических характеристик разработанного комплекса показали высокое быстродействие и эффективность управления информационными потоками. Суммарный объем обработанных рабочих данных составил 80 Гб. Разработана методика обработки и анализа сонограмм, позволяющая строить спектры с определением расстояния до заданной наземной подспутниковой точки и времени пролета спутника.

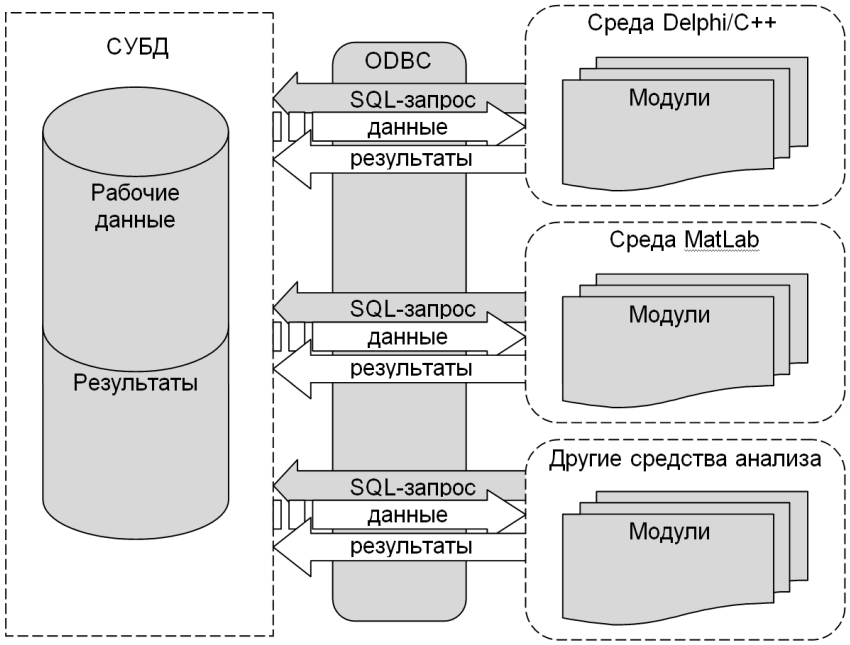


Рис. 2. Модель информационного обмена пользователя с базой данных

Суть методики состоит: а) в определении спектра в диапазоне 0–20 кГц для конкретного момента времени (положения спутника на орбите); б) в определении пространственного изменения уровня сигнала (спектральной линии) при движении спутника по полуорбите. При этом определяется абсолютный уровень спектральной плотности мощности электрической или магнитной компоненты поля. Предложенная система обработки и анализа дает возможность исследовать несколько механизмов, которые могут привести к заметным изменениям уровня поля на высотах 600–700 км при подготовке землетрясений: 1) механизм боковой волны, при котором поле сейсмоэлектромагнитных эмиссий и ОНЧ излучателей распространяется в волноводе «Земля – ионосфера» и затем просачивается через ионосферу на высоты спутника [3]; 2) дифракция волн на крупномасштабных неоднородностях ионосферы и дактовое распространение по силовым линиям в магнитосфере (в определенных условиях возмущения ионосферы могут сыграть роль собирательной линзы, фокусируя сигналы ОНЧ радиостанции на значительных расстояниях от излучателя [4]); 3) в эпицентре землетрясений сдвиги в разломных зонах могут генерировать сильные вертикальные электрические поля, которые проникают в плазмосферу и приводят к высыпанию энергичных частиц в нижнюю атмосферу и увеличиваю электронную плотность в слое D; 4) возможное взаимодействие потоков высыпающихся частиц с излучениями радиопередающих устройств в зависимости от геофизических условий может приводить к нелинейному усилению и частотному уширению излучений [5].

Пример обработки и его обсуждение

Рассмотрим в качестве примера обработки результаты исследования ионосферных сейсмоэлектромагнитных эффектов Култукского землетрясения 27 августа 2008 г. и его афтершоков по данным спутника DEMETER. Анализ данных электрического датчика ICE проведен в диапазоне 0–20 кГц.

27 августа 2008 года в 10 ч 35 мин местного времени (в 01 ч 35 мин по Гринвичу) на юге Байкала произошло сильное землетрясение. Магнитуда землетрясения составляла 6,2 (К = 15,2), глубина очага 16 км, интенсивность сейсмических сотрясений в эпицентре достигла 8 баллов. Землетрясение ощущалось на большой территории Сибири – от г. Красноярска до г. Читы. Максимальные сейсмические сотрясения отмечались в пос. Култук, расположенном на побережье Байкала. Очаг землетрясения располагался в пределах Байкальской рифтовой зоны, характеризующейся высокой сейсмичностью. В этой части Байкала неоднократно отмечались сильные землетрясений с магнитудами до 7 [6].

В ОНЧ-НЧ-СЧ-диапазонах спутник регистрировал естественное электромагнитное поле и сигналы ОНЧ-НЧ-СЧ-передатчиков в двух диапазонах частот от единиц Гц до 20 кГц и ~3 кГц до 3,3 МГц. В период подготовки землетрясения 27 августа 2008 г. и его афтершоков с 23 по 30 августа 2008 г. вблизи очага землетрясения прошли 20 дневных и ночных полуорбит спутника [7]. На рис. 3 представлены в качестве примера сонограммы дневных полуорбит 23 и 26 августа 2008 г. над областью подготовки землетрясения.

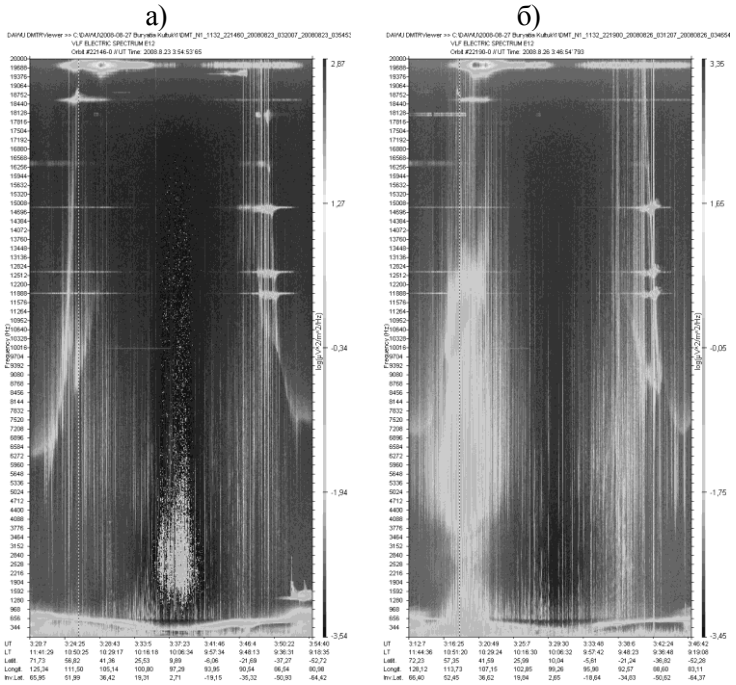


Рис. 3. Дневные сонограммы по электрической компоненте в диапазоне 0-20 кГц:
а) 22146_0 (23.08.08, 3:20/11:41 – 3:54/9:18 UT/LT); б) 22190_0 (26.08.08, 3:12/11:44 – 3,46/9:19 UT/LT)

На сонограмме (рис. 3, а) 23.08.08 за 4 суток до землетрясения, которое произошло в 01:41:31 UT 27.08.08, и его афтершоков в 02:07:56 UT и 03:29:13 UT во время пролета спутника вблизи очага (3:22–3:30 UT) наблюдаются интенсивные излучения радиостанции NWC (19,8 кГц), отмечено уширение верхней и нижней боковых полос до 0,3–0,5 кГц. Выделяются также сигналы ОНЧ радиостанций на частотах 11,9, 12,64, 14,88, 18,3 кГц. Сонограмма, полученная 26.08.08, за сутки до землетрясения отличается от сонограммы 23.08.08 наличием широкополосного увеличения интенсивности естественных радиоизлучений в полосе частот от 1 до 13 кГц в области от 40° до 60° с. ш. и 104°–120° градусов в. д. (рис. 3, б). Разработана методика детального анализа сонограмм, позволяющая строить спектры в полосе до 20 кГц с определением расстояния до заданной наземной подспутниковой точки и времени пролета спутника. На рис. 4 представлены примеры спектров для дневного и ночного времени 23 и 27 августа 2008 г.

Анализ спектрограмм показывает, что ночной уровень естественного ОНЧ-радиоизлучения выше, чем в дневные часы. Это обстоятельство связано с изменением электродинамических характеристик ионосферы. На спектрах отчетливо видны спектральные пики ОНЧ радиостанций. При этом можно четко разделить узкие спектральные линии импульсно-фазовой радионавигационной системы «Альфа» (11,9; 12,64; 14,88 кГц) и более широкие спектральные линии ОНЧ-радиостанций 18,3; 19,8, передающих сигналы с угловой модуляцией. Спектрограммы позволяют определить абсолютный уровень спектральной линии (табл. 1) и дать оценку отношения сигнал/шум. Анализ спектров позволяет также дать оценку прохождения ОНЧ-радиоволн через ионосферу и определить абсолютные уровни ОНЧ-радиополя искусственных излучателей в разное время суток. Для распространения ОНЧ-радиоволн интересен механизм боковой волны, при котором поле ОНЧ-излучателя распространяется в волноводе «Земля – ионосфера» и затем просачивается через ионосферу на высоты спутника [3]. Существует еще несколько механизмов, которые могут привести к заметным изменениям уровня поля при подготовке землетрясений.

Таким образом, изучение сонограмм и спектров спутника DEMETER до и после Култукского землетрясения 27 августа 2008 г. показало:

– в дневное время отмечена высокая интенсивность поля радиостанции 19,8 кГц перед землетрясениями 23 и 26 августа и ее спад после землетрясений 27 и 30 августа 2008 года;

– ночные записи в период прохождения «роя» землетрясений характеризуются более сложными вариациями, которые связаны с характером ионосферных процессов в ночное время;

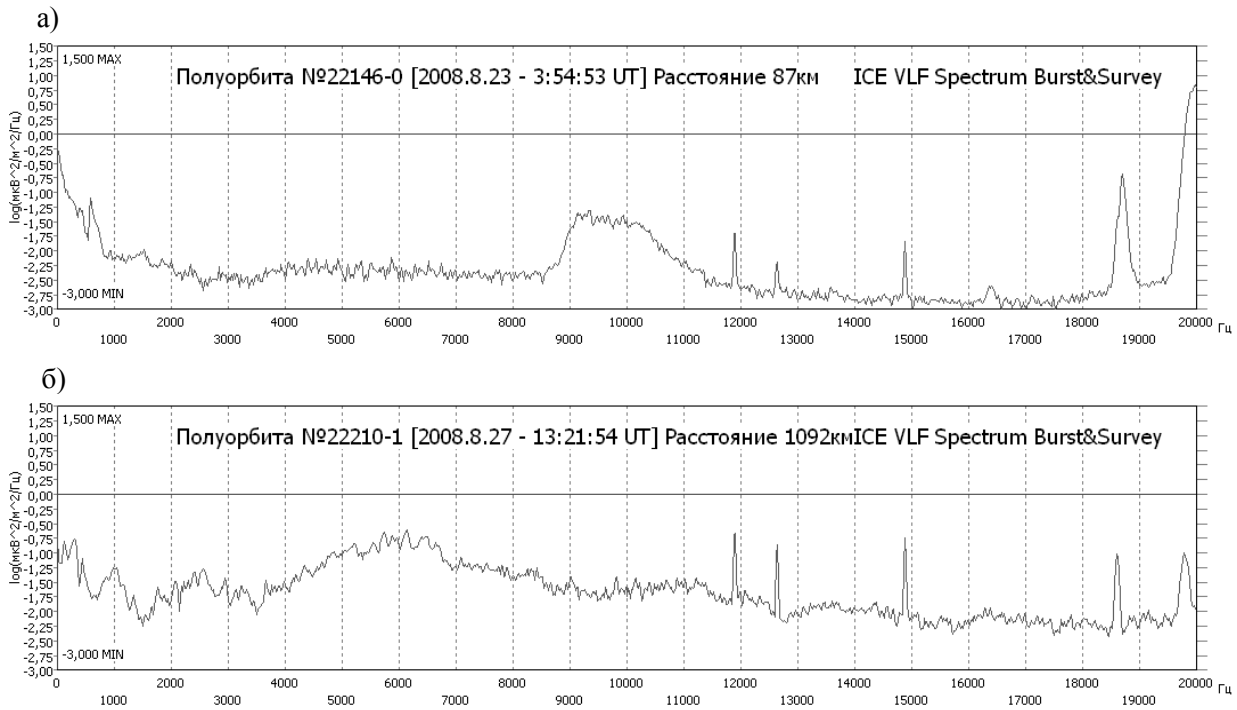


Рис. 4. Примеры дневных и ночных спектров по электрической компоненте в диапазоне 0-20 кГц: а) дневная полуорбита; б) ночная полуорбита

Таблица 1

Дневные и ночные уровни спектральной плотности сигналов СДВ радиостанций

Полуорбита	Время пролета	Уровень поля, $\frac{мкВ^2}{м^2 \cdot Гц}$		
		11,9 кГц	12,64 кГц	14,88 кГц
Дневные				
22146-0	23.08.2008	$2{,}02 \times 10^{-2}$	$0{,}63 \times 10^{-2}$	$1{,}44 \times 10^{-2}$
22190-0	26.08.2008	в шумах	в шумах	$1{,}00 \times 10^{-2}$
22205-0	27.08.2008	в шумах	$1{,}10 \times 10^{-2}$	$1{,}20 \times 10^{-2}$
22220-0	28.08.2008	$2{,}89 \times 10^{-2}$	в шумах	в шумах
22234-0	29.08.2008	В шумах	в шумах	в шумах
22249-0	30.08.2008	$0{,}65 \times 10^{-2}$	$0{,}29 \times 10^{-2}$	$1{,}65 \times 10^{-2}$
Ночные				
22166-1	24.08.2008	в шумах	в шумах	в шумах
22196-1	26.08.2008	$34{,}65 \times 10^{-2}$	$63{,}44 \times 10^{-2}$	$66{,}86 \times 10^{-2}$
22210-1	27.08.2008	$22{,}06 \times 10^{-2}$	$13{,}66 \times 10^{-2}$	$18{,}05 \times 10^{-2}$
22225-1	28.08.2008	$52{,}02 \times 10^{-2}$	$87{,}02 \times 10^{-2}$	$42{,}57 \times 10^{-2}$
22255-1	30.08.2008	$146{,}95 \times 10^{-2}$	в шумах	$1050{,}10 \times 10^{-2}$

– в период подготовки землетрясения отмечено широкополосное увеличение интенсивности естественных радиоизлучений 26 августа в полосе от единиц до ~13 кГц в области от 40° до 58° с. ш. и 97°–114° в. д.;

– вариации ионосферных параметров перед землетрясениями могут иметь различные признаки от случая к случаю, их амплитуды могут зависеть от магнитуды землетрясения и его афтершоков, а также их временных параметров.

Заключение

Предложенная система автоматизированной обработки и анализа данных и база данных спутника DEMETER создают основу для разработки многопараметрических математических и физических моделей учета влияния электромагнитной обстановки в околоземном космическом пространстве. Эти модели необходимы для разработки практических методов обеспечения сейсмобезопасности в Байкальской рифтовой зоне. Они повышают уровень понимания физических процес-

сов, протекающих в различных оболочках Земли (литосфера, атмосфера, ионосфера).

Дальнейшие исследования целесообразно ориентировать в сторону более глубокого теоретического анализа прямых и обратных задач диагностики околоземного космического пространства, накопления статистического материала. Представляется также совершенно необходимой реализация автоматизированной информационной базы данных для российских пользователей на основе математических моделей прогнозирования состояния околоземного космического пространства во время редких геофизических явлений.

Авторы выражают благодарность Французскому космическому агентству (Centre National d'Etudes Spatiales – CNES), Французскому центру научных исследований (Centre National de la Recherche Scientifique – CNRS), проф. Мишелю Парро и Жану-Иву Брошо за данные спутника DEMETER, полученные нами как приглашенными исследователями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Examples of Unusial Ionospheric Observation Made by the DEMETER Satellite over Seismic Regions / Parrot M., Berthelier J. J., Lebreton J. P., Sauvard J. A., Santolik O., Blecki J. // Physics and Chemistry of the Earth. Elsevier. 2006. Vol. 31. P. 486–495.
2. http://demeter.cnrs-orleans.fr/.
3. Аксенов В. И. Исследование распространения сверхдлинных радиоволн в ионосфере Земли // Известия ВУЗов. Радиофизика. 1975. Т. 18, № 9. С. 1333–1346.
4. Флуктуации сверхдлинных радиоволн в волноводе Земля-ионосфера / В. Г. Безродный, П. В. Блиох, Р. С. Шубова, Ю. М. Ямпольский. М. : Наука, 1984. 143 с.
5. Molchanov O. A., Hayakawa M. Seismo-Electromagnetics and Related Phenomena // History and Latest Results. Terra sci. Publ. Comp. Tokyo, 2008. 189 p.
6. Сильное землетрясение на Байкале 27 августа 2008 года : (геологические условия его возникновения, предвестники и макросейсмические последствия) / Семенов Р. М., Имаев В. С., Смекалин О. П., Чипизубов А. В., Оргильянов А. И. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. № 1. С. 51–56.
7. Буянова Д. Г., Башкуев Ю. Б, Аюров Д. Б. Вариации параметров ОНЧ сигналов на спутнике DEMTER над зонами сейсмической активности [Электронный ресурс] // Зондирование земных покровов радарами с синтезированной апертурой : электрон. сб. докл. Рос. науч. конф., (6–10 сент. 2010) / ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН. Изд. JRE (Журн. радиоэлектроники). М., 2010 г. С. 394–404. URL : http://jre.cplire.ru/jre/library/Ulan-Ude-2010/pdffiles/s2_20.pdf.

УДК 504.4054:628.3

Обуздина Марина Владимировна,
аспирант кафедры «Безопасность жизнедеятельности и экология»
Иркутского государственного университета путей сообщения, тел.: 8-914-005-005-8, e-mail: angelika86@bk.ru
Руш Елена Анатольевна,
д. т. н., профессор, зав. кафедрой «Безопасность жизнедеятельности и экология»
Иркутского государственного университета путей сообщения, тел.: (3952) 63-83-52, e-mail: lrush@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ СОРБЦИОННОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ ИЗ ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД ЦЕОЛИТАМИ

M.V. Obuzdina, E.A. Rush

INVESTIGATION INTO CONFORMITY TO SORPTION EXTRACTION LAWS OF ORGANIC POLLUTANTS FROM INDDUSTRIAL WASTE WATER BY ZEOLITS

Аннотация. *Исследованы закономерности сорбционного извлечения органических загрязнителей из промышленных сточных вод цеолитами Холинского месторождения.*

Изучено влияние специальной термической и химической обработки природных цеолитов на процесс сорбции нефтепродуктов из растворов. Показано, что скорость сорбции может быть значительно увеличена за счет создания специаль-

ной поверхности адсорбции в структуре цеолитов с помощью тетраэтоксисилана $(C_2H_5O)_4Si$.

Ключевые слова: *сорбция, химическая обработка, органические загрязнители, цеолиты, нефтепродукты.*

Abstact. *The conformity to sorption extraction laws of organic pollutants from industrial waste water by zeolits from Holinskoe deposit is investigated.*

Influence of special thermal and chemical processing of natural zeolits on sorption process of oil products from the liquid is studied. It is shown that speed of sorption can be essentially increased due to creation of special surface into structure of zeolits for adsorption $(C_2H_5O)_4Si$.

Keywords: *sorption, chemical processing, organic pollutants, oil products, zeolits.*

Стратегией развития железнодорожного транспорта России до 2015 года предусмотрена программа реализации комплекса природоохранных мероприятий, направленных на снижение техногенной нагрузки на объекты окружающей среды на основе разработки технологий обезвреживания образующихся жидких нефтесодержащих отходов и промышленных сточных вод [1].

В локомотивных и вагонных депо вода используется в процессах наружной обмывки подвижного состава, при промывке перед ремонтом колесных пар, тележек, подшипников, других узлов и деталей в моечных машинах. Указанные процессы, соответственно, являются источниками образования промышленных сточных вод, содержащих высокие концентрации нефтепродуктов.

Анализируя современное состояние методов очистки сточных вод от нефтепродуктов, следует указать на их большое разнообразие. При этом сохраняется актуальность оптимизации существующих и поиска более совершенных методов очистки [2]. Одним из способов очистки сточных вод от нефтепродуктов является извлечение последних с помощью адсорбентов с последующей регенерацией [3, 4].

В настоящее время возрастает интерес к изучению возможности использования сорбционных материалов различной химической природы. Учитывая тот факт, что сорбционные методы очистки остаются одними из перспективных физико-химических методов, становится актуальным поиск новых эффективных и экономически выгодных наполнителей адсорбционных аппаратов и фильтров, сохраняющих свои свойства при различных условиях очистки промышленных сточных вод.

Наличие больших запасов природных цеолитов в Восточном Забайкалье позволило нам исследовать процессы их модификации в целях создания сорбционных материалов, эффективных к извлечению нефтепродуктов из промышленных сточных вод, а также изучения закономерностей и механизмов сорбционного извлечения органических загрязнителей.

Природные цеолиты и цеолитсодержащие породы, являясь широко распространенным и дешевым минеральным сырьем, обладают уникальным спектром физических, физико-химических и адсорбционных свойств, благодаря чему они нашли широкое применение в практике очистки природных и сточных вод.

Поскольку цеолиты являются сложными и непостоянными по составу многокомпонентными системами, их свойства существенно зависят не только от содержания цеолитовой фазы, но и от условий формирования цеолитизированных осадочных пород и характера примесей.

Холинское месторождение цеолитсодержащих пород по разведанным запасам, качеству минерального сырья, горно-геологическим условиям и экономическому положению представляется наиболее выгодным для промышленного освоения среди других известных месторождений в пределах Восточной Сибири [5]. Поэтому цеолиты данного месторождения послужили объектом проводимых исследований.

Цель работы – изучение возможности применения цеолитов Холинского месторождения в качестве адсорбентов нефтепродуктов из сточных вод предприятий железнодорожного транспорта и выявление общих закономерностей процессов адсорбции нефтяных соединений на природных и модифицированных цеолитах.

Полученные нами результаты минералогического, химического, рентгенофазового анализов и ИК-спектроскопии показали, что исследуемые цеолитсодержащие туфы Холинского месторождения содержат в своем составе, %: 60...66 клиноптилолита, 3...5 монтмориллонита, 3...5 кварца, 3...5 микроклина, 10...12 кристобалита, 10...12 рентгеноаморфной фазы.

Клиноптилолит – это цеолитовой материал, который хорошо диагностируется методом рентгенофазового анализа по набору рефлексов на дифрактограмме и инфракрасной спектроскопии [6].

Характеристические полосы поглощения на ИК-спектрах цеолитов клиноптилолитового типа проявляются при волновых числах 607 $см^{-1}$ и 1202 $см^{-1}$, что характеризует колебания внешнететраэдрических Si–O–A1-связей.

Текстурно-геометрические характеристики цеолитов этого месторождения свидетельствуют об их высокой пористости – 40,87 % при среднем радиусе пор (по объему) – 0,3617 мкм и поверхности микропор – 6,214 мкм. Насыпная плотность составляет 1,007–0,7789·10^3 кг/$м^3$. Размеры входных окон от 3 до (10…13)·10^{-10} м. Диаметры пор не превышают 10 Å. Объем сорбционного пространства составляет 0,037 – 0,121·10^{-1} $м^3$/кг, предельный сорбционный объем 0,356–0,217·10^{-1} $м^3$/кг, микропористость 24–51 %, статическая влагоемкость 3,0–8,6 % .

Основу структуры природных цеолитов составляет каркас из алюмокремнекислородных тетраэдров [Al, Si]O_4, в которых каждый из четырех атомов кислорода, находящийся в вершинах тетраэдра, одновременно принадлежит двум смежным тетраэдрам, что обеспечивает такой структуре сравнительно большую прочность. Атомы кремния и алюминия размещаются в центрах тетраэдров.

Основной особенностью структуры цеолитов является наличие в каркасе больших пустот, объединяющихся в своеобразные открытые каналы. В каналах находятся катионы, уравновешивающие отрицательный заряд тетраэдров [Al, Si]O_4, а также молекулы воды, которые сравнительно слабо связаны с каркасом и катионами и могут подобно катионам удаляться и замещаться без разрушения связей каркаса. Цеолиты относятся к разряду микропористых сорбентов с размером микропор 0,5–1,5 нм. Кремнекислородные и алюмокислородные тетраэдры в структуре·цеолита упакованы довольно рыхло, и образующиеся между ними пустоты заполнены водой, которую можно удалить путем нагревания цеолита, не разрушая при этом его каркаса. Свободные от воды поры могут быть заполнены различными веществами, эффективные размеры которых не превышают диаметра входного окна.

Эти особенности и определяют уникальные свойства минералов данного класса: молекулярно-ситовой, разделяющий эффект, высокую сорбционную и каталитическую способности. Каркасы цеолитов являются открытыми структурами, в которых отдельные звенья расположены менее плотно, чем у других алюмосиликатов. Кроме того, система регулярных каналов и сообщающихся полостей значительно увеличивает их поверхность [7]. Дегидратированные образцы способны сорбировать молекулы различных веществ, размеры которых не превышают диаметра входных пор. В процессе адсорбции и ионного обмена цеолиты проявляют тенденцию к селективному поглощению определенных молекул и ионов.

Одним из перспективных направлений в очистке сточных вод является создание более эффективных сорбентов путем модификации поверхности материалов природного происхождения с целью расширения спектра извлекаемых из водных сред примесей [8].

Поэтому нами были изучены сорбционные свойства образцов природных цеолитов Холинского месторождения и образцов, термически и химически модифицированных по отношению к нефтепродуктам.

Концентрация нефтепродуктов в реальных сточных водах локомотивных депо ВСЖД – филиала ОАО «РЖД» колеблется в пределах от 20 мг/л до 125 мг/л. Процессы сорбции нефтепродуктов на природных и модифицированных цеолитах изучались на модельных растворах с исходными концентрациями органических загрязнителей (мг/л) 27, 64, 114 соответственно.

Количественный и качественный составы нефтепродуктов определяли в сточных водах методами инфракрасной спектроскопии (ИКС), газожидкостной хроматографии (ГЖХ), а также гравиметрического анализа.

Методика проведения экспериментов по адсорбционной очистке сточных вод достаточно апробирована. Поэтому изучение процессов сорбции в статических и динамических условиях проводили известными методами [9].

Адсорбционную способность ($A_ц$) цеолитсодержащих туфов Холинского месторождения по отношению к нефтепродуктам сравнивали с адсорбционной способностью ($A_у$) активированного угля марки БАУ, который широко применяется в качестве адсорбента в системах очистки нефтесодержащих сточных вод (рис. 1).

Величину адсорбции находили по разнице содержания нефтепродуктов в сточной воде до и после адсорбции. Максимальная адсорбционная емкость для природных цеолитов наблюдается в течение 30–40 минут, для активированного угля – в первые 15 минут.

После статистической обработки результатов исследования получены следующие регрессионные зависимости:

$$A_ц = 0,9889 - 0,0031t - 0,00002t^2, \quad (1)$$

$$A_y = 0,4033 + 0,0231t - 0,0002t^2. \quad (2)$$

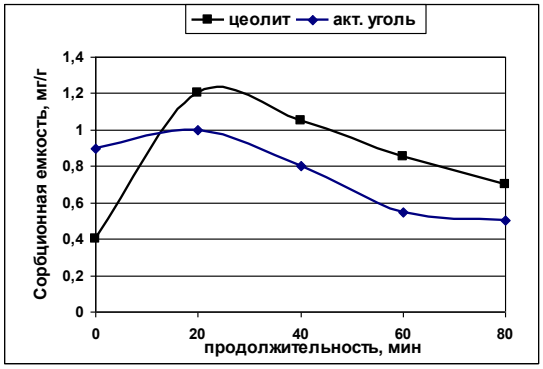


Рис. 1. Кривые сорбционной емкости цеолитсодержащих туфов и активированного угля в зависимости от продолжительности контакта *t* с нефтепродуктами, присутствующими в модельных сточных водах с исходной концентрацией 27 мг/л

Критерии статистической значимости зависимостей (1) и (2): коэффициент детерминации R^2, скорректированный коэффициент детерминации R_c^2, критерий Дарбина – Уотсона *DW*, среднеквадратическая ошибка σ^2, средняя абсолютная ошибка Δ приведены в табл. 1.

Применение метода термографического анализа позволило дать оценку термической устойчивости цеолитсодержащих туфов Холинского месторождения.

Нами установлено, что на термограмме наблюдается два эндотермических эффекта, связанных с потерей адсорбированной (160–240 °С) и конституционной воды (400–550 °С). При этом теряется до 4,8 % массы. Экзотермический эффект при 800–900 °С свидетельствует о разрушении структуры клиноптилолита.

Таким образом, можно предполагать, что с потерей адсорбционной и конституционной воды адсорбционная емкость цеолитсодержащих туфов должна увеличиться. Поэтому первым этапом проводимых исследований, направленных на изучение сорбционных свойств цеолитов, подверженных модифицированию различными способами, стала термическая модификация.

Влияние температуры предварительного обжига на сорбционную емкость цеолита клиноптилолитового типа Холинского месторождения по отношению к нефтепродуктам, присутствующим в модельных водах (см. табл. 2), можно описать следующей регрессионной зависимостью

$$A_ц = 0,90376 + 0,0055T - 0,00001T^2, \quad (3)$$

Представленные результаты (табл. 2) свидетельствуют о том, что сорбционная емкость цеолитсодержащего туфа максимальна при его термической обработке при температуре 350 °С, а при увеличении температуры обработки до 600 °С она резко снижается. Вероятно, это связано с удалением при температуре 350 °С воды, координационно связанной с обменными катионами и кислородным каркасом, а также с высвобождением микрокапилляров, что и приводит к увеличению поверхности адсорбции.

При температуре 600 °С и выше протекает процесс конденсации ОН-групп, при этом разрушаются функциональные активные центры в

Таблица 1

Критерии статистической значимости регрессионных зависимостей

Формула	R^2, %	R_c^2, %	*DW*	σ^2	Δ, мг/г
(1)	92,34	84,77	2,70	0,073	0,042
(2)	85,89	71,73	2,87	0,136	0,076
(3)	91,39	87,95	1,61	0,153	0,108
(4)	96,52	93,04	3,05	0,033	0,018
(5)	95,77	91,55	3,35	0,033	0,017
(6)	98,86	98,71	1,34	0,0115	0,082
(7)	98,40	98,20	1,77	0,136	0,096

Таблица 2

Влияние температуры предварительного обжига на сорбционную емкость цеолита Холинского месторождения

Температура обжига *T*, ºС	Сорбционная емкость $A_ц$, мг/г	Температура обжига *T*, ºС	Сорбционная емкость $A_ц$, мг/г
0	0,97	350	1,48
100	1,17	400	1,44
200	1,32	600	0,15

структуре клиноптилолита, и адсорбционная емкость резко снижается. Следовательно, цеолитсодержащий туф, термически модифицированный при температуре 350 °С, может быть рекомендован в качестве сорбента или фильтрующего материала при очистке нефтесодержащих сточных вод в практических условиях.

Регенерацию термически модифицированных цеолитов осуществляли промывкой горячей водой с последующим их обжигом при температуре 350 °С в течение 30 минут. После обжига цеолиты приобретали рыхлую структуру и полностью восстанавливали свои сорбционные свойства.

Следующий этап исследований был направлен на изучение возможности химической модификации цеолитов клинптилолитового типа для получения материалов, обладающих более высокой адсорбционной способностью по отношению к нефтепродуктам, чем природные цеолиты. Высокая гидрофильность природного цеолита – фактор отрицательный, так как при этом ухудшаются его нефтепоглотительные свойства.

В качестве модификаторов поверхности исходных (природных) цеолитов нами впервые предложены ***ГМДС*** – ***гексаметилдисилазан*** $[(CH_3)_3Si]_2NH$ и ***ТЭОС*** – ***тетраэтоксисилан*** $(C_2H_5O)_4Si$.

Условия модифицирования были выбраны таким образом, чтобы закрепить молекулы модификаторов на поверхности цеолита. Оптимальные параметры процесса модифицирования цеолита указанными соединениями устанавливались экспериментальным путем.

Выявлено, что на количество модификатора, фиксировавшегося на поверхности цеолита, оказывает влияние продолжительность обработки.

Строение модифицированных цеолитов устанавливалось методом ИК-спектроскопии. Полученные ИК-спектры характеризуются полосами поглощения при 470 (Si–O); 820 (OH-группы); 1000–1200 (Si–O–Si); 3400–3600 (адсорбированная вода) $см^{-1}$. Фиксация модифицирующих веществ на поверхности цеолита характеризуется на ИК-спектрах появлением новых полос поглощения при 1700 (C–O); 1050 (C–O–C); и 780 (OH-группы) $см^{-1}$.

Изучены адсорбционные свойства химически модифицированных цеолитов по отношению к нефтепродуктам (рис. 2). Экспериментально определено, что модификация ГМДС, или ТЭОС, способствует возрастанию нефтеемкости цеолита в 1,2 раза в статических условиях по сравнению с природным цеолитом.

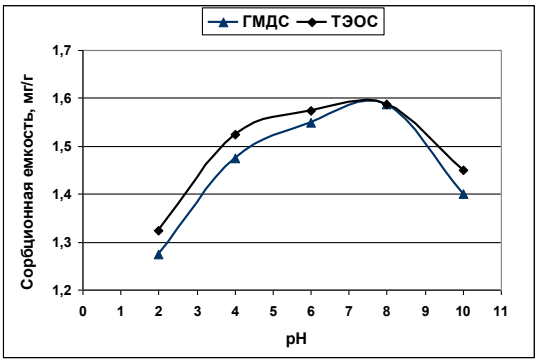
Процесс адсорбции нефтепродуктов из сточных вод цеолитами, модифицированными ГМДС и ТЭОС, исследован при оценке влияния различных факторов – времени контакта сорбента с раствором, pH среды (рис. 2, а), температуры, концентрации C нефтепродуктов (рис. 2, б) в статических условиях. Полученные зависимости аппроксимированы регрессионные уравнениями:

$$A_{ГМДС} = 0,9320 + 0,1946pH - 0,0146pH^2, \quad (4)$$

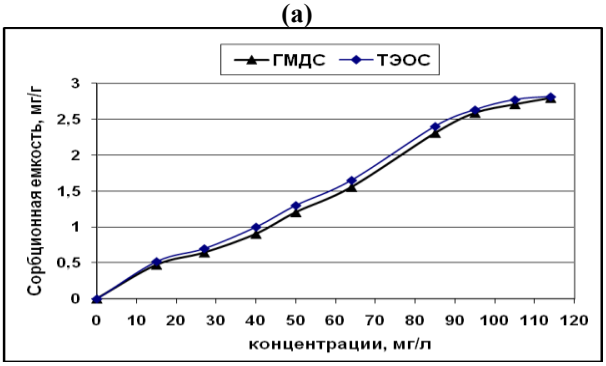
$$A_{ТЭОС} = 1,0280 + 0,1795pH - 0,0138pH^2, \quad (5)$$

$$A_{ГМДС} = -0,0325 + 0,2254C, \quad (6)$$

$$A_{ТЭОС} = 0,0218 + 0,0254C. \quad (7)$$



(а)



(б)

Рис. 2. Зависимости сорбции нефтепродуктов цеолитом, модифицированным ГМДС и ТЭОС от величины pH (а) и концентрации (б)

Представленные результаты свидетельствуют о том, что максимальной адсорбционной способностью по отношению к нефтепродуктам обладает цеолит, модифицированный ТЭОС, что позволяет рекомендовать его для практического использования в технологии очистки сточных вод.

Проведены лабораторные испытания модифицированного ТЭОС цеолита в динамических условиях. Установлено, что динамическая нефтеемкость модифицированного цеолита смеси фракций 2 мм и 5 мм составляет 2,2 мг/г, что превышает соответствующие показатели немодифицированного цеолита в 1,5 раза.

На основе полученных нами результатов по изучению закономерностей сорбционного извлечения нефтепродуктов из модельных сточных вод модифицированными ТЭОС цеолитами сделан ряд предположений ***о возможном механизме протекающих процессов***.

В цеолитах клиноптилолитового типа, к которым относятся исследуемые нами цеолиты Холинского месторождения, кубооктаэдры связаны между собой шестичленными кислородными мостиками. Для них характерна гранецентрированная решетка. Большие полости эллиптически вытянуты. Каждая полость имеет 4 выхода, образованных 12-членными кислородными кольцами диаметров 8-9 Å. Объем большой адсорбционной полости цеолита равен 822 A^3. В каждой элементарной ячейки цеолита содержится по 8 больших и 8 малых полостей. Предельный адсорбционный объем составляет 0,356 $см^3$/г. Эти цеолиты адсорбируют большинство компонентов сложных смесей, а именно все типы углеводородов [10].

Характер взаимодействия молекул адсорбтива с адсорбентом в большей степени зависит от химической природы адсорбента. Специфическое взаимодействие н-углеводородов проявляется не так интенсивно, как в случае молекул со сосредоточенной на периферии электронной полостью. В этом случае происходит повышении энергии адсорбции этих молекул по сравнению с молекулами, близкими к ним по геометрической структуре, но не обладающими особенностями локального распределения электронной полости [11].

В тонких порах цеолитов, размеры которых по порядку величин соизмеримы с размерами адсорбируемых молекул, поля адсорбционных сил, создаваемые противоположными стенками пор, перекрываются. В результате в таких порах происходит повышение адсорбционных потенциалов и рост дифференциальных теплот адсорбции, а следовательно, значительно возрастают и величины адсорбции. Отличие цеолитов от активных углей заключается в гетерополярном характере поверхности пор алюмосиликатов и нахождении в полостях цеолитов ионообменных катионов, компенсирующих избыточные отрицательные заряды алюмосиликатного скелета цеолитов. Цеолиты образуют особую разновидность пористых адсорбентов со специфическими особенностями адсорбционных взаимодействий и различным характером заполнения адсорбционного пространства по сравнению с непористыми адсорбентами.

Цеолиты как сорбенты обладают двумя главными особенностями: молекулярно-ситовым действием и высокой избирательной способностью к молекулам, способным к специфическому взаимодействию. Оба эти фактора оказывают решающее влияние на кинетику сорбции [12].

По скоростям сорбции вещества можно разделить на три группы. К первой группе относятся вещества, диаметр молекулы которых значительно меньше диаметра входных окон цеолита. Диаметр молекул веществ второй группы близок к диаметру входных окон цеолитов. К третьей группе относятся вещества, диаметр молекул у которых заметно больше диаметра входных окон. Вещества этой группы могут сорбироваться лишь на внешней поверхности кристаллов цеолита. В то же время близкие размеры молекул различных веществ еще не определяют равные скорости их сорбции, т. к. помимо молекулярно-ситового действия большое влияние оказывает химическая природа адсорбата, его способность к специфическому взаимодействию с цеолитом. На кинетику сорбции большое влияние оказывают такие факторы, как степень заполнения цеолита, условия модификации и температура.

Таким образом, результаты проведенных нами теоретических и экспериментальных исследований позволяют предположить, что при извлечении нефтепродуктов модифицированным ТЭОС клиноптилолитом Холинского месторождения осуществляется процесс, протекающий по сложному механизму, имеющему следующие стадии: стадия подвода вещества к зерну адсорбента; внешнедиффузионная стадия кинетики массопереноса; стадия перемещения вещества внутри зерна.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Афанасьев О. М., Панин А. В. Снижение экологических рисков производственной деятельности предприятий железнодорожного транспорта путем внедрения технологии переработки образующихся жидких нефтесодержащих отходов // Безопасность жизнедеятельности. 2009. № 6. С. 22–29.
2. Бордунов В. В, Бордунов С. В., Леоненко В. В. Очистка воды от нефти и нефтепродуктов // Экология и промышленность России. 2005. № 8. С. 24–26.
3. Герасимова В. Н. Природные цеолиты как адсорбенты нефтепродуктов // Химия в интересах устойчивого развития. 2003. № 11. С. 481–488.
4. Свиридов А. В., Ганедных Е. В., Елизаров В. А. Алюмосиликатные сорбенты в технологиях очистки воды // Экология и промышленность России. 2009. № 11. С. 28–30.
5. Котов П. А. Месторождения Забайкалья. М. : Геоинформмарк, 1995. 280 с.
6. Смит. А. Прикладная ИК-спектроскопия. М. : Мир, 1982. 327 с.

7. Тарасевич Ю. И. Природные сорбенты в процессах очистки воды. Киев : Наук. Думка, 1989. 222 с.
8. Очистка от нефтепродуктов природными цеолитсодержащими туфами / Хараев Г. И, Хантургаева Г. И, Захаров С. Л, Ширетова В. Г. // Безопасность жизнедеятельности. 2007. № 2. С. 29–32.
9. Смирнов А. Д. Сорбционная очистка воды. М. : Химия, 1982. 168 с.
10. Челищев Н. Ф. Беренштейн Б. Г., Володин В. Ф. Цеолиты – новый тип минерального сырья. М. : Недра, 1987. 176 с.
11. Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость. М. : Мир, 1984. 306 с.
12. Дубинин М. М. Адсорбция и пористость. М. : ВАХЗ. 1982. 172 с.

УДК 621.928.93+004.67+004.421

Кулакова Ирина Михайловна,
к. т. н., доцент Ангарской государственной технической академии (АГТА), тел. (3955)674396, факс (3955)673418
Жабей Анна Аликовна,
к. т. н., инженер-программист, ИАЗ – филиал ОАО «Корпорация «ИРКУТ», тел. 79086513531, e-mail: zhabey@mail.ru
Кулаков Алексей Юрьевич,
аспирант каф. автоматизации и электроснабжения промышленных предприятий (А и ЭПП) АГТА,
Руш Елена Анатольевна,
д. т. н., проф., зав. каф. «Безопасность жизнедеятельности и экология» ИрГУПС, e-mail: lrush@mail.ru,
Асламова Вера Сергеевна,
д. т. н., проф., зав. каф. А и ЭПП АГТА, e-mail: weras@agta.mail.ru

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ИССЛЕДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕЙ

I.M. Kulakova, A.A. Gabey, A.Yu. Kulakov, E.A. Rush, V.S. Aslamova

COMPUTER-AIDED SYSTEM OF DUST EXTRACTOR RESEARCH AND TECHNOLOGICAL ESTIMATION

Аннотация. *Представлена автоматизированная система исследования и технологического расчета пылеуловителей, в состав которой входят: автоматизированные подсистемы технологического расчета пылеосадительных камер, циклонов и скрубберов; база данных для хранения технологических и конструктивных характеристик пылеуловителей, физико-химических свойств газов, жидкостей и пылей; модуль для управления данными; подсистема обработки экспериментальных данных седиментационного анализа пыли. Система позволяет снизить трудоемкость обработки данных, выбрать оптимальные режимы функционирования пылеуловителей, сократить сроки исследования.*

Ключевые слова: *автоматизированная система, пылеосадительная камера, циклон, скруббер, база данных, модуль для управления данными, седиментационный анализ пыли.*

Abstract. *This article presents the computer-aided system of dust extractor research and technological estimation, which include: computer aided subsystem of technological calculation of dust chamber, cyclones, and scrubbers; database for keeping technological and design characteristics of dust extractor; physical and chemical properties of gas, liquid, and dust, module for data management, subsystem for experimental data processing about analysis of dust sedimentation.*

It is shown that this system can essentially decreased the labour intensity and choice the optimal operating conditions for dust extractors.

Keywords: *computer-aided system, dust chamber, cyclones, scrubbers, database, module for data management, analysis of dust sedimentation.*

Совершенствование газоочистного оборудования – одна из наиболее важных задач в области природоохранной деятельности, поскольку эффективность применяемых систем пылеочистки не всегда соответствует нормам ПДК. При разработке пылеочистных устройств важно выбрать наибо-

лее подходящий для данных технологических условий тип оборудования и на основе адекватных математических моделей точно рассчитать ожидаемые показатели его работы до изготовления опытных образцов. При обзоре существующих программных разработок в области пылеочистки и природоохранной деятельности предприятий «ЛОГУС», «Интеграл», «Лазурит» было выявлено, что нет программного обеспечения (ПО) для прогнозирования эффективности очистки и гидравлического сопротивления проектируемых пылеуловителей. ПО, имеющееся на рынке, обеспечивает лишь инвентаризацию источников выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, расчет валовых выбросов, подготовку проектов разрешений на выбросы и ведение учета полученных разрешений. На основании вышеизложенного возникает необходимость разработки автоматизированной системы (АС) исследований процесса сепарации в пылеуловителях для оптимального выбора пылеуловителя и режима его эксплуатации по заданным техническим условиям, а также оценки показателей работы функционирующих аппаратов.

АС имеет следующие составные части: база данных (БД) для хранения технологических и конструктивных характеристик пылеуловителей, физико-химических свойств газов, жидкостей и пылей и сведения о литературных источниках; модуль для управления данными БД; автоматизированные подсистемы технологического расчета гравитационных пылеосадительных камер (АПТРПК), циклонов (АПТРЦ) и скрубберов (АПТРС); подсистема обработки экспериментальных данных процесса сепарации в прямоточном циклоне с промежуточным отбором пыли (ПЦПО); подсистема определения характеристик пыли. АС выполнена в двух модификациях – клиент-серверной (на базе MS SQL Server) и локальной (MS Access) архитектуре.

АС позволяет решить следующие задачи:

1. Определение характеристик пыли (масс-медианного диаметра частиц и логарифмов среднеквадратического отклонения диаметров частиц, плотности пыли), подбор аппроксимирующей функции для интегральной функции распределения частиц по размерам по результатам седиментационного анализа и запись полученных значений в базу данных.

2. Расчет показателей работы ПЦПО и статистическая обработка результатов исследования процесса сепарации в прямоточном циклоне.

3. Хранение технологических характеристик гравитационных пылеуловителей, циклонов и скрубберов, а также физико-химических свойств жидкостей, газов и пылей; ввод и редактирование информации, поиск по заданным критериям.

4. Расчет гидравлического сопротивления и эффективности очистки гравитационных пылеосадительных камер, циклонов и скрубберов по различным методикам, выбранным пользователем.

5. Автоматизированный подбор гравитационных пылеуловителей, циклонов и скрубберов на заданные режимы их эксплуатации, оптимальный выбор пылеуловителя по критерию максимальной эффективности пылеулавливания.

6. Выбор оптимальных режимов эксплуатации гравитационных пылеуловителей, циклонов и скрубберов.

7. Формирование отчетности в программном модуле MS Excel.

При очистке газов с содержанием крупных частиц размером более 100 мкм на предварительной стадии устанавливают пылеосадительные камеры для разгрузки аппаратов последующих ступеней (циклоны, скрубберы, фильтры и др.). В АПТРПК производится расчет габаритных параметров и эффективности очистки прямоугольных пылеосадительных камер на основании методик [1].

Размеры камеры определяются размером δ^* наименьших частиц, которые должны быть осаждены полностью. Габаритные размеры камеры, необходимые для гравитационного осаждения частиц крупнее заданного размера частиц δ^*, определялись по соотношению

$$L = H \cdot W_г / V_S^* ,$$

где L – длина камеры; H – высота камеры; $W_г$ – продольная скорость движения газов в камере; V_S^* – скорость седиментации частиц, определяемая по времени динамической релаксации частицы (τ^*):

$$\tau^* = (\rho_m - \rho) \cdot \delta^2 \cdot \xi_C / (18\mu \cdot \xi),$$

где ρ_m и ρ – плотности частиц и газа; ξ – коэффициент сопротивления частиц; ξ_C – стоксовский коэффициент сопротивления:

$$\xi_C = 24 / \mathrm{Re}_{\delta^*},$$

где Re_{δ^*} – число Рейнольдса обтекания частицы размером δ^* при ее седиментационном осаждении:

$$\mathrm{Re}_{\delta^*} = V_S^* \cdot \delta^* \cdot \rho / \mu .$$

Необходимая суммарная поверхность осаждения F_0 рассчитываемой камеры

$$F_0 = W_г / V_S^* .$$

Для камеры полочного типа, предварительно выбрав ширину, подсчитывали необходимое число полок n и расстояние между полками h:

$$n = F_o / B \cdot L,$$

$$h = V_S^* \cdot \tau^*.$$

Тогда общая высота пылеосадительной камеры H составляет:

$$H = n \cdot (h + h_n),$$

где h_n – толщина одной полки.

На рис. 1 приведен пример расчета габаритных параметров прямоугольной пылеосадительной камеры в АПТРПК.

Однако при движении запыленных газов в камере турбулентность потока нарушает нормальное гравитационное осаждение, в особенности частиц малых размеров, и действительная степень очистки газов оказывается ниже, чем теоретически рассчитанная. В связи с этим был реализован приближенный расчет эффективности, учитывающий диффузию частиц в турбулентном потоке, основанный на использовании вероятностных функций.

Для пылеосадительных камер с $L/H > 3$ значение парциальных коэффициентов очистки (в %) находится с достаточной степенью точности на основании расчетов средней концентрации частиц соответствующего размера в выходном сечении пылеосадительной камеры по формуле (%):

$$\overline{\eta}_\delta = 1 - \sum_{i=0}^{N} K_{\delta_i} \Big/ N,$$

где N – число точек, для которых рассчитывается фракционный проскок частиц K_{δ_i} по высоте камеры.

Концентрация этих частиц во входном сечении принимается равномерно распределенной по сечению. Предполагалось, что распределение частиц по размерам подчиняется нормальному закону распределения, значение величины K_{δ_i} определяется по уравнению

$$K_{\delta_i} = 1/2 \cdot (\Phi(x_1) + \Phi(x_2)).$$

Значения функций $\Phi(x_1)$ и $\Phi(x_2)$ определялись по нормальной функции распределения, а величины x_1 и x_2, в свою очередь, находились из выражений

$$x_{1,2} = (H + x \pm V_S L / W_г) \Big/ \sqrt{2 D_t L / W_\Gamma},$$

где x – координата по высоте камеры; D_t – коэффициент турбулентной диффузии частиц.

При выполнении условия $V_S / W_\Gamma < L \cdot g / W_\Gamma^2$ коэффициент турбулентной диффузии частиц совпадает с коэффициентом турбулентной диффузии газового потока и рассчитывается по формуле Шервуда – Вертца:

$$D_t = 0{,}02 \cdot W_\Gamma H \sqrt{\lambda},$$

где λ – коэффициент гидравлического трения потока о стенки канала, определяемый по критерию

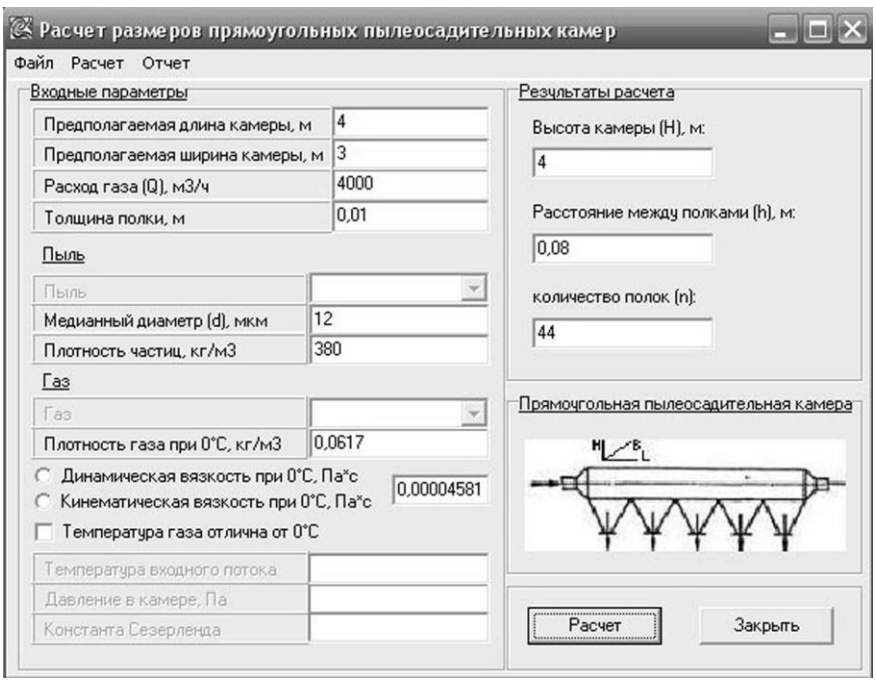


Рис. 1. Пример расчета габаритных параметров пылеосадительных камер

Рейнольдса.

Входными параметрами расчета являются: высота камеры, скорость потока, расход газа, физико-химические свойства пылей и газов. В качестве выходных параметров представлены недостающие габаритные параметры и эффективность очистки, рассчитанная по приведенному выше методу.

Система позволяет определить оптимальные размеры и эффективность очистки пылеосадительной камеры [2].

Методы, используемые в АПТРЦ для расчета циклонов и скрубберов, описаны в [3–7]. Выбор конкретного метода расчета предоставляется пользователю, который на основе имеющихся у него данных принимает решение об использовании того или иного метода. Например, в том случае, если неизвестны фракционные параметры циклона, целесообразно расчет производить с помощью универсального метода [4], в котором эффективность пылеочистки определяется по известной эффективности пылеулавливания эталонного циклона (из БД), геометрически подобного исследованному, при масштабном переходе на заданные режимы работы и с использованием коэффициентов уноса. На способ определения эффективности пылеулавливания циклонов любого типа (прямоточного, противоточного и со встречными закрученными потоками) получен патент РФ на изобретение [8]. Для прямоточных циклонов целесообразнее использовать статистический метод [5]. При наличии данных о фракционном составе пыли и фракционных параметрах пылеуловителя удобнее воспользоваться методикой НИИОГАЗ [9] или фракционным методом М.И. Шиляева [1].

Для автоматизации обработки экспериментальных данных был разработан программный модуль «Эксперимент», позволяющий существенно упростить и ускорить обработку и анализ информации при исследовании прямоточного циклона с промежуточным отбором пыли. Данный программный модуль, входящий в состав подсистемы обработки экспериментальных данных процесса сепарации в ПЦПО, предназначен для получения расчетных значений опытных данных по известным зависимостям. В качестве исходных значений используются введенные пользователем экспериментальные данные и предопределенные константы. Выходная информация представляется в виде текстовых файлов и файлов в формате MS Excel со статистически обработанными результатами. Предусмотрено несколько способов расчета: для одного опыта, для серии опытов с вводом данных вручную или с использованием входного текстового файла.

На рис. 2 изображены некоторые графики, формирующиеся при генерации отчета MS Excel: зависимость полных потерь давления ΔP от квадрата среднерасходной скорости w_0 (рис. 2, а), аппроксимированная с коэффициентом детерминации $R^2 = 99{,}09$ % уравнением:

$$\Delta P = 51{,}96 + 17{,}27 w_0^2 ,$$

зависимость коэффициента сопротивления ς от критерия Рейнольдса (рис. 2, б). В переходной области от режима Стокса до режима Ньютона ко-

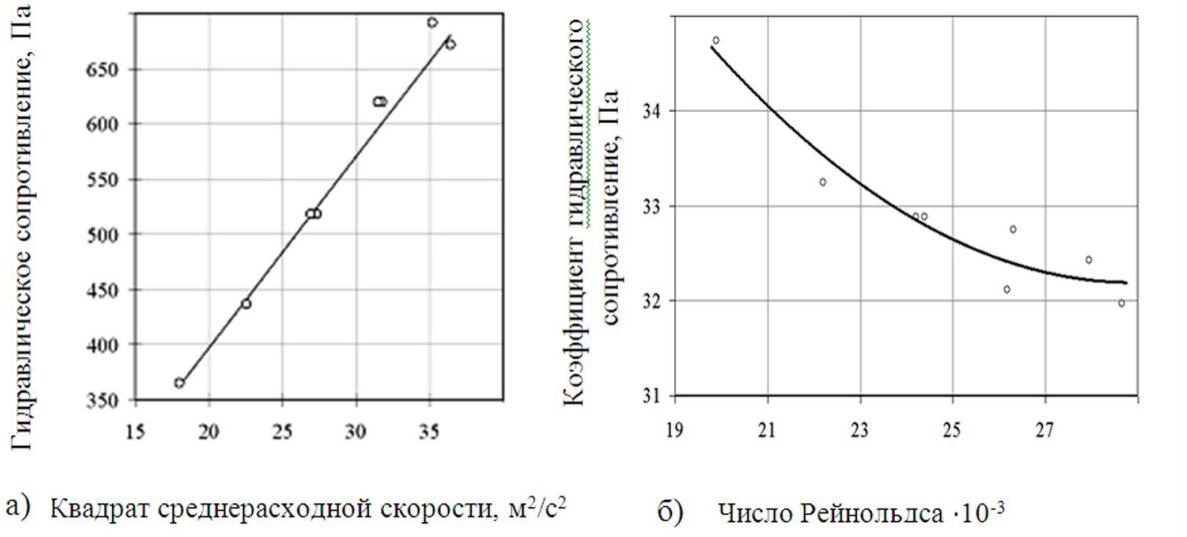


Рис. 2. Зависимости: а) гидравлического сопротивления (ΔP) от квадрата среднерасходной скорости (w_{cp}^2); б) коэффициента гидравлического сопротивления (ζ) от числа Рейнольдса (Re_δ)

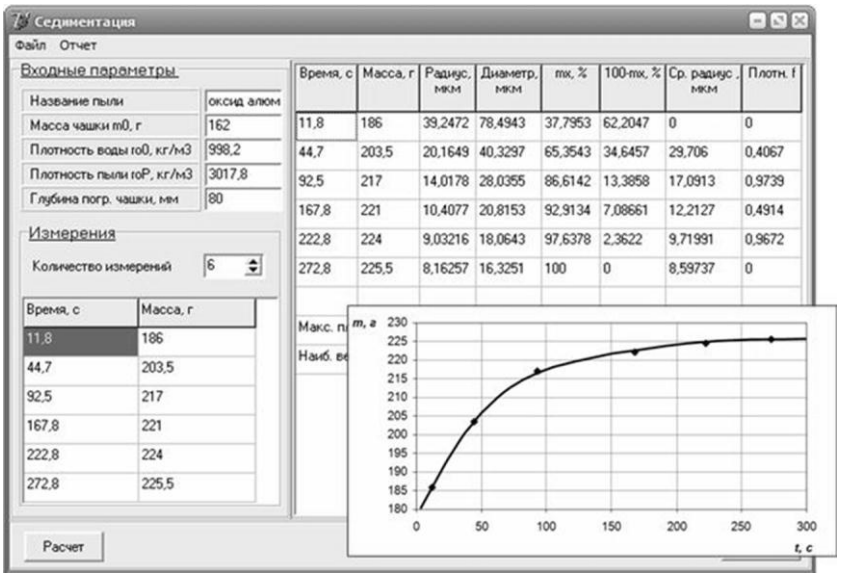


Рис. 3. Диалоговое окно программного модуля «Седиментация»

эффициент гидравлического сопротивления циклона с коэффициентом достоверности $R^2 = 97{,}65\ \%$ точно описывается квадратичной зависимостью

$$\zeta = 57{,}96 - 0{,}0018\mathrm{Re} + 3{,}041 \cdot 10^{-8}\,\mathrm{Re}^2 .$$

Для обработки данных анализа гранулометрического состава пылей методом жидкостной седиментации в гравитационном поле используется программный модуль «Седиментация». Графическая и аналитическая обработка результатов и определение в пробе процентного содержания фракций различной дисперсности проводится по методикам, принятым в седиментационном анализе. Для уточнения размеров крупных частиц коэффициент гидравлического сопротивления частицы определяется не по формуле Стокса, а по формуле Сиска, поскольку формула Стокса справедлива для критерия Рейнольдса

$$\mathrm{Re}_\delta = \rho_ж w_s \delta / \mu_ж \le 0{,}1,$$

где $\mu_ж$, $\rho_ж, w_s$, δ – динамическая вязкость и плотность жидкости, скорость седиментации частицы диаметром δ. Регрессионное уравнение Сиска справедливо с точностью 2 % в широком интервале изменения критерия Re_δ:

$$0{,}1 < \mathrm{Re}_\delta < 3500.$$

Диалоговое окно для расчета диаметров частиц и интегральная функция массового распределения частиц по размерам, полученная в результате обработки данных, приведены на рис. 3.

В АПТРЦ для ускорения поиска и выбора наилучшего среди прямоточных, противоточных циклонов и пылеуловителей со встречными закрученными потоками использованы встроенные средства для вывода лучших показателей. АСТРЦ предоставляет возможность выбора оптимального циклона на заданные условия его эксплуатации. Также реализована возможность определения оптимальных режимов функционирования циклонов. Для наглядности диапазона оптимальных значений в АПТРЦ формируется зависимость эффективности пылеулавливания от выбранного технологического параметра (рис. 4, 5). АПТРЦ зарегистрирована в отраслевом фонде алгоритмов и программ (№ 8990).

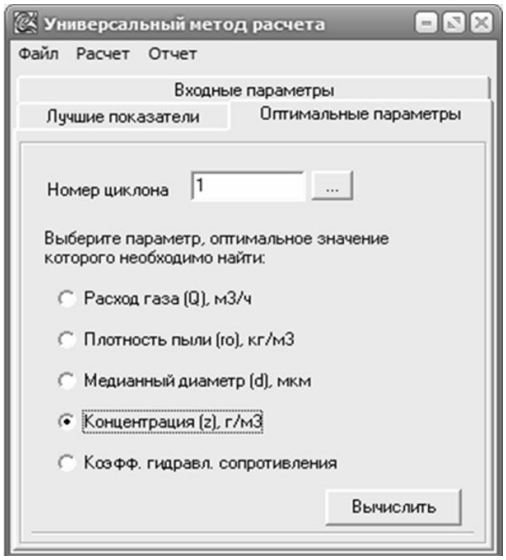


Рис. 4. Диалоговое окно подпрограммы выбора оптимального режима

В АПТРС оценка эффективности очистки скрубберов производится на основании двух методов – энергетического [9] и фракционного (только для скрубберов Вентури) [1, 7].

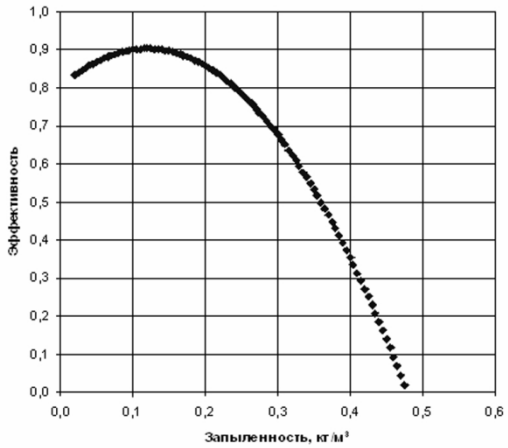


Рис. 5. Зависимость эффективности очистки циклона от запыленности потока

При исследовании в АПТРС скрубберов обнаружено, что повышение напора и расхода жидкости незначительно влияют на его эффективность сепарации (1–2 %). Но увеличение гидравлического сопротивления аппарата в 3 раза вызывает значительное повышение эффективности: при расчете скруббера, гидравлическое сопротивление которого составляет 1,6 кПа, эффективность улавливания тумана фосфорной кислоты составила 76 %. Увеличение гидравлического сопротивления аппарата в 3 раза до 4,8 кПа вызвало повышение эффективности до 94 %, что подтверждает вывод многих исследователей, в том числе М.И. Шиляева [1], о зависимости эффективности пылеулавливания скрубберов в основном от энергозатрат на пылеочистку. Таким образом, подсистема АПТРС позволяет определить оптимальные значения технологических параметров, например расхода орошения, максимизирующего эффективность очистки скруббера Вентури.

Разработанную АС можно использовать для создания компьютеризированных лабораторных практикумов, проведения седиментационного анализа и исследования процесса сепарации. АС позволяет снизить трудоемкость обработки данных и сократить сроки исследования. АС внедрена в учебный процесс ряда вузов Сибирского региона: Ангарской государственной технической академии, Иркутского государственного университета путей сообщения, Томского политехнического университета и Восточно-Сибирского технологического университета. АС можно эффективно использовать и в системе дистанционного обучения для формирования инженерных навыков студентов–технологов и экологов в условиях виртуального лабораторно-практического занятия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шиляев М. И., Шиляев А. М., Грищенко Е. П. Методы расчета пылеуловителей. Томск : Изд-во Том. гос. архитектурно-строит. ун-та, 2006. 385 с.
2. Кулакова И. М., Кулаков А. Ю., Асламова В. С. Автоматизированная система технологического расчета пылеосадительных камер // Изв. Томск. политехн. ун-та. Томск : Изд-во ТПУ. 2010. Т. 317, № 5 : Управление, вычислительная техника и информатика. С. 74–77.
3. Асламова В. С., Жабей А. А. Автоматизированная система технологического расчета циклонов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. № 1. С. 59–63.
4. Универсальный метод расчета эффективности пылеулавливания циклонов / В. С. Асламова, А. А. Асламов, Т. Н. Мусева, А. А. Жабей // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2008. № 1. С. 34–37.
5. Статистическое моделирование эффективности пылеулавливания прямоточных пылеуловителей при масштабном переходе / В. С. Асламова, А. А. Асламов, Н. А. Брагин // Химическая промышленность сегодня. 2008. № 2. С. 42–48.
6. Асламова В. С., Жабей А. А. Использование инструментария СУБД для разработки практикума по курсу «Инженерные методы защиты атмосферы» // Математические методы в технике и технологиях. ММТТ-22 : сб. тр. междунар. науч.-метод. симп. «Современные проблемы многоуровневого образования». Ростов н/Д : Издат. центр ДГТУ, 2008. С. 151–155.
7. Жабей А. А., Асламова В. С., Кулакова И. М. Автоматизированное программное обеспечение расчета показателей работы скрубберов // Математические методы в технике и технологиях. ММТТ-22 : сб. трудов XXII междунар. науч. конф. : в 10 т. – Псков : Изд-во Псков. гос. политехн. ин-та, 2009. Т 4. С. 23–25.
8. Пат. 2358810 RU. C2 B 04 C 3/00, B 04 C 5/00. Способ определения эффективности пылеулавливания циклонов / В. С. Асламова, А. А. Асламов, А. А. Жабей. Опубл. 20.06.09, Бюл. № 17.
9. Справочник по пыле- и золоулавливанию / под ред. А. А. Русанова. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Энергоатомиздат, 1983. 312 с.

УДК 623.735

Крылов Анатолий Андреевич,
адъюнкт кафедры восстановления авиационной техники (и материаловедения), Военный авиационный инженерный университет (г. Воронеж), тел. 8-9102-885675
Сизых Виктор Николаевич,
к. т. н., доцент, докторант–соискатель, Иркутский государственный университет путей сообщений, кафедра «Управление техническими системами», тел. 8-9148-830351, e-mail: sizykh_vn@mail.ru
Чумак Александр Григорьевич,
д. т. н., профессор, профессор кафедры естественно-научных дисциплин и информационных технологий, Ставропольский кооперативный институт – филиал Белгородского университета потребительской кооперации, тел. 8-9064-789170

МЕТОДИКА СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ ПРОДОЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

A.A. Krylov, V.N. Sizykh, A.G. Chumak

STRUCTURED-PARAMETRIC SYNTHESES METHODS TO NEURAL NETWORKS LONGITUDAL MOVING MODELS OF AIR TRANSPORT SYSTEM

Аннотация. *Приведены результаты исследований по выбору вида нейронной сети, функций активации, алгоритма обучения и количества нейронов в слоях при выборе архитектуры нейросетевой модели продольного движения самолета.*

Ключевые слова: *летательный аппарат, модель, нейронная сеть, обучение, структурно-параметрический синтез.*

Abstract. *Structured-parametric syntheses methods to neural networks longitudal moving models of air transport system are considered.*

Keywords: *aircraft, model, neural network, education, structured-parametric syntheses.*

Применение нейронных сетей (НС) и, в частности, методов нейросетевого управления является адекватной методологической основой построения высокоэффективных систем управления такими сложными динамическими объектами [1–5], какими являются современные и перспективные летательные аппараты (ЛА). Первым этапом внедрения нейросетевого управления является создание нейросетевой математической модели движения ЛА [1].

В настоящей работе исследования ограничиваются разработкой нейросетевой математической модели продольного короткопериодического движения самолета.

Актуальность данной задачи обусловлена:

- усложнением аэродинамической компоновки летательных аппаратов, нелинейностью их характеристик на больших углах атаки;
- расширением области применения, исходя из требований многофункциональности;
- ограничением финансовых средств на разработку новой авиационной техники, приводящим к сокращению экспериментальных и исследовательских программ и, как следствие, к уменьшению объёма и точности исходных данных, необходимых при проектировании систем автоматического управления (САУ);
- несоответствием характеристик некоторых типов ЛА требованиям руководящих документов к устойчивости и управляемости в определённых областях режимов полёта. Иными словами, существующие САУ с линейными алгоритмами работы не в состоянии обеспечить качественное управление ЛА, имеющим нелинейные аэродинамические характеристики.

Необходимо выделить два основных этапа при синтезе нейросетевой математической модели движения ЛА (рис. 1).

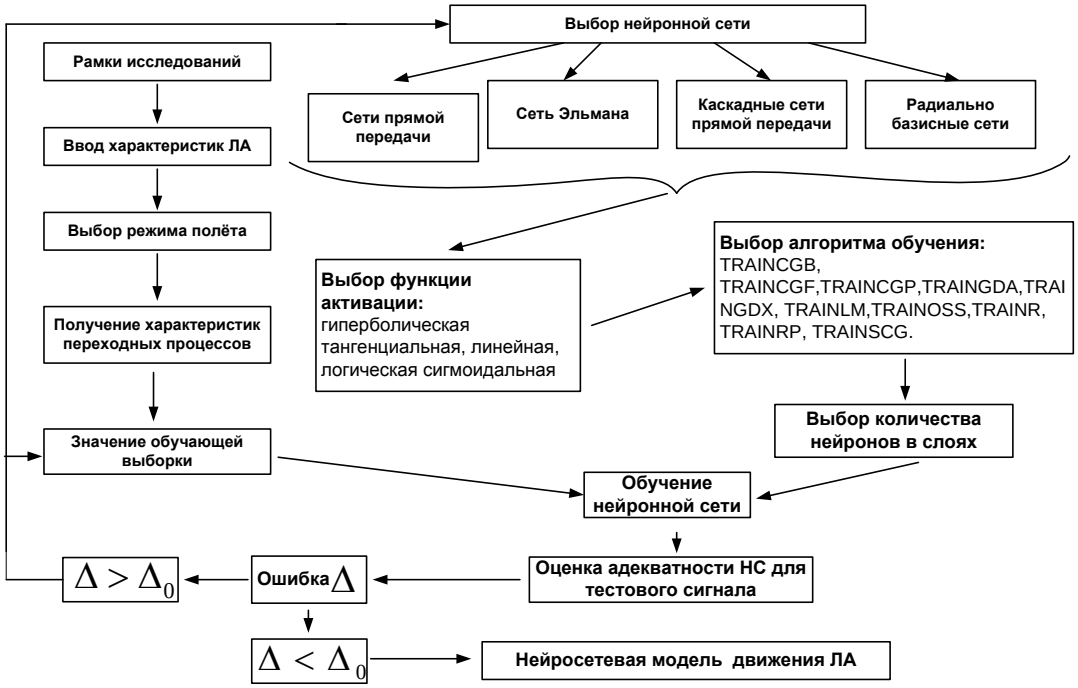


Рис. 1. Схема синтеза нейросетевой математической модели продольного короткопериодического движения самолёта

На первом этапе осуществляется накопление исходных данных о летательном аппарате:

- ввод характеристик;
- выбор режима полета;
- получение характеристик переходных процессов.

Данные о самолёте необходимы для получения входных и выходных сигналов (целей) при обучении нейронной сети, то есть для накопления обучающей выборки. Основной характеристикой, определяющей качество процессов управления ЛА в продольном канале, является изменение угловой скорости при отклонении лётчиком ручки управления. Входным сигналом является величина отклонения стабилизатора от его сбалансированного значения в процессе маневрирования $\Delta\varphi(t)$, выходным сигналом принимается управляемая величина в продольном короткопериодическом движении – изменение угловой скорости $\Delta\omega_z(t)$. Использовались следующие исходные данные:

- период времени обучения – 9 секунд;
- высота H и число Маха M не изменяются;
- используется метод обратного распространения ошибки выходного сигнала;
- рассматривается трёхслойная нейронная сеть;
- шаг дискретизации – 0,01;
- тестовый сигнал – гармоническое отклонение стабилизатора с амплитудами от –30 до + 9 градусов.

На втором этапе опытным путем производится выбор архитектуры нейронной сети [4, 5]. Однозначных рекомендаций по выбору количества скрытых слоев нейронной сети, числа нейронов в каждом слое функций активации и алгоритмов обучения (различных модификаций алгоритма обратного распространения) в настоящее время не дано. При решении различных задач с использованием НС в каждом конкретном случае эти параметры выбираются индивидуально. Универсальными критериями оптимальности сети могут быть выбраны время обучения сети $(t_{обуч} \to \min)$, а так же среднеквадратическая ошибка выходного сигнала $(\Delta \to \min)$. Оценка качества работы проводилась экспериментальным путём с использованием пакета *Neural Toolbox* среды *MatLab*. Для каждой сети проводилось по пять измерений времени обучения $t_{обуч}$ и среднеквадратической ошибки Δ, затем находились средние арифметические значения этих параметров по формулам

$$t_{обуч\,(ср)} = \frac{1}{5}\sum_{i=1}^{5} t_{обуч\,i}, \quad \Delta_{ср} = \frac{1}{5}\sum_{i=1}^{5} \Delta_{ср\,i}.$$

Процесс обучения связан с такой настройкой весов, чтобы минимизировать некоторый функционал, зависящий от ошибок сети, то есть разности между желаемыми и реальными сигналами на её выходе [2]. В качестве такого функционала используется среднеквадратическая ошибка

$$\Delta = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} e_i^2 .$$

Был введён коэффициент качества работы нейронной сети

$$K_{нс} = \frac{1}{t_{обуч(ср)} \cdot \Delta_{ср}}.$$

Далее производился выбор модели нейрона и архитектуры сети. Были выбраны следующие 4 типа НС (рис. 2):

– *newcf* – каскадная сеть прямой передачи;
– *newelm* – сеть Эльмана;
– *newrb* – радиально базисная сеть;
– *newff* – сеть прямой передачи.

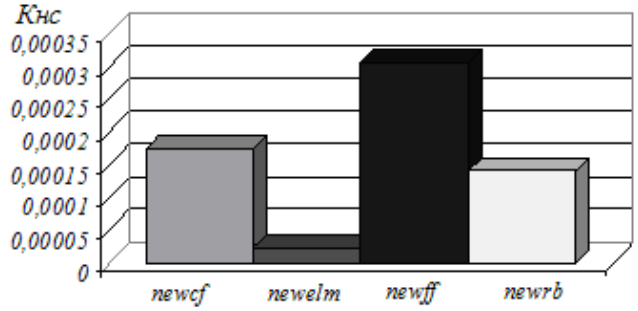


Рис. 2. Выбор модели нейрона и архитектуры нейронной сети

Как видно из рис. 2 для решения задачи обучения наиболее подходит сеть прямой передачи сигнала, для которой коэффициент качества работы НС принимает максимальное значение $K_{нс}$ =0,00031, соответствующее минимальному времени обучения и минимуму ошибки выходного сигнала.

Далее проводился выбор функции активации (ФА) из набора используемых в НС функций [2, 3]:

– *tansig* – гиперболическая тангенциальная;
– *purelin* – линейная;
– *logsig* – логическая сигмоидальная.

По исходным данным нейронная сеть – трёхслойная. Поэтому необходимо варьировать ФА в каждом слое и количество нейронов в слоях. Первоначально создавалась сеть с одним нейроном в каждом слое (1→1→1) и вычислялась выборка коэффициентов качества для однослойной НС (табл. 1). Такая же выборка составлялась для сетей с 50 нейронами во входном слое, одним нейроном в скрытом и выходных слоях (50→1→1), также с 50 нейронами в скрытом слое, одним нейроном во входном и выходных слоях (1→50→1).

Такое изменение количества нейронов в слоях необходимо для проверки оценки эффективности применения ФА. Из рис. 3 видно, что наибольших значений коэффициент $K_{нс}$ достигает при использовании гиперболической тангенциальной ФА (названия колонок от 1 до 9 на рис. 3 соответствуют наборам ФА в соответствующих строках табл. 1).

После формирования «скелета» нейронной сети проводили выбор оптимального алгоритма из 10 возможных алгоритмов обучения, применяя критерий максимума значений коэффициента $K_{нс}$ при различном количестве нейронов в слоях. Исследовались следующие алгоритмы обучения [4]:

Таблица 1

Значение коэффициента качества работы НС для различных функций активации

№	Функции активации в слоях			$K_{НС}$		
	слой 1	слой 2	слой 3	(1→1→1)	(50→1→1)	(1→50→1)
1	*tansig*	*tansig*	*tansig*	1,069518717	1,572327044	1,610305958
2	*tansig*	*tansig*	*purelin*	1,030927835	1,531393568	1,584786054
3	*purelin*	*purelin*	*purelin*	1,01010101	1,512859304	1,38121547
4	*tansig*	*purelin*	*purelin*	0,952380952	1,351351351	1,328021248
5	*purelin*	*purelin*	*logsig*	0,510204082	0,495049505	0,529100529
6	*purelin*	*logsig*	*logsig*	0,485436893	0,4784689	0,505050505
7	*logsig*	*logsig*	*logsig*	0,299401198	0,497512438	0,505050505
8	*logsig*	*tansig*	*tansig*	1,01010101	1,388888889	1,265822785
9	*logsig*	*logsig*	*tansig*	1,013171226	1,432664756	1,285347044

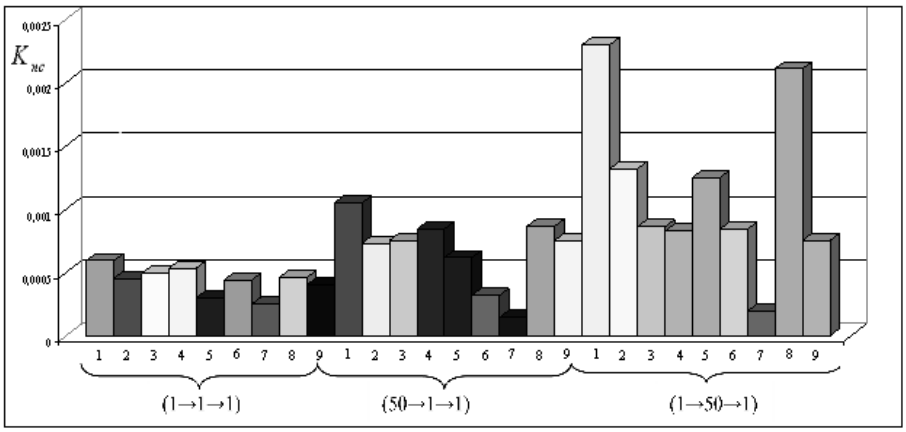


Рис. 3. Выбор функции активации для нейронной сети

1. TRAINCGB – алгоритм обучения на основе метода сопряженного градиента.
2. TRAINCGF – алгоритм Флетчера – Рисса.
3. TRAINCGP – алгоритм Полака – Рибейры.
4. TRAINGDA – алгоритм градиентного спуска с выбором параметра скорости настройки.
5. TRAINGDX – алгоритм градиентного спуска с возмущением и адаптацией параметра скорости настройки.
6. TRAINLM – алгоритм Левенберга – Марквардта.
7. TRAINOSS – одношаговый алгоритм метода секущей.
8. TRAINR – обучение НС в режиме случайного представления входа.
9. TRAINRP – пороговый алгоритм обратного распространения ошибки.
10. TRAINSCG – обучение НС с использованием метода сопряженного градиента с квазиньютоновым подходом в модификации Моллера.

Результаты представлены в табл. 2 и на рис. 4 (здесь цифры колонок от 1 до 10 соответствуют алгоритмам обучения).

Следует отметить, что количество нейронов в слоях существенно влияет на коэффициент качества работы нейронной сети. Наиболее равномерно при изменении количества нейронов отрабатывает алгоритм градиентного спуска с возмущением и адаптацией параметра скорости настройки (колонка 5 на рис. 4). В дальнейшем TRAINGDX будет основным алгоритмом обучения.

Заключительной фазой исследований по параметрической оптимизации нейросетевой модели являлся выбор количества нейронов в слоях. Задавался шаг прибавления (ШП) (увеличение числа нейронов от шага к шагу исследований) для входного и скрытого слоёв. Начиная с простой сети (1→1→1) и заканчивая сложной (50→50→1), определялась зона наилучших показаний – область наибольших значений коэффициента качества работы НС. На первом этапе ШП выбирался равным 1, 5, 10, 20, 50 нейронам во входном и скрытом слоях.

Таблица 2

Значение коэффициента качества работы НС для различных алгоритмов обучения

№	Алгоритм обучения	K_{HC}		
		(1→1→1)	(50→1→1)	(1→50→1)
1	*TRAINCGB*	1,005025126	1,400560224	1,293661061
2	*TRAINCGF*	0,99009901	0,980392157	0,613496933
3	*TRAINCGP*	1,018329939	1,396648045	1,196172249
4	*TRAINGDA*	0,900900901	1,367989056	1,277139208
5	*TRAINGDX*	1,019367992	1,636661211	1,406469761
6	*TRAINLM*	1,008064516	1,008064516	1,315789474
7	*TRAINOSS*	1,016260163	1,016260163	1,340482574
8	*TRAINR*	0,133511348	0,184162063	0,177619893
9	*TRAINPR*	1,009081736	1,385041551	1,333333333
10	*TRAINSCG*	1,002004008	1,432664756	1,39275766

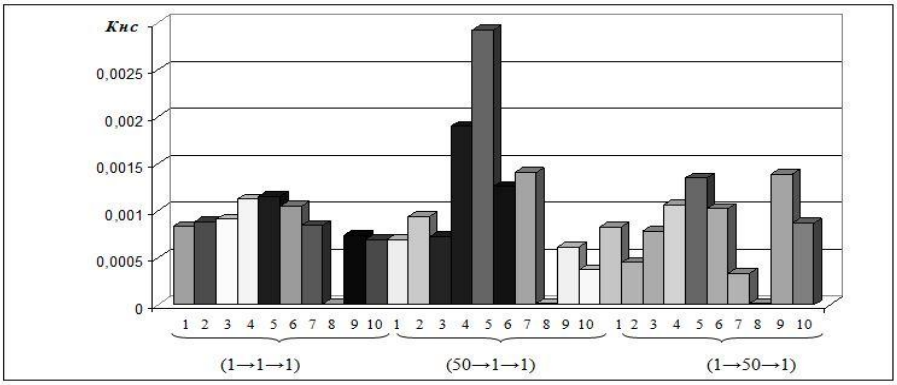


Рис. 4. Выбор алгоритма обучения нейронной сети

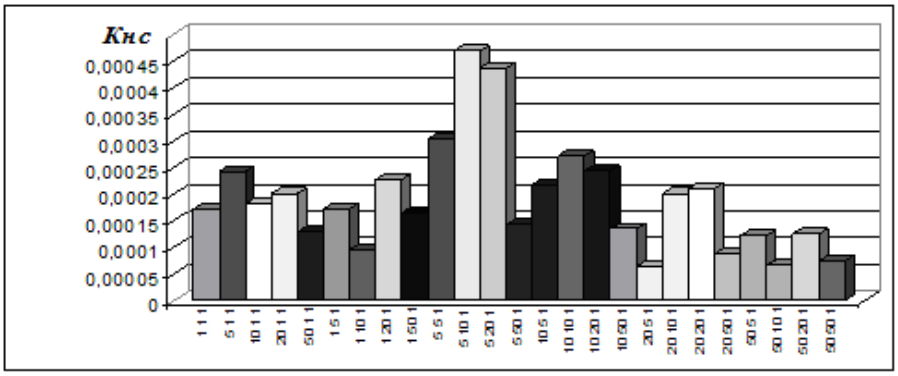


Рис. 5. Выбор количества нейронов в слоях (первый этап)

Из рис. 5 видно, что в зону наилучших показаний входит диапазон от 4 до 9 нейронов во входном слое и от 8 до 25 в скрытом слое, коэффициент качества работы нейронной сети достигает максимума при (5→10→1).

На втором этапе область исследования ограничивается зоной наилучших показаний на первом этапе. ШП уменьшается и принимается равным во входном слое 4, 5, 7, 9; в скрытом – 8, 10, 12, 15, 17, 20, 25 нейронам (рис. 6).

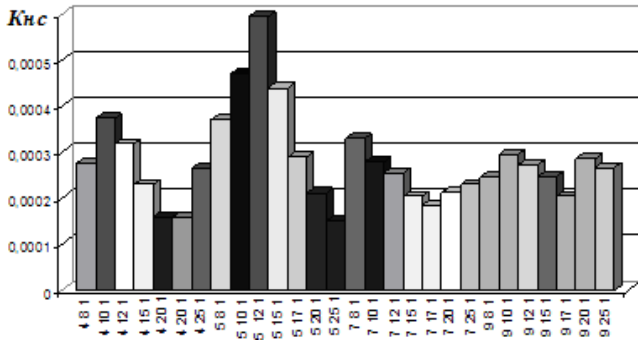


Рис. 6. Выбор количества нейронов в слоях (второй этап)

Теперь можно однозначно утверждать, что 5 нейронов во входном слое и от 9 до 15 в скрытом слое составляют зону наилучших показаний. Поэтому на третьем этапе ШП будет изменяться только в скрытом слое (рис. 7). Проанализировав результаты исследований на третьем этапе, можно сделать вывод, что 5, 12, 1 нейронов во входном, скрытом и выходном слоях соответственно обеспечивают максимальный коэффициент качества работы нейронной сети.

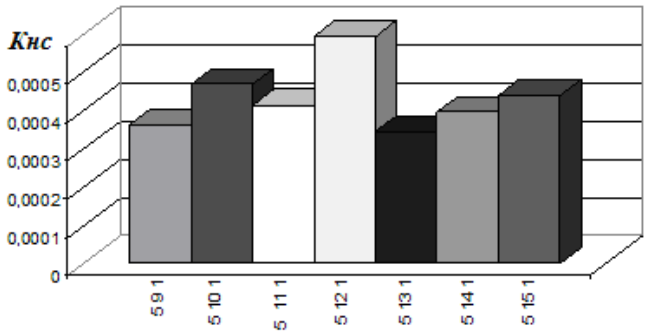


Рис. 7. Выбор количества нейронов в слоях (третий этап)

После формирования архитектуры нейронной сети необходимо произвести обучение для всего объема выборки, то есть для всех шаблонов частот и амплитуд гармонического сигнала, соответствующих различным режимам полета. Нейросетевая модель может быть признана адекватной самому ЛА, если $\left|n_{y\,ЛА}(t)-n_{y\,НС}(t)\right|\le 0,05n_{y\,ЛА}(t)$ при $t\in[0,\Delta T]$, то есть если ошибка по нормальной перегрузке не превышает 5%.

Для оценки адекватности нейросетевой модели ЛА после её обучения на тренировочном наборе шаблонов могут быть использованы комбинированные тестовые входные сигналы, например

$$U_{тест1}(t) = 2,5\ 1(t) + 1,5\sin 3,5t,$$

$$U_{тест2}(t) = 1,5\ 0,5(t) + 2,5\sin 4,5t.$$

Оценка адекватности выходных сигналов модели и самого ЛА проводилась с периодом дискретизации ΔT = 0,1 с. Тренировочный набор шаблонов для каждого режима полёта (*H, M*) состоял из (6·4) = 24 шаблонов (6 значений частоты и 4 значения амплитуды), для всего эксплуатационного диапазона высот и скоростей – из 120 шаблонов (5 режимов полета).

Окончательная оценка адекватности синтезированной нейросетевой модели ЛА экспериментальным записям полета была проведена при подаче на её вход комбинированных сигналов, соответствующих «промежуточным» значениям высоты и числа Маха, то есть при тех сигналах, на которых НС еще не обучалась:

$$H_1 = (H_{мин} + H_{ср})/2; \quad M_1 = (M_{мин} + M_{ср})/2;$$

$$H_2 = (H_{мин} + H_{ср})/2; \quad M_2 = (M_{мин} + M_{ср})/2.$$

Результаты моделирования по обработке нейронной сетью гармонического входного сигнала из обучающей выборки (для тех условий, которым сеть была обучена) приведены на рис. 8, а, комбинированного тестового сигнала – на рис. 8, б.

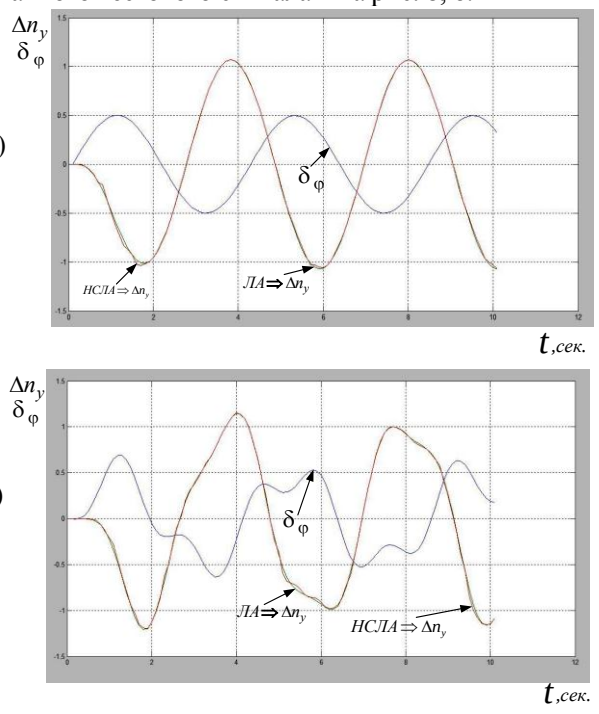


Рис. 8. Результаты моделирования по обработке НС гармонического сигнала из обучающей выборки (а), комбинированного тестового сигнала (б)

Среднеквадратическая ошибка нейросетевой модели продольного движения ЛА по нормальной перегрузке при действии на модель гармонического и комбинированного входных сигналов составила менее 5 %.

Таким образом, в статье получены следующие основные результаты:

1) предложен способ поэтапной разработки нейросетевой модели воздушного транспортного средства;

2) выполнены аналитические исследования по оптимизации параметров и архитектуры НС;

3) проведены численные исследования нейросетевой модели при входных воздействиях в виде гармонического и комбинированного сигналов для проверки качества обучения и оценки адекватности НС реальному процессу.

Оптимальная с точки зрения минимизации затрат времени на обучение и качества работы нейросетевая математическая модель продольного движения самолета представляет собой нейронную сеть прямой передачи с гиперболической тангенциальной функцией активации в каждом слое, с 5 нейронами во входном слое и 12 нейронами в скрытом слое. Наилучшим алгоритмом обучения является алгоритм градиентного спуска с возмущением и адаптацией параметра скорости настройки.

Разработанную нейросетевую модель предполагается использовать при создании бортовой многоуровневой интеллектуальной системы управления и поддержки принятия решений экипажа на различных фазах и режимах полета ЛА [4], включая возникновение возможных нештатных и аварийных ситуаций.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 09-08-00945).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нейрокомпьютеры в авиации / под ред. В. И. Васильева. М. : Радиотехника, 2004. 495 с.
2. Суворовцев И. С., Клюкин В. И., Пирогова Р. П. Нейронные сети. Воронеж : ВГУ, 1994. 224 с.
3. Омату С., Халид М., Юсоф Р. Нейроуправление и его приложения. Кн. 2 // Нейроконтроллеры и их применение / под ред. А. И. Галушкина, В. А. Птичкина. М. : ИПРЖР, 2000. 272 с.
4. Медведев В. С., Потёмкин В. Г. Нейронные сети. М. : ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. 496 с.
5. Neural Network for Control Systems – a Survey / Hunt K. J., Sbarbaro D., Zbikowski R., Gawthrop P. J. // Automatica, 1992. Vol. 28. P. 1083–1112.

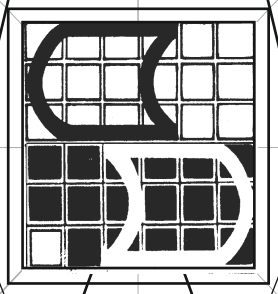
Министерство образования и науки Российской Федерации
Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта

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

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование



Раздел 3.
Системный анализ. Моделирование. Транспорт. Энергетика. Строительство

ОСНОВНЫМИ НАУЧНЫМИ НАПРАВЛЕНИЯМИ ЖУРНАЛА ЯВЛЯЮТСЯ:

- математика и механика;
- электроника, измерительная техника, радиотехника и связь;
- энергетика, электрификация и энергетическое машиностроение;
- машиностроение;
- строительство и архитектура;
- транспорт;
- управление, вычислительная техника и информатика;
- экономика и управление.

УДК 656.223.2

Иванова Татьяна Владимировна,
к. т. н., доцент, зав. кафедрой «Вагоны и вагонное хозяйство» ЗабИЖТ, тел. 89144356571
Налабордин Денис Геннадьевич,
ассистент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» ЗабИЖТ, тел. 89144356571, e-mail: denis_gn@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ НАРАБОТОК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ НА ОТКАЗ И ПРИЧИН ОТКАЗОВ

T.V. Ivanova, D.G. Nalabordin

WAGON TIME TO FAILURE DEPENDENCE ON FAILURE REASONS MODELING

Аннотация. *В статье рассмотрен метод получения статистической оценки, выражающей взаимосвязь наработок грузовых вагонов на отказ и причин отказов. На основе модели бинарных откликов получено разрешающее уравнение, устанавливающее взаимосвязь между рассматриваемыми параметрами.*

Ключевые слова: *причина отказа, модель бинарных откликов, наработка до отказа.*

Abstract. *Essence given work consists in decision of the following problem: determination of the laws of the sharing the introduction difference diameter, as well as determination of the waited load acting on sidebar when hub is pinned with натягом on gross, but is then conducted several similar to each other experience, in which is put turning moment of the different value (commencing from minimum importance on growing).*

Keywords: *reason for refusal, binary response model, time to failure.*

Для обеспечения безопасности движения и повышения эксплуатационной надежности подвижного состава в условиях перехода на новую систему планово-предупредительного ремонта, увеличения межремонтных ресурсов грузовых вагонов необходимо не просто устранять причины нарушений безопасности, но и создавать эффективную систему предупреждения на основе глубокого анализа статистической информации об отказах.

Подобный подход необходим для создания управленческих инструментов и механизмов, которые позволят своевременно принять меры по выявлению возможных рисков и воздействовать на них до наступления отказа.

При выполнении перевозок вагоны должны надежно работать в заданном режиме эксплуатации в течение установленного времени. Во время эксплуатации вагоны расходуют свой технический ресурс, поэтому его необходимо восстанавливать. Накопление неисправностей в ходовых частях, буксах, тормозах и других узлах вагонов, а следовательно, и число отказов вагонов, возникающих в процессе движения зависят в основном от надежности конструкции и величины пробега вагонов.

Низкое качество ремонта вагонов приводит к массовому повторному поступлению их в текущий ремонт и ухудшению работоспособности. Частота поступления вагонов в текущий отцепочный ремонт зависит не только от внешних факторов и особенностей эксплуатации вагонов и их надежности, но также от объема и качества выполнения предыдущего ремонта. Качество продукции – это совокупность ее свойств, обуславливающая пригодность продукции для удовлетворения определенных потребностей в соответствии с ее назначением. Одним из свойств этой совокупности является надежность.

В соответствии с ГОСТ 27.002-83 [1], под надежностью понимается свойство объекта сохра-

нять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования. Надежность объекта – сложное свойство, состоящее в общем случае из безотказности, долговечности, ремонтопригодности и сохраняемости.

Процесс возникновения неисправностей вагонов является случайным, и присущие ему закономерности изучаются с применением вероятностных методов, широко применяемых в теории надежности и массового обслуживания. С помощью системы ДИСПАРК осуществляется оперативное управление безопасностью каждого вагона, непрерывный контроль над текущим состоянием каждого вагона, анализируется накопленная информация о качестве ремонтов, частоте отцепок, обороте вагона, и в результате вырабатывается оперативное решение по предупреждению аварий.

По данным ОАО «РЖД», ежегодно на дорогах России каждый грузовой вагон рабочего парка в среднем 2–3 раза в год поступает в отцепочный (неплановый) ремонт. В среднем за год отцепляется 1250 тысяч вагонов. Основная причина такого положения – низкое качество проведения плановых видов ремонта. Из-за несоответствия нормативных параметров элементов вагона (а это напрямую связано с качеством ремонта), то есть технологических неисправностей, отцепляется в среднем 27 %, эксплуатационных неисправностей – 59 %, из-за повреждений при погрузо-разгрузочных операциях и маневровой работе – 14 % вагонов.

Согласно ГОСТ 27.002-89, под причиной отказа понимаются явления, процессы, события и состояния, обусловившие возникновение отказа. В зависимости от причины возникновения отказы классифицируются следующим образом:

– конструкционный отказ – отказ, возникающий в результате несовершенства или нарушения установленных правил и (или) норм конструирования объекта;

– производственный отказ – отказ, возникающий в результате несовершенства или нарушения установленного процесса изготовления или ремонта объекта, выполнявшегося на ремонтном предприятии;

– эксплуатационный отказ – отказ, возникающий в результате нарушения установленных правил и (или) условий эксплуатации.

Оценку зависимости наработки грузовых вагонов на отказ и причины отказа целесообразно рассматривать на основе модели бинарных откликов [6].

Остановимся на принципах модели. Бинарные модели применяют, если зависимая переменная (отклик) бинарна по своей природе, то есть может принимать только два значения. Во всех случаях представляет интерес поиск зависимостей между одной или несколькими «непрерывными» переменными и одной зависимой от них бинарной переменной. Так как технически достаточно сложно смоделировать бинарную функцию от непрерывных аргументов, задачу регрессии формулируют иначе. Вместо предсказания бинарной переменной предсказывают непрерывную переменную со значениями на отрезке $[0,1]$.

В логит модели отклик принимает значения из отрезка $[0,1]$. Это достигается применением регрессионного уравнения

$$Y = \frac{\exp(b_0 + b_1 X_1 + ... + b_n X_n)}{1 + \exp(b_0 + b_1 X_1 + ... + b_n X_n)}. \qquad (1)$$

Легко заметить, что вне зависимости от коэффициентов регрессии и значений X значения отклика Y всегда будут принадлежать отрезку $[0,1]$. Например, для случая $n = 1$:

$$Y = 1 - \frac{1}{1 + \exp(b_0 + b_1 X_1)}. \qquad (2)$$

Очевидно, что при $\exp(b_0 + b_1 X_1) \to \infty$, $Y \to 1$; при $\exp(b_0 + b_1 X_1) \to 0$, $Y \to 0$.

Так как Y принимает значения из $[0,1]$, можно предположить, что Y – некоторая вероятность, то есть $Y = p \in [0,1]$. Вероятность преобразовывается следующим образом:

$$p' = \ln\left(\frac{p}{1-p}\right). \qquad (3)$$

Такое преобразование называют логит-преобразованием. Логит-преобразование является линеаризующим:

$$Y = \frac{\exp(b_0 + b_1 X_1)}{1 + \exp(b_0 + b_1 X_1)}. \qquad (4)$$

Таким образом, в логит-регрессии бинарный отклик моделируют как непрерывную переменную, принимающую значения в интервале $[0,1]$. Из такой переменной легко получить бинарную переменную, например при помощи следующего правила:

$$\begin{aligned} &\text{если } Y \in [0;\,0{,}5], \quad \text{то } Y = 0; \\ &\text{если } Y \in (0{,}5;\,1], \quad \text{то } Y = 1. \end{aligned} \qquad (5)$$

В настоящей статье рассмотрена модель бинарных откликов применительно к исследованию взаимосвязи между наработкой грузового вагона до первого отказа и причиной непосредственно самого отказа. Взаимосвязь рассмотрена только относительно конструкционных и производственных отказов, так как они на сегодняшний день являются основными причинами отказов грузовых вагонов в эксплуатации.

Для получения массива данных в течение 2009 года проводилась регистрация параметров наблюдений в эксплуатационных вагонных депо Забайкальской железной дороги. Обследовались грузовые вагоны, которые отцеплялись первый раз в текущий ремонт после планового ремонта. Все параметры технического состояния вагонов отражались в контрольных листках. Контрольный листок – это инструмент для сбора данных и автоматического их упорядочения для облегчения использования собранной информации.

В результате был получен массив данных, фрагмент которого представлен в табл. 1.

Обработка экспериментальных данных была выполнена с помощью программного комплекса Statistica 6.0 и расчетного модуля Nonlinear Estimation. В данном случае наработка вагона (переменна модели *X*) это непрерывная случайная величина, а причина отказа (переменная модели *Y*) является бинарной случайной величиной и принимает следующие значения: конструкционная – 1, производственная – 0.

Графические результаты модели бинарных откликов применительно к изучению взаимосвязи наработки грузового вагона и причины отказа представлены на рис. 1.

Таблица 1

Фрагмент массива данных распределения наработок грузовых вагонов в зависимости от причины отказа

№ п/п	Номер вагона	Наработка вагона [тыс.км]	Причина отказа	Присвоенный код
1	64412375	75	Конструкционная	1
2	67123900	15	Производственная	0
3	60877233	25	Производственная	0
4	62345621	88	Конструкционная	1
5	64577898	17	Производственная	0
6	66643209	18	Производственная	0
7	63233555	21	Производственная	0
8	67565252	22	Производственная	0
9	63223423	9	Производственная	0
10	67887544	11	Производственная	0
….	…..	…..	…..	…..
200	64529512	23	Производственная	0

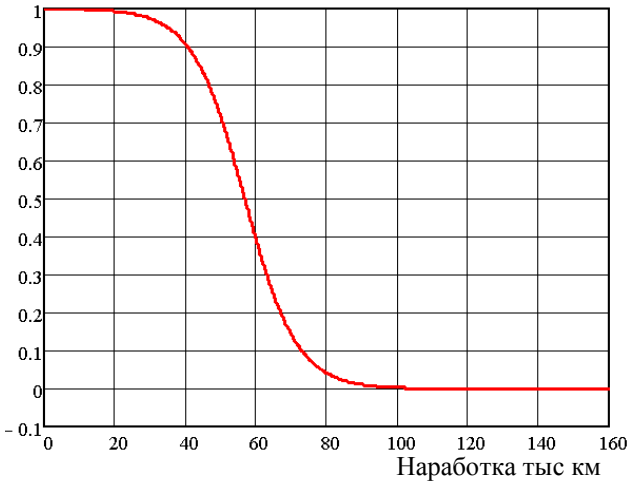


Рис. 1. Зависимость причин отказа от наработки грузовых вагонов (см. (5))

Наиболее полную графическую информацию о результатах моделирования представляет функция остатков. Остатки представляют собой разницу между исходными величинами и предсказанными с помощью модели. На рис. 2 приведена гистограмма остатков в сравнении с плотностью нормального распределения. Из данного рисунка видно, что гистограмма достаточно хорошо приближается к кривой плотности нормального распределения, что свидетельствует об адекватности модели.

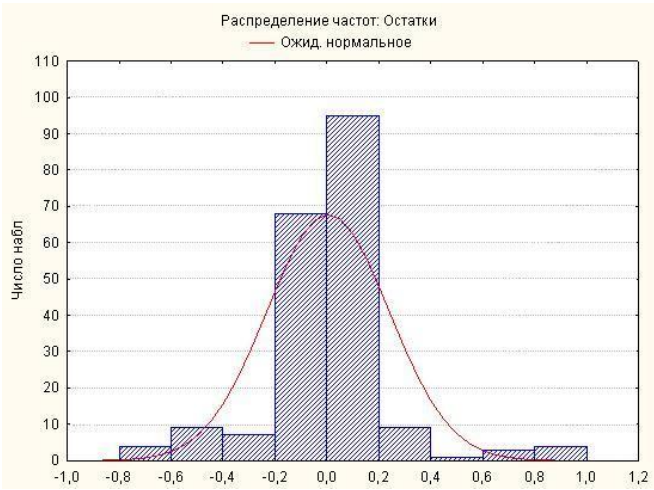


Рис. 2. Гистограмма остатков в сравнении с плотностью нормального распределения

Из результатов проведенного исследования следует, что существует достаточно тесная взаимосвязь между переменными модели, а именно наработкой вагона и причиной возникновения отказа, которую можно аппроксимировать уравнением логит-регрессии

$$Y = \frac{\exp(7{,}70582 - 0{,}135851X)}{1 + \exp(7{,}70582 - 0{,}135851X)}. \qquad (6)$$

Таким образом, чем меньше наработка (менее 57,5 тыс. км), тем больше значение предсказанной величины – отказ вагона произошел вследствие производственной причины и, наоборот, чем больше наработка вагона, тем больше вероятность того, что причина отказа является конструкционной.

Результаты данного исследования могут быть применены для ускорения анализа обработки информации об отказах грузовых вагонов и повышения оперативности принятия решения с применением информационных технологий.

БИБИЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М. : Изд-во стандартов, 1990. 37 с.
2. ГОСТ 27.502-89. Надежность в технике. Система сбора и обработки информации. Планирование наблюдений. М. : Изд-во стандартов, 1990. 23 с.
3. Вагонное хозяйство : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / П. А. Устич, И. И. Хаба, В.А. Ивашов и др. ; под ред. П. А. Устича. М. : Маршрут, 2003. 560 с.
4. Статистические методы обработки эмпирических данных. ВНИИНМАШ. М. : Изд-во стандартов, 1978. 230 с.
5. Ивановский Р. И. Теория вероятностей и математическая статистика. Основы, прикладные аспекты с примерами и задачами в среде MathCAD : учеб. пособие. «БХВ – Петербург», 2008. 528 с.
6. Халафян А. А. Statistica 6. Статистический анализ данных : учеб. 3-е изд. М. : ООО «Бином-Пресс», 2007. 512 с.

УДК 621.311

Шульгин Максим Сергеевич,
аспирант ИрГУПС, bullet_ride99@yahoo.com
Крюков Андрей Васильевич,
д. т. н., профессор ИрГУПС, and_kryukov@mail.ru
Закарюкин Василий Пантелеймонович,
д. т. н., доцент ИрГУПС, zakar@irk.ru

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА ОСНОВЕ ФАЗНЫХ КООРДИНАТ

V.P. Zakaryukin, M.S. Shul'gin, A.V. Kryukov

PARAMETRIC IDENTIFICATION OF HIGH-VOLTAGE POWER LINES BASED ON PHASE COORDINATES

Аннотация. *Предложен новый метод параметрической идентификации линий электропередачи высокого напряжения, основанный на использовании фазных координат и применимый в задачах определения несимметричных режимов. Результаты вычислительных экспериментов подтвердили адекватность идентификации.*

Ключевые слова: *электроэнергетические системы, параметры линий электропередачи, идентификация.*

Abstract. *A new method of parametric identification of high-voltage power lines based on phase coordinates is proposed. This method is applicable to the problems of determining unbalanced cases. The results of numerical experiments have confirmed the adequacy of identification.*

Keywords: *power supply systems, parameters of high-voltage power lines, parametric identification.*

Введение

Точность моделирования режимов электроэнергетических систем (ЭЭС) и систем тягового электроснабжения (СТЭ) железных дорог переменного тока определяется адекватностью используемых математических моделей и погрешностями исходных данных. Вектор исходных данных $\mathbf{D}$ включает две группы параметров: структурные $\mathbf{\Pi}$ и режимные $\mathbf{Y}$, т. е. $\mathbf{D} = \mathbf{\Pi} \cup \mathbf{Y}$. В состав вектора $\mathbf{\Pi}$ входят параметры высоковольтных линий электропередачи (ЛЭП), контактной сети, трансформаторов, а также регулирующих и компенсирующих устройств. Вектор $\mathbf{Y}$ образуют активные и реактивные мощности генераторов и нагрузок. В современных ЭЭС компоненты вектора $\mathbf{Y}$ определяются на основании телеизмерений с использованием хорошо разработанных методов оценивания состояния [1], и потому вопрос об адекватности этой группы параметров можно считать решенным. Параметры $\mathbf{\Pi}$ определяются на основании аналитических выражений, представленных, например, в работе [2]. При этом могут возникнуть значительные погрешности, о чем свидетельствует табл. 1, заимствованная из работы [3].

Уточнение параметров и получение адекватной реальным условиям математической модели ЛЭП может быть выполнено на основе методов параметрической идентификации [3, 4]. Однако существующие методы идентификации параметров ЛЭП разработаны применительно к однолинейным схемам замещения и потому неприменимы для расчета режимов при наличии продольной и поперечной несимметрии, которая особенно проявляется в СТЭ, а также в ЭЭС, питающих электротяговые нагрузки. В настоящей статье предлагается новый метод параметрической идентификации ЛЭП, основанный на использовании фазных координат, который может применяться для определения несимметричных режимов.

Таблица 1

Погрешности определения параметров ЛЭП

№	Параметр	Причины возникновения погрешностей	Погрешность, %
1	Продольное активное сопротивление R	Неучет поверхностного эффекта. Неучет влияния погодных условий: ветра, температуры воздуха, наличия и интенсивности осадков	–20…+16 %
2	Продольное реактивное сопротивление X	Неточности задания среднегеометрического расстояния между проводами и эквивалентного радиуса провода. Многократно заземленные тросы и параллельные цепи	–10… + 8 %
3	Поперечная емкостная проводимость B	Неучет изменения стрелы провеса и радиуса провода, наличия заземленного троса и параллельных цепей, неточное задание проводимости грунта	+25…30 %
4	Поперечная активная проводимость G	Конструктивные, режимные и метеорологические условия	150 … 200 %

Постановка задачи

Линии электропередачи представляют собой статические многопроводные элементы (СМЭ) из нескольких проводов, обладающих взаимной электромагнитной связью. В работе [5] показано, что для адекватного моделирования СМЭ в фазных координатах можно использовать решетчатые схемы замещения, математическое описание которых осуществляется с помощью матриц проводимости $\underline{\mathbf{Y}}_{\text{PC}}$. размерностью *mxm*, определяемой числом проводов *m*. Элементы этих матриц определяются на основе собственных и взаимных сопротивлений проводов $Z_i, Z_{ij}, i, j = 1...m$, а также емкостных проводимостей $y_{i0}, y_{ij}, i, j = 1..m$ между проводами и землей.

Для упрощения выкладок, но без потери общности рассмотрим трехпроводную ЛЭП, исходная модель которой представлена на рис. 1.

Задача параметрической идентификации ЛЭП может быть решена следующим образом. Организуется измерение токов, протекающих по проводам, и напряжений фаз в начале и конце ЛЭП. Предусматривается система синхронизации между устройствами, установленными в начале и на конце ЛЭП, в целях определения не только модулей токов и напряжений, но и соответствующих фаз (рис. 2). Синхронизированные измерения могут быть реализованы на основе технологий PMU-WAMS, широко внедряемых в настоящее время в практику управления режимами ЭЭС [6]. Использование технологии векторной регистрации параметров режимов (phasor measurement technology) является на современном этапе одним из главных приоритетов технологического развития ЭЭС. На базе этой технологии реализуются

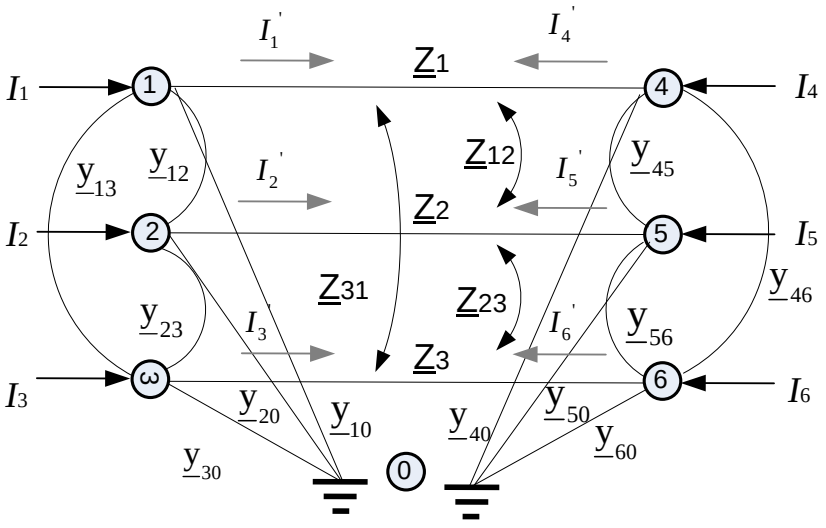


Рис. 1. Исходная модель ЛЭП в фазных координатах

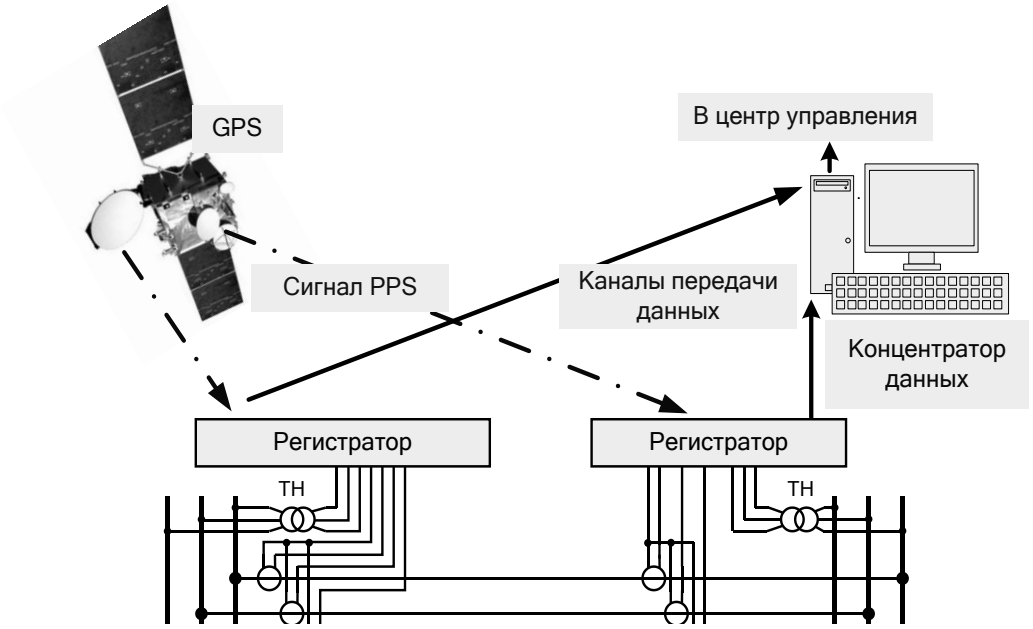


Рис. 2. Система измерений:
ТТ – трансформаторы тока; ТН – трансформаторы напряжения

системы синхронизированных измерений (Wide Area Measurement Systems, WAMS), которые применяются для улучшения информационной обеспеченности задач управления режимами ЭЭС. Особенностью WAMS является возможность синхронизации измерений режимных параметров с помощью космических аппаратов, обеспечивающих решение задач глобального позиционирования (GPS, Глонасс). В состав системы входят регистраторы, реализованные на основе многофункциональных измерительных приборов, подключаемых к вторичным обмоткам измерительных трансформаторов тока и напряжения. Синхронизация измерений на территориально разделенных объектах осуществляется с использованием системы GPS.

На основе результатов синхронизированных измерений токов и напряжений составляется система уравнений, из которой возможно определить элементы $\underline{\mathbf{Y}}_{\text{PC}}$. На первый взгляд, возможно непосредственное определение этих элементов, например, из решения уравнений

$$\underline{\mathbf{Y}}_{\text{PC}} = \left(\tilde{\mathbf{U}}_{\text{Z}}^{\text{T}}\dot{\mathbf{U}}_{\text{Z}}\right)^{-1}\tilde{\mathbf{U}}_{\text{Z}}^{\text{T}}\dot{\mathbf{I}}_{\text{Z}}, \qquad (1)$$

где $\dot{\mathbf{U}}_{\text{Z}}$, $\dot{\mathbf{I}}_{\text{Z}}$ – измеренные с помощью устройств PMU-WAMS комплексы токов и напряжений на приемном и отправном концах ЛЭП. Теоретический анализ и результаты вычислительных экспериментов показали, что использование процедуры (1) не представляется возможным из-за крайне плохой обусловленности матрицы $\tilde{\mathbf{U}}_{\text{Z}}^{\text{T}}\dot{\mathbf{U}}_{\text{Z}}$. Поэтому ниже предлагаются косвенные алгоритмы для определения параметров, с помощью которых могут быть вычислены элементы матрицы $\underline{\mathbf{Y}}_{\text{PC}}$.

Алгоритм А

В этом методе предполагается задание двух измеренных режимов в начале и в конце линии, что позволяет составить систему уравнений для определения параметров:

$$\underline{z}_1\dot{I}_{11}'+\underline{z}_{12}\dot{I}_{21}'+\underline{z}_{13}\dot{I}_{31}'=\dot{U}_{11}-\dot{U}_{41};$$
$$\underline{z}_{12}\dot{I}_{11}'+\underline{z}_1\dot{I}_{21}'+\underline{z}_{23}\dot{I}_{31}'=\dot{U}_{21}-\dot{U}_{51};$$
$$\underline{z}_{13}\dot{I}_{11}'+\underline{z}_{23}\dot{I}_{21}'+\underline{z}_1\dot{I}_{31}'=\dot{U}_{31}-\dot{U}_{61};$$
$$\underline{z}_1\dot{I}_{12}'+\underline{z}_{12}\dot{I}_{22}'+\underline{z}_{13}\dot{I}_{32}'=\dot{U}_{12}-\dot{U}_{42},$$

где вторые индексы у токов и напряжений отвечают номеру режима.

В последней системе токи, протекающие по проводам, могут быть определены по измерениям на отправном или приемном концах ЛЭП:

$$\dot{I}_1'=-\dot{I}_4'=\dot{I}_1-\left(\dot{U}_1-\dot{U}_2\right)\underline{y}_{12}-$$
$$-\left(\dot{U}_1-\dot{U}_3\right)\underline{y}_{13}-\dot{U}_1\underline{y}_{10};$$
$$\dot{I}_2'=-\dot{I}_5'=\dot{I}_2-\left(\dot{U}_2-\dot{U}_1\right)\underline{y}_{12}-$$
$$-\left(\dot{U}_2-\dot{U}_3\right)\underline{y}_{23}-\dot{U}_2\underline{y}_{20};$$

$$\dot{I}_3' = -\dot{I}_6' = \dot{I}_3 - \left(\dot{U}_3 - \dot{U}_1\right)\underline{y}_{13} - \left(\dot{U}_3 - \dot{U}_2\right)\underline{y}_{23} - \dot{U}_3\underline{y}_{30};$$

или

$$\dot{I}_4' = -\dot{I}_1' = \dot{I}_4 - \left(\dot{U}_4 - \dot{U}_5\right)\underline{y}_{12} - \left(\dot{U}_4 - \dot{U}_6\right)\underline{y}_{13} - \dot{U}_4\underline{y}_{10};$$

$$\dot{I}_5' = -\dot{I}_2' = \dot{I}_5 - \dot{U}_5 - \dot{U}_4(\ )\underline{y}_{12} - \left(\dot{U}_5 - \dot{U}_6\right)\underline{y}_{23} - \dot{U}_5\underline{y}_{20};$$

$$\dot{I}_6' = -\dot{I}_3' = \dot{I}_6 - \left(\dot{U}_6 - \dot{U}_4\right)\underline{y}_{13} - \left(\dot{U}_6 - \dot{U}_5\right)\underline{y}_{23} - \dot{U}_6\underline{y}_{30}.$$

Емкостные проводимости можно найти по следующим выражениям:

$$\underline{y}_{10} = \frac{\dot{I}_1'' + \dot{I}_4''}{\dot{U}_1 + \dot{U}_4}; \quad \underline{y}_{20} = \frac{\dot{I}_2'' + \dot{I}_5''}{\dot{U}_2 + \dot{U}_5};$$

$$\underline{y}_{30} = \frac{\dot{I}_3'' + \dot{I}_6''}{\dot{U}_3 + \dot{U}_6},$$

где

$$\dot{I}_1'' = \dot{I}_1 - \left(\dot{U}_1 - \dot{U}_2\right)\underline{y}_{12} - \left(\dot{U}_1 - \dot{U}_3\right)\underline{y}_{13};$$

$$\dot{I}_4'' = \dot{I}_4 - \left(\dot{U}_4 - \dot{U}_5\right)\underline{y}_{12} - \left(\dot{U}_4 - \dot{U}_6\right)\underline{y}_{13};$$

$$\dot{I}_2'' = \dot{I}_2 - \left(\dot{U}_2 - \dot{U}_1\right)\underline{y}_{12} - \left(\dot{U}_2 - \dot{U}_3\right)\underline{y}_{23};$$

$$\dot{I}_5'' = \dot{I}_5 - \left((\dot{U}_5 - \dot{U}_4)\right)\underline{y}_{12} - \left(\dot{U}_5 - \dot{U}_6\right)\underline{y}_{23};$$

$$\dot{I}_3'' = \dot{I}_3 - \left(\dot{U}_3 - \dot{U}_2\right)\underline{y}_{12} - \left(\dot{U}_3 - \dot{U}_1\right)\underline{y}_{13};$$

$$\dot{I}_6'' = \dot{I}_6 - \left(\dot{U}_6 - \dot{U}_5\right)\underline{y}_{23} - \left(\dot{U}_6 - \dot{U}_4\right)\underline{y}_{13}.$$

В матричной форме уравнения (1) могут быть записаны так:

$$\dot{\mathbf{I}} \cdot \underline{\mathbf{Z}} = \dot{\mathbf{U}}, \qquad (2)$$

где

$$\dot{\mathbf{I}} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{11}' & \dot{I}_{21}' & \dot{I}_{31}' & 0 \\ \dot{I}_{21}' & \dot{I}_{11}' & 0 & \dot{I}_{31}' \\ \dot{I}_{31}' & 0 & \dot{I}_{11}' & \dot{I}_{21}' \\ \dot{I}_{12}' & \dot{I}_{22}' & \dot{I}_{32}' & 0 \end{bmatrix},$$

$$\underline{\mathbf{Z}} = \begin{bmatrix} \underline{z}_1 \\ \underline{z}_{12} \\ \underline{z}_{13} \\ \underline{z}_{23} \end{bmatrix}, \ \dot{\mathbf{U}} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{11} - \dot{U}_{41} \\ \dot{U}_{21} - \dot{U}_{51} \\ \dot{U}_{31} - \dot{U}_{61} \\ \dot{U}_{12} - \dot{U}_{42} \end{bmatrix}.$$

Решением системы уравнений (2) можно найти искомые *z*-параметры линии и на их основе получить решетчатую модель ЛЭП для расчетов режимов в фазных координатах:

$$\underline{\mathbf{Z}} = \dot{\mathbf{I}}^{-1}\,\dot{\mathbf{U}}. \qquad (3)$$

Проводимости решетчатой схемы ЛЭП являются элементами следующей матрицы:

$$\underline{\mathbf{Y}} = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{Z}}_{\mathrm{LC}}^{-1} & -\underline{\mathbf{Z}}_{\mathrm{LC}}^{-1} \\ -\underline{\mathbf{Z}}_{\mathrm{LC}}^{-1} & \underline{\mathbf{Z}}_{\mathrm{LC}}^{-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{Y}}_{\mathrm{C}} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \underline{\mathbf{Y}}_{\mathrm{C}} \end{bmatrix}, \qquad (4)$$

где

$$\underline{\mathbf{Y}}_{\mathrm{C}} = \begin{bmatrix} \underline{y}_{10} & \underline{y}_{12} & \underline{y}_{13} \\ \underline{y}_{12} & \underline{y}_{20} & \underline{y}_{23} \\ \underline{y}_{13} & \underline{y}_{23} & \underline{y}_{30} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} j\omega\,\mathbf{B},$$

$$\underline{\mathbf{Z}}_{\mathrm{LC}} = \begin{bmatrix} \underline{z}_1 & \underline{z}_{12} & \underline{z}_{13} \\ \underline{z}_{12} & \underline{z}_1 & \underline{z}_{23} \\ \underline{z}_{13} & \underline{z}_{23} & \underline{z}_1 \end{bmatrix}, \ \mathbf{0} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

B – матрица емкостных коэффициентов.

Алгоритм В

Недостатками первого варианта являются невысокая точность определения *z*-параметров линии. Повышение точности может быть достигнуто путем введения дополнительной переменной $\dot{e} = e^{j\psi}$, корректирующей сдвиг фаз между напряжениями и токами начала и конца линии. Система уравнений (1) в этом случае запишется так:

$$\underline{z}_1\dot{I}_{11}' + \underline{z}_{12}\dot{I}_{21}' + \underline{z}_{13}\dot{I}_{31}' + \dot{e}\dot{U}_{41} = \dot{U}_{11};$$

$$\underline{z}_{12}\dot{I}_{11}' + \underline{z}_1\dot{I}_{21}' + \underline{z}_{23}\dot{I}_{31}' + \dot{e}\dot{U}_{51} = \dot{U}_{21};$$

$$\underline{z}_{13}\dot{I}_{11}' + \underline{z}_{23}\dot{I}_{21}' + \underline{z}_1\dot{I}_{31}' + \dot{e}\dot{U}_{61} = \dot{U}_{31}; \qquad (5)$$

$$\underline{z}_1\dot{I}_{12}'+\underline{z}_{12}\dot{I}_{22}'+\underline{z}_{13}\dot{I}_{32}'+\dot{e}\dot{U}_{42}=\dot{U}_{12};$$
$$\underline{z}_{12}\dot{I}_{12}'+\underline{z}_1\dot{I}_{22}'+\underline{z}_{23}\dot{I}_{32}'+\dot{e}\dot{U}_{52}=\dot{U}_{22}.$$

При этом блоки матричного уравнения (2) примут вид

$$\dot{\mathbf{I}}=\begin{bmatrix}\dot{I}_{11}' & \dot{I}_{21}' & \dot{I}_{31}' & 0 & \dot{U}_{41}\\ \dot{I}_{21}' & \dot{I}_{11}' & 0 & \dot{I}_{31}' & \dot{U}_{51}\\ \dot{I}_{31}' & 0 & \dot{I}_{11}' & \dot{I}_{21}' & \dot{U}_{61}\\ \dot{I}_{12}' & \dot{I}_{22}' & \dot{I}_{32}' & 0 & \dot{U}_{42}\\ \dot{I}_{22}' & \dot{I}_{12}' & 0 & \dot{I}_{32}' & \dot{U}_{52}\end{bmatrix},$$

$$\underline{\mathbf{Z}}=\begin{bmatrix}\underline{z}_1\\ \underline{z}_{12}\\ \underline{z}_{13}\\ \underline{z}_{23}\\ \dot{e}\end{bmatrix};\dot{\mathbf{U}}=\begin{bmatrix}\dot{U}_{11}\\ \dot{U}_{21}\\ \dot{U}_{31}\\ \dot{U}_{12}\\ \dot{U}_{22}\end{bmatrix}.$$

Система уравнений (5) позволяет не только определить *z*-параметры, но и скорректировать угловые сдвиги напряжений и токов в конце линии, если нет возможности проведения синхронизированных измерений параметров режима.

Алгоритм С

Если учесть геометрические параметры проводов, принятые к применению для определения взаимных емкостей, к корректировке *z*-параметров, то можно понизить размерность системы уравнений (5) и за счет этого повысить точность определения неизвестных частей *z*-параметров.

Внешнее сопротивление контура провод – земля вычисляется в соответствии со следующей формулой:

$$\underline{Z}_{out1}=0,001f+$$
$$+jf\left[0,01148-0,001256\ln\left(r\sqrt{0,02\gamma f}\right)\right],$$

где f – частота, Гц; r – эквивалентный радиус провода (для сталеалюминиевых проводов принимаемый равным 0,95 внешнего радиуса поперечного сечения провода), см; γ – удельная проводимость земли, См/м. Это соотношение можно переписать в следующем виде:

$$\underline{Z}_{out1}=\underline{Z}_{o1}-\underline{Z}_{g1},$$

где

$$\underline{Z}_{o1}=0,001f+$$
$$+jf\left[0,01148-0,001256\ln\left(r\sqrt{0,02f}\right)\right],$$
$$\underline{Z}_{g1}=jf\,0,000628\ln\gamma.$$

Внутреннее сопротивление различно для различных типов проводов. При сталеалюминиевых проводах используются аппроксимирующие зависимости:

$$R_{in1}=R_0\left(0,9+0,0063f^{0,755}\right);$$
$$X_{in1}=0,001[\left(0,033-0,00107f^{0,83}\right)S+$$
$$+\left(1,07f^{0,83}-13,5\right)],$$

где R_0 – сопротивление 1 км провода постоянному току, Ом/км; S – площадь сечения провода, мм^2.

В сплошных алюминиевых и медных проводах цилиндрического сечения учитывается скин-эффект во внутреннем сопротивлении по следующим приближенным формулам при условии $x\le 4$:

$$R_{in1}=R_0\left(1+0,0049x^4-0,000035x^7\right),\ \text{Ом/км};$$
$$X_{in1}=R_0\left(0,125x^2-0,000613x^5\right),\ \text{Ом/км},$$

где $x=0,01r\sqrt{\dfrac{7896f}{R_0S}}$, r – радиус провода, см; S – площадь сечения провода, мм^2. При больших значениях x используются соотношения

$$R_{in1}=X_{in1}=0,3536R_0x.$$

Для стальных проводов может быть использовано приближенное выражение следующего вида:

$$R_{in1}=R_{50}\sqrt{0,02f},$$
$$X_{in1}=0,75\,R_{in},$$

в предположении задания в качестве входных данных активного сопротивления R_{50} для частоты 50 Гц.

Сопротивление петли провод – земля содержит неизвестное слагаемое $\underline{Z}_{g1}$, остальные слагаемые могут быть вычислены по известным с большой точностью параметрам проводов:

$$\underline{Z}_{w1}=\underline{Z}_{S1}-\underline{Z}_{g1};$$
$$\underline{Z}_{S1}=\underline{Z}_{o1}+R_{in1}+jX_{in1}.$$

Сопротивление взаимоиндуктивной связи между парой проводов определяется по соотношению следующего вида, содержащему вычисляемое слагаемое и тот же неизвестный член $\underline{Z}_{g1}$:

$$\underline{Z}_M=0,001f+jf[0,005693-$$
$$-0,001256\ln\left(d_{ik}\sqrt{0,02\gamma f}\right)];$$
$$\underline{Z}_M=\underline{Z}_{M1}-\underline{Z}_{g1};$$

$$\underline{Z}_{M1} = 0,001\,f + j\,f[0,005693 - $$
$$-0,001256\,\ln\left(d_{ik}\sqrt{0,02\,f}\right)],$$

где $d_{ik} = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2}$ – расстояние между проводами i и k с координатами (x_i, y_i), (x_k, y_k), м.

Ввиду наличия всего одного неизвестного $\underline{Z}_{g1}$ можно перевести в разряд определяемых по параметрам режима и внутреннее сопротивление

$$\underline{Z}_{in} = (R_{in1} + jX_{in1})l.$$

Таким образом, сопротивления системы проводов равны:

$$\underline{z}_1 = (\underline{Z}_{S1} - \underline{Z}_{g1})l = \underline{Z}_{o1}\,l + \underline{Z}_{in} - \underline{Z}_g;$$
$$\underline{z}_{12} = \underline{Z}_{M12}\,l - \underline{Z}_g;$$
$$\underline{Z}_g = \underline{Z}_{g1}l;$$
$$\underline{z}_{13} = \underline{Z}_{M13}\,l - \underline{Z}_g;$$
$$\underline{z}_{23} = \underline{Z}_{M23}\,l - \underline{Z}_g;$$
$$\underline{Z}_{o1} = 0,001\,f +$$
$$+ j\,f\left[0,01148 - 0,001256\,\ln(r\sqrt{0,02\,f})\right];$$
$$\underline{Z}_{M12} = 0,001\,f +$$
$$+ j\,f\left[0,005693 - 0,001256\,\ln(d_{12}\sqrt{0,02\,f})\right];$$
$$\underline{Z}_{M13} = 0,001\,f +$$
$$+ j\,f\left[0,005693 - 0,001256\,\ln(d_{13}\sqrt{0,02\,f})\right];$$
$$\underline{Z}_{M23} = 0,001\,f +$$
$$+ j\,f\left[0,005693 - 0,001256\,\ln(d_{23}\sqrt{0,02\,f})\right];$$

Уравнения для падений напряжений за счет индуктивных элементов принимают вид

$$\underline{Z}_{in}\dot{I}_{11}' - \underline{Z}_g(\dot{I}_{11}' + \dot{I}_{21}' + \dot{I}_{31}') + \dot{e}\dot{U}_{41} =$$
$$= \dot{U}_{11} - \underline{Z}_{o1}\,l\,\dot{I}_{11}' - \underline{Z}_{M12}\,l\,\dot{I}_{21}' - \underline{Z}_{M13}\,l\,\dot{I}_{31}';$$
$$\underline{Z}_{in}\dot{I}_{21}' - \underline{Z}_g(\dot{I}_{11}' + \dot{I}_{21}' + \dot{I}_{31}') + \dot{e}\dot{U}_{51} =$$
$$= \dot{U}_{21} - \underline{Z}_{o1}\,l\,\dot{I}_{21}' - \underline{Z}_{M12}\,l\,\dot{I}_{11}' - \underline{Z}_{M23}\,l\,\dot{I}_{31}';$$
$$\underline{Z}_{in}\dot{I}_{31}' - \underline{Z}_g(\dot{I}_{11}' + \dot{I}_{21}' + \dot{I}_{31}') + \dot{e}\dot{U}_{61} =$$
$$= \dot{U}_{31} - \underline{Z}_{o1}\,l\,\dot{I}_{31}' - \underline{Z}_{M13}\,l\,\dot{I}_{11}' - \underline{Z}_{M23}\,l\,\dot{I}_{21}',$$

или в матричной форме

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{11}' & -(\dot{I}_{11}' + \dot{I}_{21}' + \dot{I}_{31}') & \dot{U}_{41} \\ \dot{I}_{21}' & -(\dot{I}_{11}' + \dot{I}_{21}' + \dot{I}_{31}') & \dot{U}_{51} \\ \dot{I}_{31}' & -(\dot{I}_{11}' + \dot{I}_{21}' + \dot{I}_{31}') & \dot{U}_{61} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{Z}_{in} \\ \underline{Z}_g \\ \dot{e} \end{bmatrix} =$$
$$= \begin{bmatrix} \dot{U}_{11} - \underline{Z}_{o1}\,l\,\dot{I}_{11}' - \underline{Z}_{M12}\,l\,\dot{I}_{21}' - \underline{Z}_{M13}\,l\,\dot{I}_{31}' \\ \dot{U}_{21} - \underline{Z}_{o1}\,l\,\dot{I}_{21}' - \underline{Z}_{M12}\,l\,\dot{I}_{11}' - \underline{Z}_{M23}\,l\,\dot{I}_{31}' \\ \dot{U}_{31} - \underline{Z}_{o1}\,l\,\dot{I}_{31}' - \underline{Z}_{M13}\,l\,\dot{I}_{11}' - \underline{Z}_{M23}\,l\,\dot{I}_{21}' \end{bmatrix}.$$

Из решения последней системы могут быть найдены неизвестные параметры $\underline{Z}_{in}$, $\underline{Z}_g$, $\dot{e}$.

Результаты идентификации и их обсуждение

Для экспериментальной проверки описанных выше алгоритмов были проведены расчеты на основе программного комплекса Fazonord [7], разработанного в ИрГУПС, применительно к схеме, показанной на рис. 3 и включающей три ЛЭП-110 кВ, выполненных проводом АС-240.

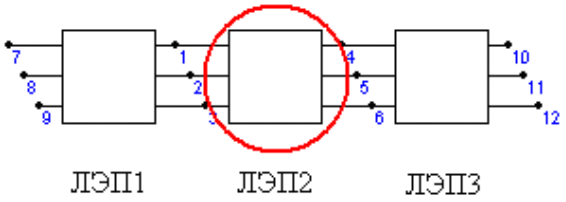


Рис. 3. Расчётная схема

ЛЭП, параметры которой подлежат идентификации, выделена овалом, её длина – 100 км, длина остальных ЛЭП – 50 км.

В целях имитации измерений был произведён расчёт режимов этой схемы при холостом ходе и трёхфазном коротком замыкании на конце ЛЭП3. После этого на основе трех описанных выше алгоритмов были определены собственные и взаимные сопротивления и вычислена относительная погрешность расчётов путем сравнения полученных значений параметров с аналогичными величинами, использованными при моделировании режимов (табл. 3).

Среднеквадратичные погрешности соответственно равны:

– алгоритм А – 9,85 %;

– алгоритм В – 0,81 %;

Таблица 3

Результаты идентификации

№	Параметр	Точное значение	**Алгоритм А**	
			Величина	Погрешность, %
1	Z_1	0,754	0,76	0,778
2	Z_{12}	0,324	0,332	2,381
3	Z_{13}	0,303	0,331	9,293
4	Z_{23}	0,324	0,331	2,073
№	Параметр	Точное значение	**Алгоритм В**	
			Величина	Погрешность, %
1	Z_1	0,754	0,752	0,282
2	Z_{12}	0,324	0,324	0,086
3	Z_{13}	0,303	0,302	0,283
4	Z_{23}	0,324	0,322	0,702
№	Параметр	Точное значение	**Алгоритм С**	
			Величина	Погрешность, %
1	Z_1	0,754	0,757	0,381
2	Z_{12}	0,324	0,324	0,086
3	Z_{13}	0,303	0,303	0,048
4	Z_{23}	0,324	0,324	0,086

– алгоритм С – 0,4 %.

Отсюда можно сделать вывод о том, что понижение размерности системы уравнений, применяемой для идентификации, существенно повышает точность расчетов.

Конечная цель идентификации состоит в повышении точности расчетов режимов. Для определения погрешности, вносимой неточностью идентификации в результаты расчета режима, по найденным на основе алгоритма С параметрам Z_i, Z_{ij} были рассчитаны параметры решётчатой схемы замещения по рис. 4. Для проверки точности идентификационной модели были рассчитаны два режима: с нагрузкой 15 и 60 МВт на конце третьей ЛЭП. Результаты расчета сведены в табл. 4, из которой видно, что предложенный метод параметрической идентификации обеспечивает очень малые погрешности расчета режима.

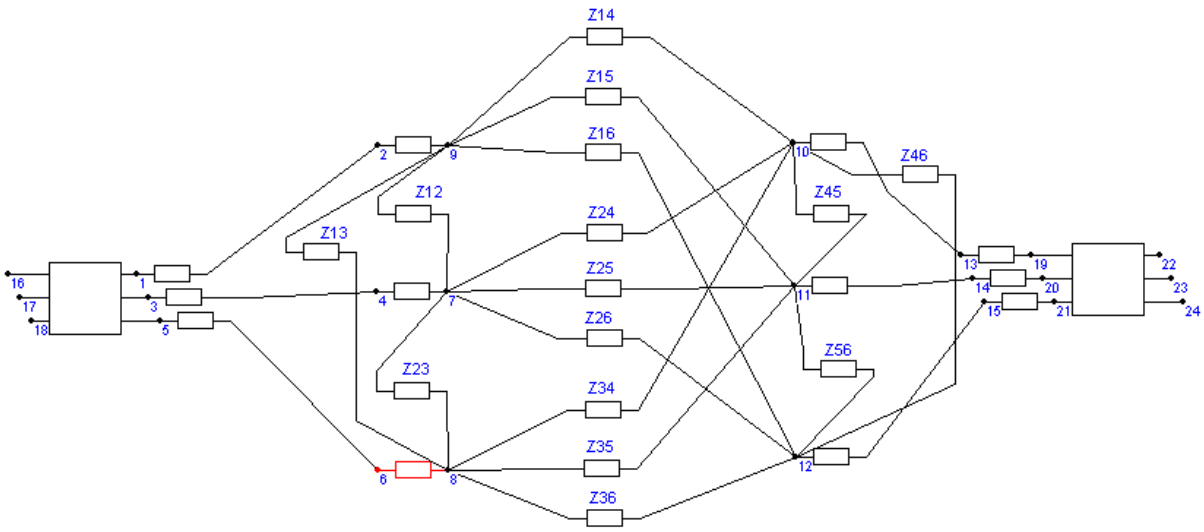


Рис. 4. Расчетная схема сети, построенная на основе идентификации

Таблица 4

Погрешности расчета режимов

Узел сети	Точки измерения	Нагрузка 15 МВт		Нагрузка 60 МВт	
		Погрешность по напряжению, кВ	Погрешность по току, А	Погрешность по напряжению, кВ	Погрешность по току, А
Отправной конец ЛЭП2	Фаза А	0,00	0,01	0,56	2,47
	Фаза В	0,00	0,01	0,13	0,76
	Фаза С	0,00	0,01	0,06	0,67
Приемный конец ЛЭП2	Фаза А	0,02	0,01	1,96	2,49
	Фаза В	0,02	0,03	0,70	0,78
	Фаза С	0,02	0,01	0,53	0,66

Выводы

1. Предложены новые алгоритмы параметрической идентификации линий электропередачи, основанные на использовании фазных координат и решетчатых схем замещения и применимые для расчета режимов при наличии значительной продольной и поперечной несимметрии.

2. Проверка адекватности идентификации показала применимость предложенных алгоритмов для решения практических задач моделирования режимов ЭЭС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гамм А. З. Статические методы оценивания состояния электроэнергетических систем. М. : Наука, 1976. 220 с.
2. Идельчик В. И. Электрические системы и сети. М. : Энергоатомиздат, 1989. 592 с.
3. Шелюг С. Н. Методы адаптивной идентификации параметров схемы замещения элементов электрической сети : автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. Екатеринбург : УГТУ(УПИ), 2000. 23 с.
4. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А. А. Красовского. М. : Наука, 1987. 712 с.
5. Закарюкин В. П., Крюков А. В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск : Изд-во Иркут. ун-та, 2005. 273 с.
6. Мокеев А. В. Разработка и внедрение систем сбора телемеханической информации // Электрические станции. № 6. 2007. С. 60–61.
7. 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. 28.06.2007.

УДК 625.1+621.893

Винокуров Дмитрий Ильич,
аспирант ИрГУПС, тел. (3952) 638-357
Гозбенко Валерий Ерофеевич,
д. т. н., профессор, ИрГУПС, тел. (3952) 638-357

СОЗДАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ НОВЫХ СМАЗОЧНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ДЛЯ ЛУБРИКАЦИИ ИЗ ОТХОДОВ ХИМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Vinokurov D.I., Gozbenko V.E.

CREATION AND MODELLING OF NEW LUBRICANT COMPOSITIONS OF CHEMICAL MANUFACTURE WASTE

Аннотация. *Решена научно-техническая задача снижения износа в паре колесо – рельс путем создания и применения новых смазочных композиций на основе низкомолекулярного полиэтилена и полимера лигнина. Исследованы характеристики созданных смазочных композиций. Составлены математические модели последействия смазочных композиций. Показано, что использование новых смазочных композиций позволяет снизить износ.*

Ключевые слова: *лигнин, смазочная композиция, трение, износ, полимер, присадки, моделирование.*

Abstract. *The scientific and technical problem of decrease in deterioration in a wheel-rail pair by creation and application of new lubricant compositions on the basis of low-molecular polyethylene and polymer lignine is solved. Characteristics of the created lubricant compositions are investigated. Mathematical models of lubricant compositions aftereffect are made. It is shown that use of new lubricant compositions allows to lower deterioration.*

Keywords: *lignine, lubricant composition, friction, deterioration, polymer, additives, modelling.*

Актуальность проблемы

В развитии любой отрасли, в том числе и на железнодорожном транспорте, разработка ресурсосберегающих технологий является приоритетным направлением.

Трение, возникающее между гребнем колеса и боковыми гранями рельсов на прямых, а особенно на криволинейных участках пути, неизбежно приводит к износу бандажей колёсных пар и рельсов, а также к росту затрат на тягу поездов. На сегодняшний день боковой износ рельсов и колёс в 3–6 раз превышает предусмотренные нормативы, в связи с чем срок их службы в 3–4 раза ниже нормативного.

Основные эффективные пути снижения износа в паре колесо – рельс:

1. Увеличение степеней свободы тележки по отношению к кузовной части подвижного состава, которое может быть достигнуто путем модернизации люлечного подвеса кузова экипажа.
2. Увеличение подуклонки рельсов до 1/15 способствует снижению изнашивания рельсов в 1,2…1,4 раза, особенно в начальный период работы рельсов, что позволяет рекомендовать укладывать рельсы с подуклонкой 1/12…1/15 за счет клиновидных деревянных или резиновых прокладок с переходом в дальнейшем на серийное производство рельсовых прокладок с подуклонкой 1/15.
3. Повышение твердости сталей колес и рельсов и упрочнение их рабочих поверхностей.
4. Уменьшения износа в паре трения колесо – рельс путем снижения температуры непосредственно в зоне контакта. Резкое снижение температуры в этой зоне достигается подачей охлаждающего агента.

Несмотря на эффективность снижения износа, данные направления сопряжены с большими капитальными вложениями, в связи с чем использование смазочных композиций на данный момент является более приоритетным направлением.

Нанесение смазки в зону трения колесо – рельс позволяет существенно снизить интенсивность износа рельсов в кривых и колёс подвижно-

го состава, а также дает экономию расхода топлива или электроэнергии на движение поезда.

Многочисленные экспериментальные исследования и эксплуатационные испытания в российской и мировой практике показывают, что смазывание рельсов позволяет увеличить срок их службы, снизить расход энергии на тягу поездов и уменьшить шум, а следовательно снизить затраты.

В связи с этим разработка новых смазочных композиций и исследование возможности их применения на железнодорожном транспорте применительно к условиям различных регионов является **актуальной задачей** при решении проблем снижении износа в паре колесо – рельс и расходов энергии на тягу поездов.

Анализ литературных данных показал, что при взаимодействии колеса с рельсом возникает комплекс физических явлений, который определяет их разрушение (износ) [1–8, 10–12].

Помимо факторов, считающихся основными (скольжение гребня по боковой поверхности головки рельса, удельное давление гребня на боковую грань головки рельса), на износ в паре колесо – рельс оказывают влияние и другие. Особенностью взаимодействия пары колесо – рельс является нестационарность режима трения, которая выражается в непрерывном изменении условий в зоне контакта пары, физико-механических и фрикционно-износных свойств материалов пары.

Путём анализа методов и приемов снижения износа установлено, что наиболее простым и наименее затратным способом является использование смазочных композиций на основе отходов местного химического и целлюлозно-бумажного производства.

Многочисленные экспериментальные исследования и эксплуатационные испытания в российской и мировой практике показывают, что смазывание рельсов позволяет увеличить срок их службы, снизить расход энергии на тягу поездов и уменьшить шум, а следовательно, снизить затраты.

С 1997 года на ВСЖД в качестве смазочных композиций широко применяют отработку дизельного масла, как в чистом виде, так и с добавлением графита, вместо смазок РС-6, РП-1. Несмотря на высокие антифрикционные свойства отработанного дизельного масла, смазка оказалась неэффективной, что было обусловлено быстрым стеканием смазки с рельса из-за недостаточной вязкости и адгезии. Кроме того, суспензия мелкораздробленного графита в масле не сохраняет свои свойства ввиду быстрого оседания графита.

Разработка новых смазочных композиций на основе использования низкомолекулярного полиэтилена

Новые смазочные композиций разработаны на основе низкомолекулярного полиэтилена. Низкомолекулярный полиэтилен (НМПЭ) – отход производства многотоннажного продукта – полиэтилена высокого давления. В качестве жидкого компонента, придающего смазочной композиции необходимую консистенцию, обычно используют минеральное масло или другие продукты переработки нефти.

В качестве смазок, как правило, используют композиции из нескольких компонентов, при этом смазочные композиции должны удовлетворять ряду требований:

1. Они должны эффективно уменьшать трение и износ при контакте гребня колеса и боковой поверхности головки рельса.

2. Используемая композиция должна легко наносится в зону контакта и удерживаться на боковой поверхности рельса.

3. Компоненты смазочной композиции должны быть доступными и недорогими материалами.

4. Компоненты и получаемая композиция не должны оказывать влияния на окружающую среду и быть нетоксичными для человека.

Наиболее близкой к заявляемым требованиям является смазочная композиция, содержащая (%, масс.): 10–20 нефтяного кокса, 15–25 отработанного дизельного масла и остальное (до 100) – низкомолекулярный полиэтилен (НМПЭ).

Недостатком данной композиции является необходимость использования диспергированного нефтяного кокса с размером частиц менее 0,100 мм. Однако в производственных условиях получение высокодисперсного кокса требует больших затрат и надежной классификации частиц кокса после диспергирования. Попадание частиц кокса крупнее 0,100 мм в смазочную композицию приводит к их механическому воздействию на материал рельса и гребня колеса и даже к увеличению износа.

Вышеуказанный недостаток устранён в смазочной композиции на основе низкомолекулярного полиэтилена, где в качестве антифрикционной компоненты предлагается использовать отход переработки древесины на гидролизных предприятиях – лигнин,а также лигнин, частично модифицированный хлором или гипохлоритом.

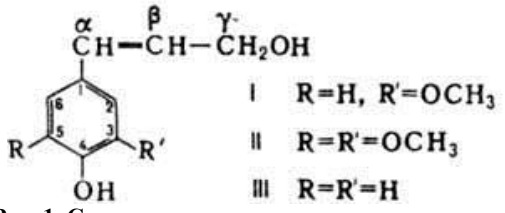


Рис. 1. Структура элементарного звена лигнина

Лигнин представляет собой природный сшитый полимер, который остается после извлечения из древесины целлюлозы и других составляющих. В настоящее время этот отход производства гидролизных и целлюлозно-бумажных предприятий не находит квалифицированного применения. Сотни тонн лигнина загрязняют окружающую среду. Очень незначительное число бактерий могут им питаться, что не позволяет справится с переработкой лигнина естественным путём.

С использованием этого отхода предлагается смазочная композиция следующего состава, (%, масс.):

а) гидролизный лигнин – 15–25;

б) отработанное дизельное масло – 10–25;

в) НМПЭ – остальное (до 100).

Перемешанные в необходимом соотношении компоненты композиции образуют устойчивую дисперсную систему, которая представляет собой консистентную смазку темно-коричневого цвета.

Синтез полимеров, входящих в состав смазочной композиции, осуществлялся в лабораторных условиях в стандартном стеклянном реакторе. Химический состав определен в аналитической лаборатории ИрИХ СО РАН методами микроанализа. Смазочные композиции, содержащие НМПЭ, отработанное дизельное масло и другие компоненты готовились путем нагрева НМПЭ до ~90 °С и добавлялись при интенсивном перемешивании в предварительно нагретое (~70 °С) дизельное масло. В полученную однородную смесь добавляли другие компоненты, такие как лигнин и хлорлигнин. Соотношение НМПЭ и отработанного дизельного масла (ОДМ) выбиралось таким образом, чтобы обеспечить необходимую консистентность смазки.

Оценка физических и химических свойств предлагаемых смазочных композиций

Оценка свойств разработанных смазочных композиций проведена в лабораторных условиях с использованием машины трения ИИ 5018, применительно к условиям взаимодействия колес подвижного состава с рельсом. Машина трения предназначена для испытания на износ металлов и определения их антифрикционных свойств при различных видах трения. Она позволяет осуществлять поперечное, переменное по направлению перемещение одного из образцов, а также прикладывать нагрузку толчками, воспроизводя взаимодействие пары колесо – рельс, присущее железнодорожному транспорту.

В качестве образцов использовались ролики стандартных размеров, которые были изготовлены из марок стали, применяемых для производства как рельсов (Р-65), так и колес. Износ роликов определялся методом гравиметрии – путём взвешивания на аналитических весах с точностью до 0,0001 г.

Результаты испытаний представлены в табл. 1. Как видно из данных, уменьшение содержания лигнина ниже 15 (%, масс.) снижает защитный эффект смазки, а увеличение его содержания выше 25 (%, масс.) приводит к образованию густой смазки, которую трудно наносить в зону контакта.

Соотношение между содержанием дизельного масла и НМПЭ определяет консистенцию смазки и зависит от климатических условий применения композиции. Снижение количества дизельного масла ниже 10 (%, масс.) делает смазку густой, ее компоненты трудно перемешиваются между собой, а его увеличение выше 25 (%, масс.) приводит к образованию жидкой композиции, которая, тем не менее, обладает высокой вязкостью и плохо наносится в зону трения.

Кроме лигнина в качестве компонента композиций был использован продукт, получаемый путём введения в лигнин хлора. Для этого гидролизный лигнин в водной суспензии обрабатывают хлором или гипохлоритом. Полученный лигнин содержит 3–5 (%, масс.) хлора, органические соединения которого используются в качестве противоизносных присадок к маслам. Композиции 9 и 10 (см. табл. 1) вместо лигнина содержат хлорлигнин, который способствует более долговременному действию применяемой смазки.

В табл. 1 приведены значения относительного уменьшения износа Δ за счет смазки, которое рассчитывалось по формуле

$$\Delta = \left(\frac{I_{áñ} - I}{I_{áñ}} \right) \cdot 100, \%,$$

где $I_{бс}$, I – значение износа без и со смазкой.

Как видно из табл. 1, смазки № 1, № 5 и № 9 снижают износ на 94,6–96,7 % для подвижного ролика, на 90,9–93,9 % для неподвижного ролика.

Результаты экспериментов (без учета опытов 9 и 10) были обработаны в пакете Statgraphics Plus. Получены аппроксимирующие зависимости, определяющие покомпонентное влияние состава смазочной композиции *x, y, z* на износ I_p. Стати-

Таблица 1

Износ опытных роликов

№ смазки	Состав смазочной композиции, %			Износ I, г		Δ, %	
	Дизельное масло, x	НМПЭ, y	Лигнин, z	Подвижный ролик (ПР)	Неподвижный ролик (НР)	ПР	НР
1	15	65	20	0,054	0,145	96,597	90,954
2	15	70	15	0,098	0,198	93,824	87,648
3	15	75	10	0,153	0,203	90,359	87,336
4	20	55	25	0,126	0,136	92,060	91,515
5	25	55	20	0,085	0,097	94,644	93,948
6	28	52	20	0,181	0,201	88,594	87,461
7	10	75	15	0,146	0,196	90,800	87,772
8	15	67	28	0,187	0,207	88,216	87,086
9*	15	65	20	0,053	0,135	96,660	91,578
10*	15	70	15	0,099	0,187	93,761	88,334
11	Без смазки		$I_{\text{áñ}}$=	1,587	1,603		

**Вместо лигнина использован хлорлигнин.*

Таблица 2

Критерии достоверности регрессионных зависимостей

Номер формулы	Коэффициент детерминации, %	Критерий Дарбина – Уотсона	Стандартная ошибка, S	Сред. абс. ошибка, г
(1)	95,14	1,83	0,124	0,076
(2)	99,37	2,00	0,045	0,026
(3)	94,74	1,78	0,129	0,078
(4)	95,62	1,79	0,116	0,069
(5)	99,54	2,75	0,038	0,025
(6)	94,83	1,94	0,126	0,076
(7)	98,68	1,84	0,065	0,045
(8)	97,55	1,45	0,086	0,060

стические критерии достоверности регрессионных зависимостей приведены в табл. 2.

Для ПР:

$$I_p = 1{,}5253 - 0{,}1526x + 0{,}00381x^2; \quad (1)$$

$$I_p = 1{,}5872 - 0{,}0470y + 0{,}00037y^2; \quad (2)$$

$$I_p = 1{,}5136 - 0{,}1506z + 0{,}00381z^2. \quad (3)$$

Для НР:

$$I_p = 1{,}5442 - 0{,}1467x + 0{,}00358x^2; \quad (4)$$

$$I_p = 1{,}6019 - 0{,}0483y + 0{,}00040y^2; \quad (5)$$

$$I_p = 1{,}5311 - 0{,}1440z + 0{,}00356z^2. \quad (6)$$

Анализ полученных зависимостей позволил предложить следующие множественные уравнения регрессии, позволяющие прогнозировать величину износа по компонентному составу смазки:

для ПР:

$$I_p = 1{,}5750 - 0{,}8264(xyz)^{0{,}0563}; \quad (7)$$

для НР:

$$I_p = 1{,}57183 - 0{,}000225xyz + 1{,}04 \cdot 10^{-6}(xyz)^{1{,}5}. \quad (8)$$

Таким образом, предлагаемые смазочные композиции № 1, № 5 и № 9 для предотвращения износа в паре трения колесо – рельс, которые состоят из дешёвых, доступных компонентов, легко наносятся на рельс, обладают высокой эффективностью и оказывают минимальное экологическое воздействие.

Построим прогнозные оценки износа при следующем изменении состава смазки. Доверительные интервалы прогноза $I_p \pm tS$ (t =1,895 – критерий Стьюдента, $S = \sqrt{\dfrac{\sum_{i=1}^{n}[I_{\hat{y}}(i) - I_p(i)]^2}{n-3}}$ – стандартная ошибка, см. табл. 2) для регрессионных моделей (7), (8) для уровня значимости 0,10 и числа степеней свободы n – 3 = 7.

Анализ табл. 3 и табл. 1 показывает, что экспериментальное значение износа попадает в интервалы прогноза, заданные нижней и верхней границами.

Также представлен анализ противозадирных присадок на основе полисульфидных полимеров, влияние их состава на защитные свойства смазки.

Таблица 3

Прогнозные оценки износа при изменения состава смазки

Ролик, уравнение регресии	Состав близок к опыту №	x	y	z	Прогноз износа, I_p,г	Нижняя граница $I_p - tS$,	Верхняя граница $I_p + tS$,
ПР, (7)	4	21	56	23	0,1070	-0,0161	0,2301
ПР, (7)	5	26	56	18	0,0437	-0,1192	0,2066
НР, (8)	8	16	68	16	0,0437	-0,1192	0,2066
НР, (8)	5	26	56	18	0,0980	-0,0649	0,2609
НР, (8)	4	21	56	23	0,1124	-0,1605	0,2752

Трение, возникающее между гребнем колеса и боковой поверхностью головки рельса, характеризуется высокими удельными нагрузками, периодичностью и нестационарностью. В зоне контакта наблюдаются кратковременные резкие увеличения давления и температуры. В результате таких воздействий молекулы, входящие в состав смазочных композиций, подвергаются химическим превращениям, и продукты реакций легче адсорбируются на трущихся поверхностях. Поэтому в некоторые рельсовые смазки вводят серу и щелочь, которые, образуя поверхностные сульфиды, упрочняют поверхности трения колеса и рельса. Однако, как отмечалось, введение щелочи и поверхностно-активных веществ ухудшает другие эксплуатационные свойства смазки (повышается коррозионное воздействие и воздействие на окружающую среду). Поэтому более эффективна не сама сера, а ее соединения.

Уже отмечалось, применяемые сернистые присадки представляют собой труднодоступные вещества, имеющие высокую стоимость. В большинстве случаев их физико-химические характеристики, такие как горючесть, токсичность, ограничивают широкое использование в смазочных композициях.

В качестве противозадирной присадки в композиции для лубрикации рельсов впервые нами были предложены и использованы серосодержащие полимерные продукты, получаемые из отходов производства эпихлоргидрина, выпускаемого для синтеза эпоксидных смол.

В диспергированном состоянии полимеры данного типа легко смешиваются со смазочной композицией, предлагаемой для лубрикации рельсов на основе низкомолекулярного полиэтилена, мелкораздробленного нефтяного кокса и отработанного дизельного масла локомотивов.

В табл. 4 представлены результаты лабораторных испытаний на машине трения смазочных композиций, содержащих полисульфидные полимеры с разным процентным содержанием серы.

Чтобы оценить противозадирный эффект присадки из тиокола на данную триботехническую систему, износ роликов определялся несколько раз в течение одного эксперимента. Вначале ролики работали 6 часов в присутствии смазки, которую наносили в зону контакта через каждые 10 мин. Затем смазку с роликов убирали с помощью бензина и ветоши, замеряли результат износа, и испытания проводили еще три часа (уже в отсутствие смазки). После этого определяли износ роликов и снова продолжали опыт в течение еще трех часов.

Результаты испытаний свидетельствуют о том, что введение в смазку полимерной присадки, содержащей серу, не только сохраняет и улуч-

Таблица 4

Влияние состава полисульфидного полимера на защитные свойства смазки

Количество часов работы со смазкой	1 час				2 часа				3 часа				4 часа				6 часов			
Количество часов работы без смазки	3 часа		6 часов		3 часа		6 часов		3 часа		6 часов		3 часа		6 часов		3 часа		6 часов	
	ПР	НР	ПР	НР	ПР	НР	ПР	НР	ПР	НР	ПР	НР	ПР	НР	ПР	НР	ПР	НР	ПР	НР
Смазка № 1 (полимер из Na_2S_1)	0,603	0,610	1,203	1,387	0,510	0,612	1,234	1,318	0,383	0,401	1,117	1,107	0,123	0,161	0,712	0,694	0,118	0,123	0,535	0,561
Смазка № 2 (полимер из Na_2S_2)	0,583	0,602	1,223	1,294	0,555	0,543	1,162	1,158	0,471	0,462	1,087	1,010	0,264	0,247	0,853	0,871	0,189	0,183	0,394	0,437
Смазка № 3 (полимер из Na_2S_3)	0,412	0,434	0,812	0,796	0,357	0,371	0,732	0,741	0,303	0,298	0,619	0,627	0,261	0,257	0,463	0,482	0,194	0,187	0,417	0,386
Смазка № 4 (полимер из Na_2S_4)	0,342	0,361	0,707	0,723	0,276	0,275	0,672	0,663	0,217	0,210	0,575	0,563	0,195	0,199	0,401	0,384	0,183	0,171	0,293	0,287

шает защитный эффект смазки, но и способствует упрочнению поверхности в зоне трения, т. к. защитный эффект сохраняется после удаления смазки.

Это позволяет предположить, что серосодержащие полимеры будут способствовать снижению износа боковой поверхности рельса и гребня колеса при прохождении криволинейных участков не только при непосредственном нахождении смазки в зоне трения, но и спустя некоторое время после ее полного удаления.

Используемые серосодержащие полимерные противозадирные присадки можно с точки зрения их химического состава классифицировать на две группы:

1. Полимеры с высоким содержанием серы и низким содержанием хлора. В молекулах этих веществ содержится большое количество полисульфидных цепочек Sn с величиной n от 2 до 4. Под действием механических нагрузок и локальных температур связи –C–S– и –S–S– в полимерах разрываются, что определяет появление в зоне трения «активной серы», способной взаимодействовать с поверхностными атомами металла. Этим обеспечивается сульфидирование поверхности. Вопросам сульфидирования поверхности при использовании серосодержащих присадок в литературе по трению и износу уделяется достаточное внимание. В работе было исследовано образование поверхностных соединений в зоне трения при использовании различных серосодержащих присадок. При этом убедительно показано, что при использовании органических сульфидов и дисульфидов на поверхности образуются сульфиды железа, а при использовании меркаптанов – меркаптиды железа $Fe(SR)_2$. Все химические реакции протекают только за счет энергии трения. Очевидно, что и использование полимеров с полисульфидными цепочками должно приводить к образованию поверхностных сульфидов железа. Однако в этом случае нельзя отрицать и образования полимерного покрытия на поверхности металла за счет хемосорбции полимера, которая также предотвращает износ.

2. Полимеры со сравнительно низким содержанием серы и высоким (до 15 %, масс.) содержанием остаточного хлора. Сера в их структуре входит в основном в виде сульфидных звеньев C–S–C, а хлор, опираясь на данные работы [9], вероятнее всего – в основном виде фрагментов CHCl с атомом хлора около центрального атома углерода пропановой цепочки. В силу пространственного строения полимера можно ожидать высокую экранированность атомов хлора другими частями молекулы.

Первичным актом при образовании поверхностных соединений любого типа (сульфидов или хлоридов железа) должен быть разрыв связей в полимерной молекуле за счет термического и механического воздействия в паре трения. В табл. 5 представлены значения энергии связей, присутствующих в молекуле полимеров, используемых в качестве противозадирной присадки.

Из табл. 5 следует, что наиболее легко разрываться должны сульфидные и полисульфидные связи. То есть сульфидирование поверхностей трения должно происходить предпочтительнее (легче и быстрее), чем хлорирование (особенно для полимеров с высоким содержанием серы).

Результаты измерения износа роликов, которые проработали определенное число часов со смазкой и далее 3 или 6 часов без смазки, представлены на рис. 1 и 2.

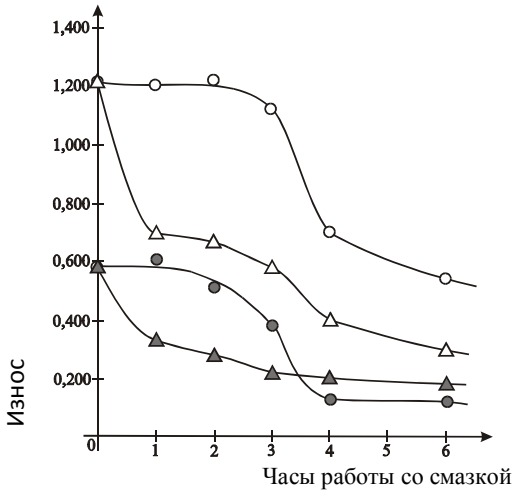


Рис. 1. Износ роликов при использовании в смазке полимера № 1 и № 4:
○ – смазка № 1, работа без смазки *y* = 6 ч;
● – смазка № 1, *y* = 3 ч;
Δ – смазка № 4, *y* = 6 ч;
▲ – смазка № 4, *y* = 3 ч

Таблица 5

Значения энергии связей (E) [1]

Связь	C–C	C–H	C–S	S–S	C–Cl
E, кДж/моль	344	415	259	182	328

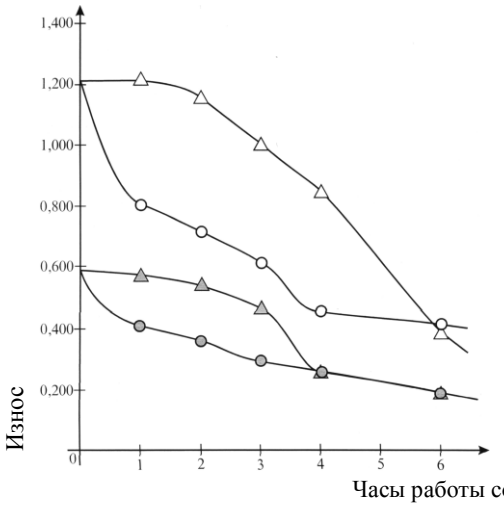


Рис. 2. Износ роликов при использовании в смазке полимеров № 2 и № 3: ●– смазка № 2, *y* = 3 ч; ▲– смазка № 3, *y* = 3 ч; ○– смазка № 2, *y* = 6 ч; Δ – смазка № 3, *y* = 6 ч

Из рисунков видно, что полимеры с большим содержанием серы уже после одного часа работы со смазкой дают положительный результат, то есть способствуют снижению бокового износа и после удаления смазки. Очевидно, что этого времени достаточно, чтобы происходило сульфидирование поверхности, то есть в зоне контакта образовалась сульфидная пленка, которая упрочняет и защищает контактирующую поверхность от износа.

Полимеры, содержащие больше остаточного хлора (смазка 1) также проявляют защитный эффект, но он становится заметным только после трех часов работы пары трения со смазкой. Здесь происходит замедленное образование сульфидов, образование хлоридов не может происходить быстро в силу указанных выше причин (экранированность атомов хлора другими частями молекулы полимера и высокая энергия связи C–Cl).

Полимеры со средним содержанием серы и остаточного хлора (рис. 2) проявляют защитный эффект уже после одного часа работы со смазкой, и кривые для них более плавные. На основании этого можно сделать вывод, что защитный эффект присадке приносят как атомы серы, так и атомы хлора.

Присадки, содержащие серу и хлор, являются универсальными, ведут себя удовлетворительно как в режимах высоких нагрузок, так и при высоких скоростях и низких нагрузках. Сера снижает трение и усиливает противозадирный эффект, обеспечиваемый хлором.

Математическое моделирование разработанных смазочных композиций

Для количественного описания влияния содержания серы и хлора в полимерных присадках на износ получены регрессионные уравнения общего вида $I_p = f(t)$, где I_p – износ за x часов работы без смазки, а t – часы предварительной работы со смазкой. В табл. 6 приведены полученные уравне-

Таблица 6

Регрессионные уравнения модели износа

Ролик	№ смазки	x = 3 часов работы без смазки	x = 6 часов работы без смазки
ПР	1	$I_p = 0,8484 - 0,2550t + 0,0166t^2$ (9)	$I_p = 1,2860 + 0,1115t - 0,1424t^{1,3}$ (10)
НР	1	$I_p = 0,8533 - 0,1946t + 0,0114t^2$ (11)	$I_p = 1,6033 - 0,1844t$ (12)
ПР	2	$I_p = 0,6940 - 0,0880t$ (13)	$I_p = 1,4880 - 0,1700t$ (14)
НР	2	$I_p = 0,7011 - 0,0918t$ (15)	$I_p = 1,4984 - 0,1701t$ (16)
ПР	3	$I_p = 0,4445 - 0,0435t$ (17)	$I_p = 0,8790 - 0,0845t$ (18)
НР	3	$I_p = 0,4673 - 0,0494t$ (19)	$I_p = 0,8874 - 0,0878t$ (20)
ПР	4	$I_p = 0,4301 - 0,0971t + 0,0093t^2$ (21)	$I_p = 0,8184 - 0,0902t$ (22)
НР	4	$I_p = 0,43554 - 0,1090t + 0,0104t^2$ (23)	$I_p = 0,8241 - 0,0938t$ (24)

Таблица 7

Критерии достоверности регрессионных зависимостей

Номер формулы	Коэффициент детерминации, %	Критерий Дарбина – Уотсона	Стандартная ошибка, *S*, г	Сред. абс. ошибка, г
(9)	91,872	2,680	0,089	0,051
(10)	89,282	2,730	0,146	0,083
(11)	88,737	2,511	0,112	0,063
(12)	91,819	2,719	0,122	0,081
(13)	91,834	2,745	0,058	0,040
(14)	93,736	1,369	0,098	0,067
(15)	92,136	2,882	0,060	0,038
(16)	98,589	1,861	0,045	0,030
(17)	98,442	1,454	0,012	0,008
(18)	92,199	2,357	0,054	0,034
(19)	96,958	1,449	0,019	0,014
(20)	96,240	2,551	0,038	0,023
(21)	99,672	3,465	0,005	0,003
(22)	95,410	2,650	0,044	0,031
(23)	98,398	2,880	0,014	0,007
(24)	95,566	2,756	0,045	0,029

ния регрессии, критерии достоверности которых указаны в табл. 7. При выборе аппроксимирующих зависимостей исходили из максимизации критерия детерминации R^2. Если разница в значениях R^2 для нелинейной и линейной регрессий была невелика, то выбирали линейную регрессию.

На рис. 3 в качестве примера сопоставлены результаты расчета по модели (16) с экспериментальными данными.

Действительное значение $I(t_i)$ для аргумента t_i можно представить в виде

$$I(t_i) = I_p(t_i) + e_i,$$

где I_p – значение износа, вычисленное по уравнению (16) для времени работы без смазки t_i, i – номер опыта, $e_i = I_э(t_i) - I_p(t_i)$ – величина остатка, случайная, ненаблюдаемая переменная. На рис. 5 приведена зависимость e_i от $I_p(t_i)$.

Как видно из рис. 3–5, уравнение регрессии (16) достаточно точно описывает экспериментальные данные.

Полученные уравнения не только позволяют предсказать величину износа при израсходовании смазки, но и объясняют механизм защитного действия полимерных присадок, содержащих серу и хлор.

Несмотря на то, что аппроксимация полиномами 2-го, 3-го и 4-го порядков лучше описывает экспериментальные данные, их прогностические характеристики (прогноз увеличения работы со смазкой больше 6 часов) лишены физического смысла. Для уравнения второго порядка износ становится отрицательным, а для полиномов 3 и 4 порядков износ резко возрастает после увеличения времени работы со смазкой более 6 часов, хотя последействие смазки (образование пластичного защитного слоя на поверхности металла) должно либо возрастать, либо оставаться на уровне 6 часов работы со смазкой.

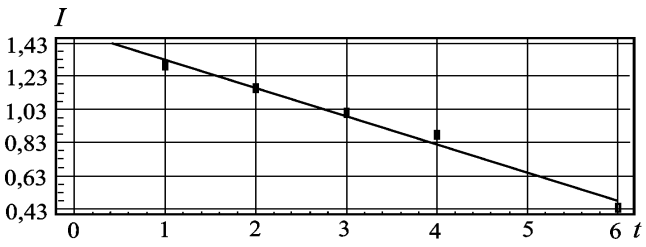


Рис. 3. Зависимость износа *I* от времени *t* работы без смазки: точки – опытные данные, линия – уравнение регрессии

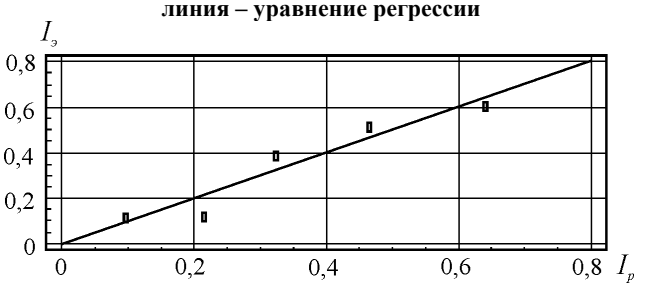


Рис. 4. Зависимость экспериментальных значений износа ($I_э$) от предсказанных по формуле (16) значений (I_p)

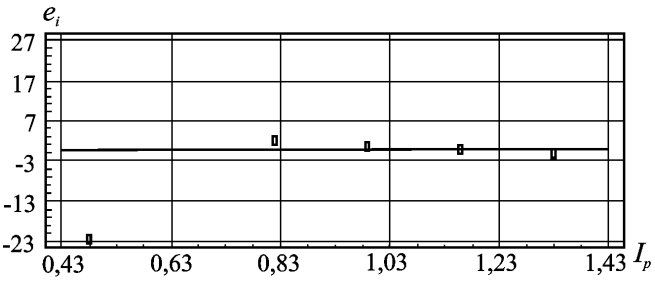


Рис. 5. Зависимость остатков e_i от предсказанных значений I_p, вычисленных по уравнению регрессии (8)

В целом защитное действие смазки лучше всего описывается экспоненциальной зависимостью износа от времени работы машины трения со смазкой ($y = ae^{-bx}$), коэффициент b имеет большее абсолютное значение для моделей, соответствующих 3 часам работы без смазки, что свидетельствует о том, что защитный слой, образующийся на поверхности в течение 3 часов, практически полностью защищает поверхность металла от износа даже при полном отсутствии смазки.

Таким образом, предлагается композиция для предотвращения износа в паре трения колесо – рельс, которая состоит из дешёвых, доступных компонентов, легко наносится на рельс, обладает высокой эффективностью и оказывает минимальное экологическое воздействие на человека и окружающую среду. Полученные аппроксимирующие зависимости позволяют достаточно точно прогнозировать износ в паре трения колесо – рельс в зависимости от состава смазочной композиции.

Заключение

1. Решена задача снижения износа в паре колесо – рельс путем применения новых смазочных композиций на основе низкомолекулярного полиэтилена и природного полимера лигнина применительно к условиям ВСЖД – филиалаОАО «РЖД».

2. Созданы новые смазочные композиции на основе низкомолекулярного полиэтилена для процесса лубрикации пары колесо – рельс, что позволило снизить затраты на лубрикацию и частично решить проблему утилизации отходов химического производства (лигнина, нефтяного кокса, низкомолекулярного полиэтилена).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Энергии разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродство к электрону / Гурвич Л. В., Карачевцев Г. В., Кондратьев В. Н., Лебедев Ю. А., Медведев В. А., Потапов В. К., Ходеев Ю. С. М. : Наука. 1974. 351 с.
2. Карпущенко Н. И. Смазка – единственный способ предупреждения износа // Путь и путевое хозяйство. 2000. № 2. С. 15–18.
3. Коган А. Я. Оценка износа рельсов и бандажей колесных пар при движении в кривых участках пути // Вестн. ВНИИЖТ. 1990. № 2. С. 36–40.
4. Крапивный В. А. Программа снижения износа рельсов и колесных пар // Железнодорожный транспорт. 1995. № 11. С. 30–33.
5. Лысюк В. С. Причины и механизм схода колеса с рельса. Проблема износа колес и рельсов. М. : Транспорт. 1997. 188 с.
6. Марков Д. П. Триботехнические характеристики элементов пары трения колесо-рельс // Трение и износ. 1995. Т. 16, № 1. С. 138–156.
7. Пашолок И. Л., Харитонов В. Б. О возможном повышении износостойкости железнодорожных колес // Вестн. ВНИИЖТ. 1997. № 1. С. 32–36.
8. Перцев А. Н. О причинах износа колес и рельсов // Железнодорожный транспорт. 1998. № 12. С. 50–51.
9. Смазывание рельсов как средство уменьшения шума // Железные дороги мира. 2000. №7. С. 64-66.
10. Шишмарев А.А., Никулин А.Н., Коротаев Б.В. О влиянии ширины колеи на износ рельсов // Путь и путевое хозяйство. 1999. № 5. С. 16–18.
11. Шур Е. А., Бычкова Н. Я. Влияние внутренних факторов на износ рельсовой и колесной стали. Трибология и транспорт : материалы науч.-практ. симп. Рыбинск : 1995. Кн. 3.
12. Эрадзе Д. Г., Карпачевский Г. В. Влияние ширины колеи на износ рельсов и гребней колес // Путь и путевое хозяйство. 1999. № 1. С. 14–16.

УДК 517.994

Мухачев Юрий Сергеевич,
к. ф-м. н., доцент кафедры «Теоретической механики и приборостроения», ИрГУПС
тел.: (3952)77-44-63, e-mail: Mukhachev_Yu_S@mail.ru
Рябов Евгений Валерьевич,
научный сотрудник. НИИПФ ИГУ, тел.: (3952)33-21-46
Корчевин Евгений Николаевич,
соискатель ИрГУПС, тел.: 89027611628

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-РАЗНОСТНОГО УРАВНЕНИЯ ПЕРВОГО ПОРЯДКА

Yu. S. Mukhachev, E.V. Ryabov , E.N. Korchevin

THE NUMERICAL SOLUTION OF THE DIFFERENTIAL-DIFFERENCE EQUATION OF THE FIRST ORDER

Аннотация. *В статье предлагается метод численного решения характеристического квазиполинома. Предложен алгоритм вычисления корней квазиполинома, исследовано влияние параметров на расположение корней на комплексной плоскости.*

Ключевые слова: *автоматическое управление, запаздывание, корни квазиполинома.*

Abstract. *The article proposes a method of numerical solution of a characteristic quasipolynom. The algorithm for calculating the roots is proposed, the parameter influence on the location of the roots on the complex plane is investigated.*

Keywords: *automatic control, time lag, quasipolynomial roots.*

Анализ переходных процессов и устойчивости систем автоматического управления (САУ) систем, содержащих в своем составе звенья чистого запаздывания, традиционно считается сложной проблемой теории автоматического управления. Основная сложность задачи связана с тем, что подобные системы описываются дифференциальными уравнениями с запаздывающим аргументом (дифференциально-разностными уравнениями). Характеристическое уравнение системы имеет вид квазиполинома, является трансцендентным и не имеет точного решения [1, 2, 3]. Ситуация значительно осложняется тем, что квазиполином имеет бесконечное количество корней.

Анализ устойчивости управления систем с запаздыванием проводится по частотным критериям Найквиста и Михайлова, для осуществления которых не требуется вычисления точных значений полюсов.

Исследование качества работы САУ в переходных и установившихся режимах являются самостоятельной проблемой, для решения которой необходимо знать точное положение полюсов на комплексной плоскости и оценить влияние параметров системы на их смещение. Приближенные методы анализа основаны на замене звена с запаздыванием обыкновенным апериодическим звеном второго порядка или последовательным соединением нескольких апериодических звеньев [2, 3].

В данной работе предпринята попытка решения дифференциального уравнения первого порядка с запаздывающим аргументом численным методом без введения каких либо упрощающих предположений.

Алгоритм численного решения разработан для замкнутой системы, состоящей из двух последовательно соединенных звеньев: апериодического звена первого порядка и звена чистого запаздывания.

Передаточная функция исходной системы имеет вид

$$W(p)=\frac{Ke^{-p\tau}}{Tp+1}, \qquad (1)$$

где K – коэффициент передачи,

T – постоянная времени инерционного звена,

τ – время чистого запаздывания.

Если данное звено включено в замкнутую систему с обратной связью, то передаточная функция системы примет вид

$$W_{oc}(p)=\frac{W(p)}{1+W(p)}=\frac{Ke^{-p\tau}}{Tp+1+Ke^{-p\tau}}. \qquad (2)$$

Для обратного преобразования Лапласа функцию (2) необходимо представить через полюсы и вычеты в виде [4]

$$W_{oc}(p) = \sum_k \frac{C_k}{(p - p_k)}, \quad (3)$$

где C_k – вычеты,

p_k – полюсы.

Полюсы p_k являются корнями квазиполинома, то есть решениями трансцендентного характеристического уравнения

$$Tp + 1 + Ke^{-p\tau} = 0. \quad (4)$$

К сожалению, общего метода решения уравнений типа (4) не существует.

Предпримем попытку решения уравнения (4) приближенными численными методами. Рассмотрим квазиполином более подробно. Представим комплексную переменную p в виде

$$p = \sigma + j\omega, \quad (5)$$

где σ – действительная часть,

ω – мнимая часть,

j – мнимая единица.

Подставив выражение (5) в квазиполином (4) и выполнив ряд элементарных преобразований, получим следующее уравнение:

$$\left(T\sigma + 1 + Ke^{-\sigma\tau}\cos\omega\tau\right) + j\left(T\omega - Ke^{-\sigma\tau}\sin\omega\tau\right) = 0. \quad (6)$$

Комплексная величина равна нулю в том случае, если равны нулю действительная и мнимая величины, поэтому уравнение (6) разделяется на два уравнения вида

$$T\sigma + 1 + Ke^{-\sigma\tau}\cos\omega\tau = 0, \quad (7)$$

$$T\omega - Ke^{-\sigma\tau}\sin\omega\tau = 0. \quad (8)$$

Преобразуем формулу (8) с целью разделения переменных следующим образом:

$$T\sigma + 1 + Ke^{-\sigma\tau}\cos\omega\tau = 0 \Rightarrow \cos\omega\tau = -\frac{T\sigma + 1}{Ke^{-\sigma\tau}}. \quad (10)$$

После элементарных преобразований (10) получим выражение для $\omega\tau$ в виде

$$\omega\tau = \arccos\left(-\frac{T\sigma + 1}{Ke^{-\sigma\tau}}\right). \quad (11)$$

Преобразуем формулу (8) с целью разделения переменных

$$T\omega - Ke^{-\sigma\tau}\sin\omega\tau = 0 \;\Rightarrow\; \sigma = -\frac{1}{\tau}\ln\left(\frac{T\omega}{K\sin\omega\tau}\right). \quad (12)$$

Подставим выражение для переменной σ из формулы (12) в формулу (11) и получим неявное уравнение относительно переменной ω в следующем виде:

$$\cos\omega\tau + \frac{\sin\omega\tau}{\omega\tau}\left[\frac{\tau}{T} + \ln\left(\frac{\tau}{T}K\right) + \ln\left(\frac{\sin\omega\tau}{\omega\tau}\right)\right] = 0. \quad (13)$$

Уравнение (13) является трансцендентным, явного аналитического решения не имеет, поэтому его дальнейший анализ необходимо проводить в численном виде.

Численное решение уравнения (13) требует предварительной оценки возможного положения нулей, поэтому введем вспомогательную переменную

$$z(\omega) = \cos\omega\tau + \frac{\sin\omega\tau}{\omega\tau}\left[\frac{\tau}{T} + \ln\left(\frac{\tau}{T}K\right) + \ln\left(\frac{\sin\omega\tau}{\omega\tau}\right)\right]. \quad (14)$$

График функции (14) изображен на рис. 1.

Как видно из рис. 1, вспомогательная функция $z(\omega\tau)$ имеет ряд разрывов, то есть она не определена на участках, где функция под знаком логарифма приобретает отрицательное значение или равна нулю. Вместе с тем, из рисунка видно, что в области пересечения действительной оси функция непрерывна и не имеет изломов.

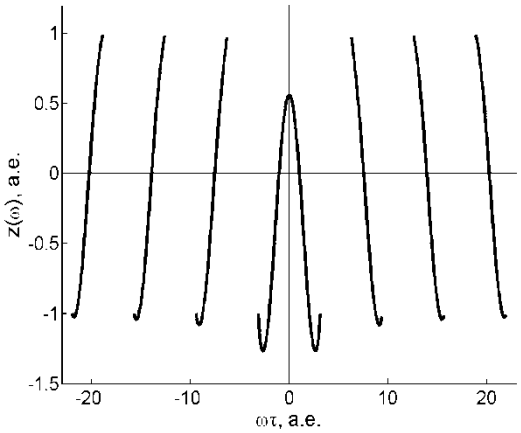


Рис. 1. Вспомогательная функция z(ω)

Алгоритм поиска корней состоит из следующих действий:

а) задается область значений аргумента $\omega\tau$, в которой необходимо найти корни;

б) производится предварительное вычисление значений $z(\omega)$ с грубым шагом по координате $\omega\tau$;

в) выделяется интервал, ограниченный двумя соседними значениями $\omega\tau$, внутри которого переменная $z(\omega)$ меняет знак;

г) выделенный интервал дополнительно разбивается на заданное количество более мелких интервалов, повторяется процедура поиска точного интервала смены знака переменной $z(\omega)$;

д) в найденном узком интервале находится приближенное значение корня методом секущей;

е) найденные значения корней на оси $\omega\tau$ используются для вычисления переменной σ по формуле (12);

ж) для полученных приближенных значений производится расчет абсолютной и относительной погрешностей вычисленных значений полюса;

з) полученные значения σ и ω объединяются в комплексную переменную $p = \sigma + j\omega$, которая изображается на комплексной плоскости;

и) численные значения полюсов и относительных погрешностей выводятся на монитор.

Программу для численного нахождения корней квазиполинома первого порядка целесообразно разбить на две части:

1) основную программу, задающую исходные значения и обрабатывающую результаты численного решения,

2) подпрограмму непосредственного вычисления корней квазиполинома.

На рис. 2 показан пример поиска решений характеристического квазиполинома для постоянной времени T = 3,0, времени запаздывания τ =1,0, коэффициента передачи K = 6,0.

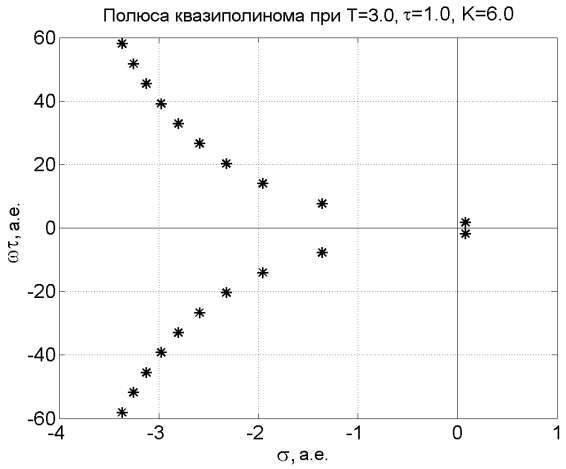


Рис. 2. Пример расчета полюсов квазиполинома

Как видно из рис. 2, при заданных значениях параметров два полюса расположены в положительной полуплоскости, поэтому система неустойчива и в ней будут развиваться колебания возрастающей амплитуды.

На рис. 3 показана зависимость вспомогательной функции (18) от $\omega\tau$, рассчитанная при разных значениях коэффициента усиления K. Из рисунка видно, что зависимость от коэффициента усиления имеет две принципиально разных области, разделенные критическим значением $K_{КР}$ = 0,79.

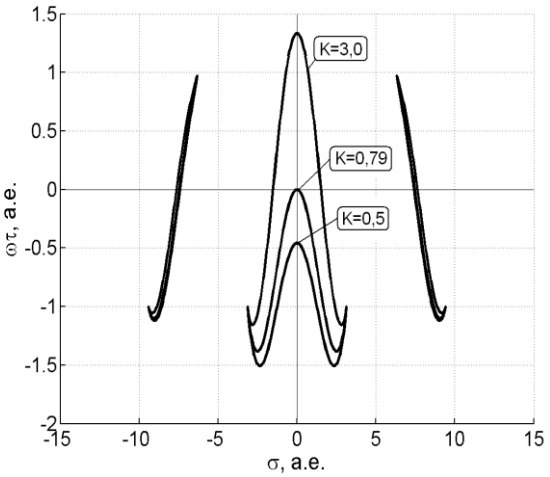


Рис. 3. Вспомогательная функция при коэффициенте усиления выше критического (K=3), ниже критического (K=0,5) и равном критическому (K=0,79)

При значениях выше критического коэффициента, т. е. $K > K_{КР}$, в интервале $\omega\tau = \{-\pi, +\pi\}$ существует два комплексно сопряженных полюса, ниже критического коэффициента при $K < K_{КР}$ в этом интервале вообще не существует полюсов. При точном равенстве $K = K_{КР}$ существует один действительный полюс.

Величину критического коэффициента усиления $K_{КР}$ можно оценить по формуле (13), положив $\omega\tau$=0, тогда получим выражение

$$1 + \frac{\tau}{T} - \ln\left(\frac{T}{\tau K_{KP}}\right) = 0, \qquad (15)$$

из которого следует решение относительно $K_{КР}$ в виде

$$K_{KP} = e^{-\left(1+\frac{\tau}{T}+\ln\frac{\tau}{T}\right)}. \qquad (16)$$

При условиях для T = 3 и τ = 1 формула (16) дает точное значение для критического коэффициента усиления $K_{КР}$ = 0,79079. Зависимость положения полюсов на комплексной плоскости и при варьировании коэффициента усиления выше и ниже критического усиления показана на рис. 4.

Из рисунка 4 видно, что принципиальным моментом является наличие критического коэффициента $K_{КР}$.

На рис. 5 показана зависимость положения полюсов от постоянной времени. Из рисунка видно, что постоянная времени влияет только на параметр затухания σ, практически не отражаясь на частоте колебаний.

На рисунке 6 показана зависимость положения полюсов от времени запаздывания. Из рисунка видно, что время задержки оказывает значитель-

ное влияние одновременно на частоту и затухание. При малом времени задержки увеличивается частота высших гармоник при одновременном увеличении постоянной затухания.

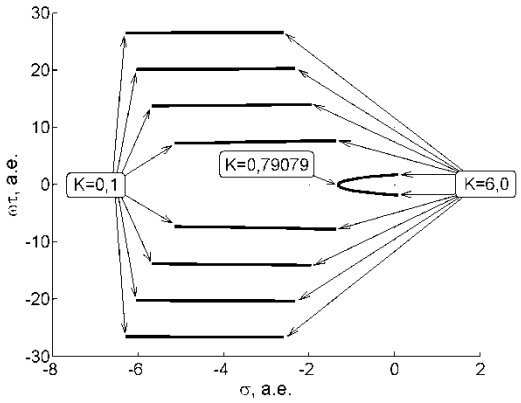


Рис. 4. Влияние коэффициента усиления на расположение полюсов

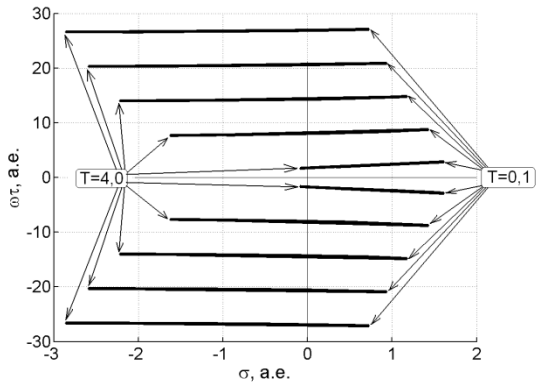


Рис. 5. Влияние постоянной времени на расположение полюсов

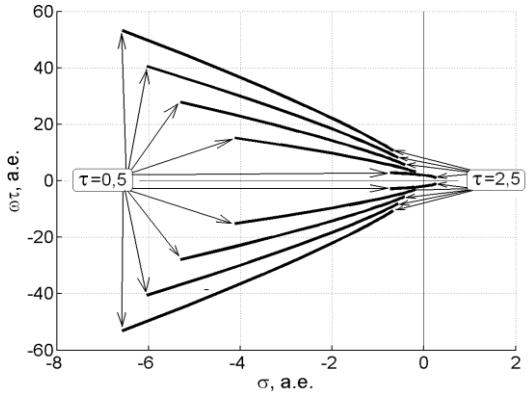


Рис. 6. Влияние времени задержки на расположение полюсов

На рисунке 3 показана зависимость вспомогательной функции (18) от $\omega\tau$, рассчитанная при разных значениях коэффициента усиления *K*. Из рисунка видно, что зависимость от коэффициента усиления имеет две принципиально разных области, разделенные критическим значением $K_{КР} = 0{,}79$.

Заключение

1. Численный метод решения характеристического уравнения позволяет с достаточной точностью определить положение полюсов на комплексной плоскости, по их расположению сделать вывод о том, является ли система устойчивой, оценить запас устойчивости, рассчитать частоты и параметры затухания переходного процесса.

2. Зависимость расположения полюсов от коэффициента усиления указывает на наличие критического коэффициента усиления:

- выше критического коэффициента наблюдается пара комплексно сопряженных полюсов;

- при критическом коэффициенте наблюдается один действительный полюс в отрицательной полуплоскости;

- если коэффициент усиления ниже критического, то низкочастотные полюса при $\omega\tau = \{-\pi, +\pi\}$ отсутствуют.

3. Зависимость расположения полюсов от постоянной времени указывает, что постоянная времени существенно влияет только на параметр затухания, почти не изменяя частоту колебаний.

4. Зависимость расположения полюсов от времени затухания носит сложный характер, уменьшение времени задержки значительно увеличивает одновременно как частоту, так и затухание.

Дальнейшее развитие исследований возможно в направлении повышения порядка уравнений и в проверке корректности приближенных методов анализа систем с запаздыванием.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методы классической и современной теории автоматического управления : учеб. : в 5 т. / под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – 2-е изд., перераб. и доп. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. Т. 1 : Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления. 635 с.
2. Ерофеев А. А. Теория автоматического управления : учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. СПб. : Политехника, 2005. 302 с.
3. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического управления. Изд. 4-е, перераб. и доп. СПб. : Профессия, 2004. 752 с. (Специалист).
4. Беллман Р., Кук К. Дифференциально-разностные уравнения : пер. с англ. М. : МИР, 1967. 548 с.

УДК 621.33.025

Лыткина Екатерина Михайловна,
ассистент кафедры «Электроподвижной состав» ИрГУПС, аспирант,
тел. 8 950 132 89 66, e-mail: forevochka@bk.ru

НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВОЗОВ

E.M. Lytkina

THE NEW TECHNOLOGY OF THE ELECTRIC LOCOMOTIVES TRACTION MOTORS RESOURCE INCREASE

Аннотация. *Предложена технология повышения ресурса тяговых двигателей электровозов с открытыми головками секций якоря, включающая в себя операции по нанесению слоя пропиточного материала пневматическими распылителями и капсулирования ее энергией ИК-излучения.*

Ключевые слова: *тяговый двигатель, обмотка якоря, ресурс, нагрев, пропитка, сушка*

Abstract. *The technology of electric locomotives traction motors of with open heads of sections of the anchor resource increase, including operations of material of impregnation layer drawing with pneumatic sprays and drying it with energy of IK-radiation is offered.*

Keywords: *traction engine, anchor winding, resource, heating, impregnation, drying.*

Электрические машины тягового подвижного состава относятся к предельно нагруженному оборудованию и поэтому с позиций комплексного воздействия на них тепловых, электромагнитных, механических и климатических факторов, несмотря на постоянно проводимые мероприятия конструктивно-технологического характера при изготовлении и ремонте, уровень повреждаемости их в эксплуатации хотя и снижается, но остается довольно высоким. Современные технологии по изготовлению коллекторных тяговых двигателей (ТД) электровозов позволяют повысить ресурс по остовам на пробег до 5 млн км. Использование этих же технологий для изготовления якорей не обеспечивает ресурс их более чем на 1 млн км пробега.

Анализируя кривые превышений температуры обмоток якорей ТД (рис. 1), очевидно, что, во-первых, закрытие головок секций керамикой приводит к недопустимым нагревам изоляции лобовой части обмотки со стороны, противоположной коллектору.

Во-вторых, раскрытие головок секций позволяет при прочих равных условиях снизить не только нагрев обмотки в районе головок секций, но и существенно повысить мощность машины, либо снизить общий нагрев обмотки, повысив срок службы изоляции. Тенденция изготовления ТД с открытыми головками секций наблюдается во всём мире.

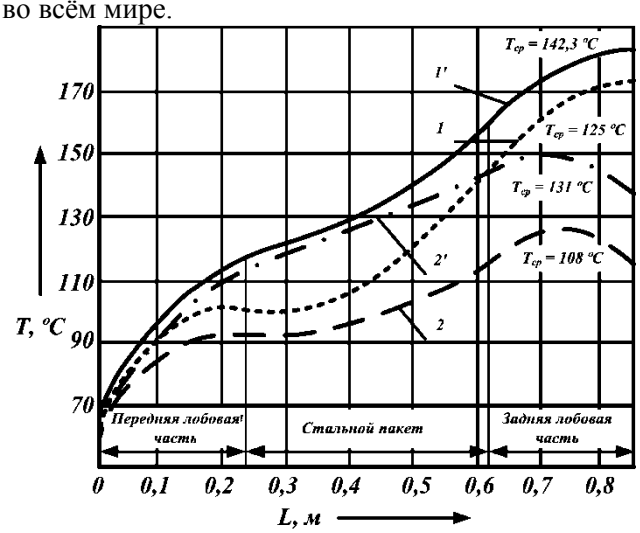


Рис. 1. Зависимости превышений температуры обмоток якорей ТД НБ-418К6 с закрытыми (1 – при Рч = 790 кВт и 1' – при Рч = 835 кВт) и НБ-514 с открытыми головками катушек (2 и 2' — при тех же мощностях)

На протяжении последних 8 лет в локомотивном ремонтном депо Нижнеудинск сохраняется стабильная тенденция – более 40 отказов в год по пробою изоляции и межвитковому замыканию (МВЗ) якоря типа НБ-514 [1]. В этой связи была выдвинута гипотеза о том, что пробои изоляции и МВЗ якорей происходят в результате наиболее

интенсивных процессов тепломассообмена в изоляции лобовых частей их обмоток с открытыми головками секций. Это и предопределило поиск новых методов и средств повышения ресурса тяговых двигателей электровозов.

Целесообразно проанализировать опыт локомотивного ремонтного депо станции Нижнеудинск ВСЖД по продлению ресурса ТД типа НБ-514 путём введения технологии дополнительной пропитки и сушки изоляции лобовой части обмотки якоря, расположенной со стороны выхода воздуха из остова. Необходимость в этой технологии была обусловлена резким увеличением пробоев изоляции якорей тяговых двигателей НБ-514 в 1999–2001 годах.

Была составлена и утверждена технологическая карта, которая включала следующие операции: очистка от пыли и смазки, промывка; сушка в стандартных печах для удаления влаги; пропитка лобовой части в специальной ёмкости лаком ФЛ98 методом окунания; сушка якоря в стандартных печах.

На рисунке 2 приведен характер изменения потока отказов изоляции якорей двигателей НБ-514 за 2000-2002 гг., полученный на основании первичных данных, предоставленных техническим отделом локомотивного депо Нижнеудинск ВСЖД. Резкое увеличение параметра потока отказов было вызвано эксплуатацией электровозов в условиях больших перепадов температур в зоне БАМ. После принятия решения о профилактической пропитке и сушке изоляции лобовых частей обмоток якорей с противоколлекторной стороны в 2002 году параметр потока отказов снизился более чем в 1,7 раза.

Была выдвинута идея о том, что в случае капсулирования электроизоляционных пропиточных материалов с использованием ИК-энергоподвода вместо конвективного энергоподвода эффективность процесса увеличится не менее чем в 10 раз. На рисунке 3 приведены принципы нагрева слоя электроизоляционного пропиточного материала при различных методах энергоподвода [2]. При сушке теплым воздухом (рис. 3, а) верхний слой, засыхающий первым, затрудняет удаление растворителя из нижних слоев. Процесс заканчивается только тогда, когда благодаря повышающемуся давлению паров они проникнут сквозь оболочку в атмосферу и вся пленка затвердеет.

Сравнительную замедленность конвективной технологии определяет несовпадение потока тепла (направленного внутрь слоя) и потока удаляемых паров (изнутри наружу).

ИК-энергоподвод иначе распределяет энергию по слою покрытия. Большая часть доставленной инфракрасным излучением энергии (рис. 3, б) поглощается пропитанным материалом и превращается в нем в тепло. Следовательно, сильнее нагретыми оказываются проводник обмотки и нижний слой пропиточного материала, из которого интенсивно улетучиваются пары растворителя, не встречая заметного противодействия. При оптимальной организации управления ИК-энергоподводом в технологии капсулирования изоляции обмоток тяговых электрических машин

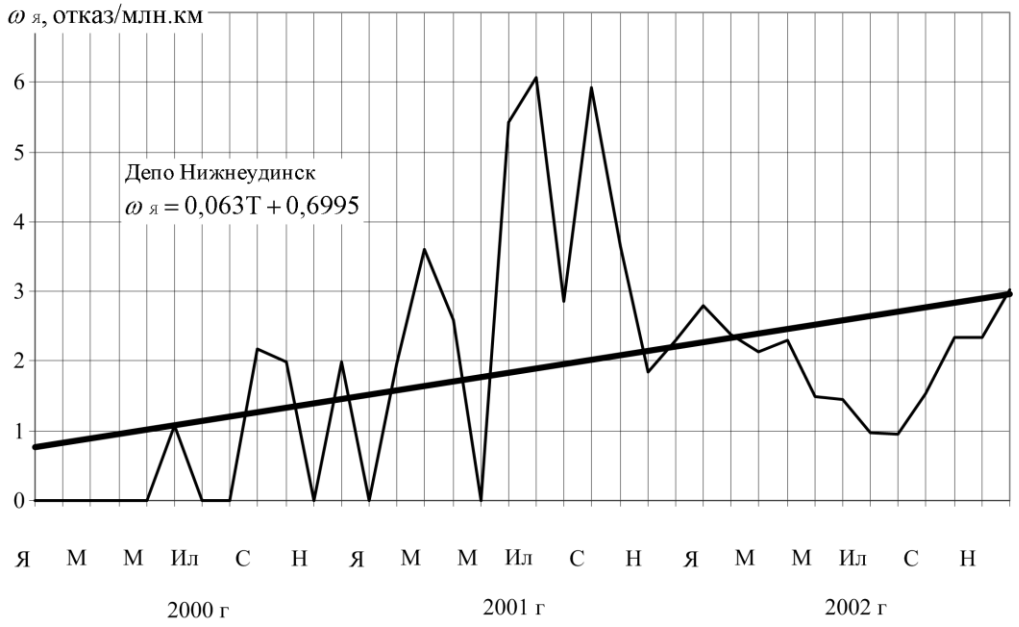
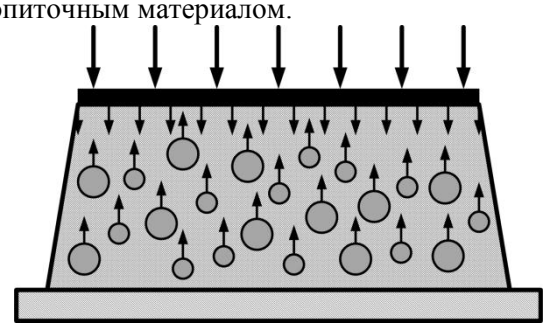


Рис. 2. Характер изменения параметра потока пробоев изоляции якорей двигателей НБ-514

можно будет получать двухслойный «монолит» с высокими показателями тепломассообмена, состоящий из покрытия проводника обмотки в нижнем слое только электроизоляционным пропиточным материалом и в верхнем слое сухой изоляции с пропиточным материалом.

а)



б)

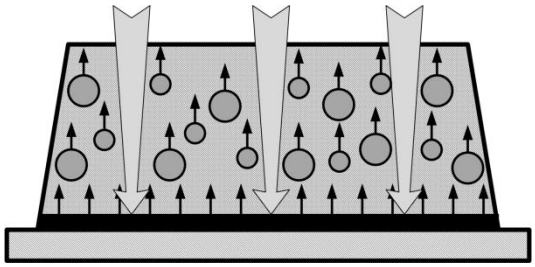


Рис. 3. Принципы процесса нагрева слоя электроизоляционного пропиточного материала при различных методах энергоподвода:
а – конвективный энергоподвод; б – ИК-энергоподвод

Коллективом сотрудников кафедры электроподвижного состава (ЭПС) Иркутского государственного университета путей сообщения совместно с инженерно-техническим персоналом управления ВСЖД и локомотивного депо Нижнеудинск создана и апробирована установка для повышения и продления ресурса якорей тяговых двигателей электровозов типа ВЛ85, серии «Ермак» и других типов и серий электровозов, оснащенных тяговыми двигателями с открытыми головками якорных секций (рис. 4).

Перед началом проектирования опытно-промышленного образца были учтены и скорректированы руководящие указания, изложенные в работе Р. Борхерта и В. Юбица, применительно к установке для капсулирования изоляции лобовых частей обмоток якоря тягового двигателя типа НБ-514. На рисунке 5 представлена схема установки для реализации эффективной технологии капсулирования изоляции лобовой части обмотки якоря инфракрасным излучением [3].

Устройство состоит из станины с пристроенным частотно-регулируемым асинхронным электроприводом, установленных на фундаменте, и сменного распылителя-облучателя.

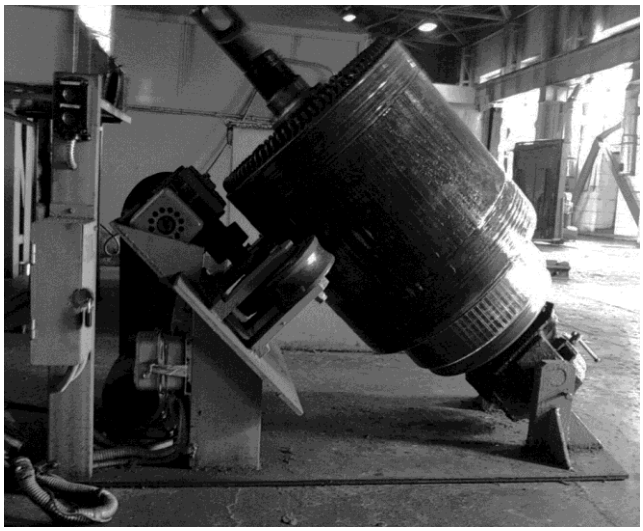


Рис. 4. Установка для капсулирования изоляции лобовых частей обмоток ТД на базе локомотивного ремонтного депо ст. Нижнеудинск

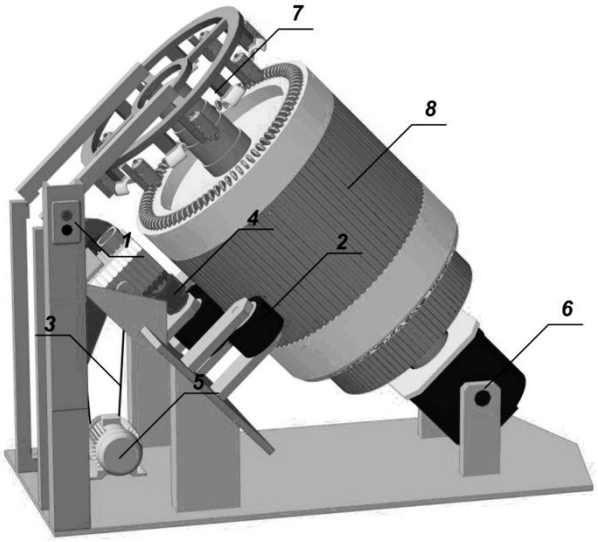


Рис. 5. Схема установки для реализации эффективной технологии капсулирования изоляции лобовой части обмотки якоря ИК-излучением:
1 – пульт управления с частотным преобразователем, 2 – приводно-опорный и опорные резиновые ролики; 3 – клиноременная передача; 4 – муфта; 5 – асинхронный двигатель; 6 – задняя букса; 7 – стойка с излучателями и распылителями; 8 – якорь ТД

Станина 8 с пристроенным частотно-регулируемым асинхронным приводом предназначена для размещения, фиксации и обеспечения плавного вращательного движения якоря 7 тягового двигателя в широком диапазоне. Размещение и фиксация на станине осуществляется при помощи приводно-опорного и опорных резиновых роликов 2 и задней буксы 6.

Частотно-регулируемый привод предназначен для придания плавного вращательного движения якорю тягового двигателя в широком диапазоне. Частотно-регулируемый асинхронный электропривод состоит из магнитного пускателя и преобразователя частоты, расположенных в шкафу управления 1, асинхронного трёхфазного короткозамкнутого электродвигателя 5, цепной передачи 3. Резиновые ролики соединены с асинхронным двигателем с помощью муфты 4.

Передвижной сменный распылитель-облучатель (рис. 6) предназначен для нанесения пропиточного материала на изоляцию лобовой части обмотки якоря пневматическим распылителем и капсулирования её путём нагревания ИК-излучателями. Он состоит из станины, на которой размещены распылители 1 и импульсные керамические преобразователи излучения (ИКПИ) 2. Способ капсулирования компаундом изоляции лобовой части обмоток якорей ТД НБ-514 заключается в следующем. Необходимо исключить попадание влаги и как следствие – пробои изоляции якоря с противоколлекторной стороны, пропитав компаундом класса изоляции F. После этого выполнить сушку с помощью ИК-излучения. При включении асинхронного двигателя начнет своё вращение якорь. В распылители под давлением подаётся компаунд, который локально наносится на лобовую часть якоря ТД. Вместе с распылителями в работу включаются ИК-излучатели, осуществляющие одновременную сушку компаунда на месте.

Внедрение технологии капсулирования изоляции инфракрасным излучением позволит повысить ресурс якоря тягового двигателя электровоза, как показывают производственные данные и лабораторные испытания, не менее чем в 1,7 – 2,0 раза.

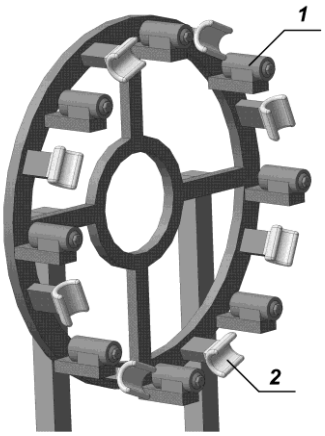


Рис. 6. Стойка с закреплёнными ИК-излучателями и распылителями:1 – распылитель; 2 – ИКПИ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Смирнов В. П. Непрерывный контроль температуры предельно нагруженного оборудования электровоза: монография. Иркутск : Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2003. 328 с.
2. Гуревич В. З. Энергия невидимого света. М. : Наука, 1973. 144 с.
3. Лыткина Е. М., Ковшин А. С., Дульский Е. Ю. Локальный метод капсулирования лобовых частей обмоток тяговых электрических машин // Проблемы, решения, инновации транспорта Российской Федерации : сб. науч. тр. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых ЭМФ. ИрГУПС, 2010. С. 19–25.

УДК 551.1.2+550.343.4(571.54)

Семенов Рудольф Михайлович,
д. г.-м. н., профессор ИрГУПС, в.н.с. Института земной коры СО РАН (Иркутск),
тел. (3952)42-54-04. e-mail:semenov@crust.irk.ru.
Смекалин Олег Петрович,
к. г.-м. н., с.н.с. Института земной коры СО РАН (Иркутск)
тел.: (3952) 42-54-04

ГЕОДИНАМИКА И СЕЙСМИЧЕСКАЯ ОПАСНОСТЬ РАЙОНА МОСТОВОГО ПЕРЕХОДА ЧЕРЕЗ Р. СЕЛЕНГУ

R.M. Semenov, O.P. Smekalin

GEODYNAMICS AND SEISMIC HAZARD OF THE BRIDGE CROSSING AREA OVER THE SELENGA RIVER

Аннотация. *Рассмотрены геодинамические условия и сейсмическая опасность района железнодорожного мостового перехода через р. Селенгу в юго-восточном Забайкалье. Несмотря на то, что новейшая и современная тектоническая активность рассматриваемого района ниже по сравнению с расположенной северо-западнее него Байкальской рифтовой зоной, все же она довольно высока. Об этом свидетельствуют интенсивное развитие рельефа, накопление рыхлых кайнозойских отложений и современная голоценовая сейсмичность. Причем сейсмическая опасность района обусловливается не только очагами местных землетрясений, но и транзитными сотрясениями из Байкальской рифтовой зоны и из Монголии. Кроме этого на высокую сейсмическую опасность указывают расположенные в непосредственной близости от рассматриваемого района высокосейсмичные зоны ВОЗ (возникновения очагов землетрясений).*

Ключевые слова: *новейшая тектоника, землетрясения, магнитуда, балльность, сейсмическая опасность.*

Abstract. *Geodynamical conditions and seismic hazard of a railroad bridge crossing area over the Selenga River in South-East Zabaikal'e are considered. Although neotectonics and recent tectonic activities of the region at issue, in comparison with Baikal rift zone located in the South West, are lower but, nevertheless, they are rather high. The intensive rift developing, residual Cenozoic deposits accumulating, and recent Holocene seismicity are the evidence of it. Moreover, seismic hazard of the region is caused not only by local earthquake focuses but also by transit earth tremors from Baikal rift zone and Mongolia. Besides, high seismically active zones of earthquake focus occurrence, located close to the region in question, point to a high seismic hazard.*

Keywords: *neotectonics, earthquakes, magnitude, earthquake intensity, seismic hazard.*

Район мостового перехода через р. Селенгу в геоморфологическом отношении расположен в пределах Селенгинского среднегорья. Его рельеф представляет собой чередование хребтов со сглаженными водоразделами и межгорными впадинами, ориентированными с запад-юго-запада на восток-северо-восток. Горы расположены в высотном поясе от 800 до 1300 м. Межгорные понижения и долины крупных рек имеют высотные отметки от 450 до 600 м.

Мостовой переход расположен в пределах Субуктуйской впадины северо-восточного простирания, которая с северо-запада ограничена Худжигийн-Нурским хребтом, а с юго-востока – Бургутуйским хребтом. С поверхности впадина выполнена четвертичными отложениями верхнего и современного отделов. Верхний отдел представлен супесями, суглинками, эоловыми закрепленными песками и лёссовидными отложениями. Современный отдел представлен аллювиальными галечниками, песками, суглинками, глинами [1]. В правом борту р. Селенги выше по течению от мостового перехода в р-не с. Хоронхой вскрыты отложения кривоярской свиты мощностью более 100 м. Это свидетельствует о дифференцированных тектонических движениях земной коры: накопление мощной (верхний эоплейстоцен – нижний плейстоцен) песчаной толщи и последующий плейстоцен-голоценовый врез в нее реки Селенги

и ее правого небольшого узкого притока Ботыйской ямы.

Рассматриваемый район характеризуется широким развитием разновозрастных разрывных нарушений [2], входящих в состав Монголо-Охотского структурного линеамента (рис. 1) [3], которые имели большое значение в мезокайнозойской тектонике. Севернее мостового перехода в правом борту р. Селенги на геологической карте показана серия разрывов северо-восточного простирания (Кижингский разлом), которые рассекают среднепротерозойские образования. К северо-востоку они перекрыты неогеновыми андезито-базальтами, трахибазальтами, долеритами и агломератами. К юго-западу они скрыты под аллювиальными отложениями р. Селенги, а далее прослеживаются в виде мигматизированных пород. Крупная зона разлома закартирована восточнее мостового перехода, которая в субширотном направлении прослеживается от пос. Усть-Кяхта к востоку. Она широкой, в 2–3 км, полосой прослеживается в виде катаклазитов и милонитов гнейсов и зеленых ортосланцев.

Наиболее молодыми разломами района являются сбросы северо-западного простирания, заложение которых произошло в конце мезозоя – начале кайнозоя. Образование молодых разломов связано с формированием современного рельефа земли. С ними многие исследователи связывают заложение многих долин рек и, в частности, р. Селенги. Разломы по долинам рек погребены под четвертичными отложениями и хорошо фиксируются аэромагнитной съемкой масштаба 1:200 000 [4]. Как древние обновленные разломы, так новейшие разломы четко устанавливаются на карте современного рельефа.

По поводу развития речной сети Селенгинского среднегорья существует несколько мнений. Последние данные свидетельствуют о том, что речная сеть имеет древнее заложение и сохраняет его в настоящее время [5, 6]. Развитие рельефа в новейший тектонический этап обусловлено региональным полем напряжений сжатия, ориентированном в северо-западном и юго-восточном направлениях [3] (см. рис. 1). Именно поэтому общий структурный план рассматриваемой территории ориентирован в северо-восточном направлении. Поэтому же разломы северо-западного простирания формируются в условиях растяжения верхних частей земной коры в виде сбросов. Новейшие тектонические движения в Селенгинском среднегорье активизировались в начале эоплейстоцена. В это время горные хребты испытывали поднятия, а р. Селенга и ее основные притоки (рр. Хилок, Чикой, Джида, Орхон и др.) врезались в них, образуя целую серию долин прорыва – антецедентных ущелий. В частности, р. Селенга ниже по течению от мостового перехода прорезает Худжигийн-Нурский хребет, образуя антецедентную долину. Следовательно, речная сеть Селенгинского среднегорья древнее современных хребтов и межгорных впадин. Т. е. образование хреб-

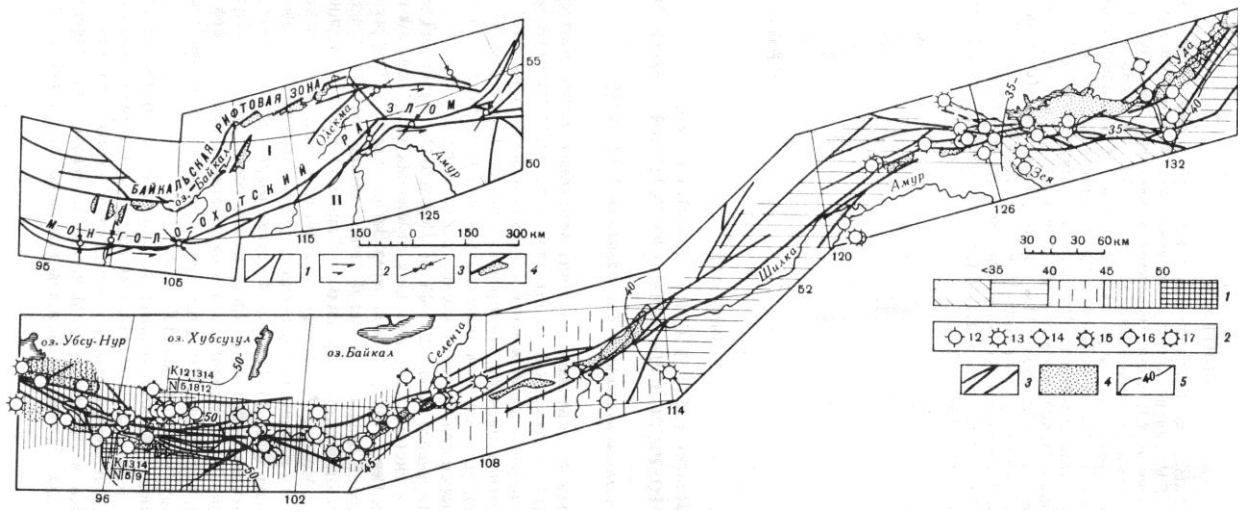


Рис. 1. Схема глубинного строения и эпицентров сильных землетрясений в зоне Монголо-Охотского линеамента.
1 – мощность земной коры (км); 2 – эпицентры сильных землетрясений по геологическим и инструментальным данным и их энергетический класс (в табличках на схеме указаны энергетический класс (К) и число (N) сильных землетрясений на локальном участке); 3 – основные разломы зоны линеамента; 4 – кайнозойские отложения приразломных впадин; 5 – изолинии глубины до поверхности Мохо (км).
На врезке – схема динамики земной коры в зоне Монголо-Охотского линеамента (I – Байкало-Становой и II – Монголо-Аргуно-Бурейнский геоблоки): 1 – глубинные разломы; 2 – направление горизонтальных движений по разломам (длина вектора условно отражает величину смещений); 3 – ориентировка осей напряжений по инструментальным данным; 4 – впадины Байкальской рифтовой зоны и Прихубсугулья [3]

тов и впадин происходило на общем фоне врезания древних долин [5].

Современные морфоструктуры Селенгинского среднегорья созданы в результате деформации земной коры в течение неогена и четвертичного периода в результате пластических и хрупких деформаций [7], однако Западное Забайкалье вступило в фазу неотектонического развития в начале плиоцена, когда новейшие движения приобрели наибольший размах во всех горных областях Южной Сибири [5].

Началу неотектонической активизации (до плиоцена) в Селенгинском среднегорье предшествовал период относительного тектонического покоя. Вследствие этого здесь сформировалась древняя кора выветривания каолинитового и монтмориллонитового типов.

В плиоцене происходит общее воздымание территории, вследствие которого отмечалось повсеместное врезание рек с образованием цокольных террас высотой 100–140 м и более [5]. Позднее в начале эоплейстоцена общее поднятие территории начало испытывать дифференцированные движения земной коры, которое сопровождалось образованием современных горных хребтов и межгорных впадин. В течение верхнего эоплейстоцена и нижнего плейстоцена в результате прогибания многих впадин в них накопились мощные (более 100-150 м) толщи рыхлых отложений. В конце нижнего плейстоцена Селенгинское среднегорье вновь испытывает общее поднятие, в результате чего реки врезаются в мощную толщу песков.

В верхнем плейстоцене в результате колебательных движений земной коры по долинам рек на рассматриваемой территории образуются разновысотные террасы. В голоцене формируются аллювиальные пойменные отложения.

Данные о плейстоцен-голоценовых тектонических движениях в Селенгинском среднегорье могут свидетельствовать о том, что и в районе мостового перехода через р. Селенгу происходили деформации земной коры, которые вполне вероятно продолжаются и в настоящее время, о чем свидетельствуют данные по сейсмичности территории.

Сейсмическая опасность района

Несмотря на то, что на карте эпицентров землетрясений за последние 50 лет (рис. 2) очагов сильных землетрясений непосредственно в районе мостового перехода не отмечено, сейсмическая опасность его высока. На рис. 3-7 приведены макросейсмические данные по некоторым землетрясениям, которые располагались в пределах Селенгинского среднегорья и заметно проявились на участке мостового перехода.

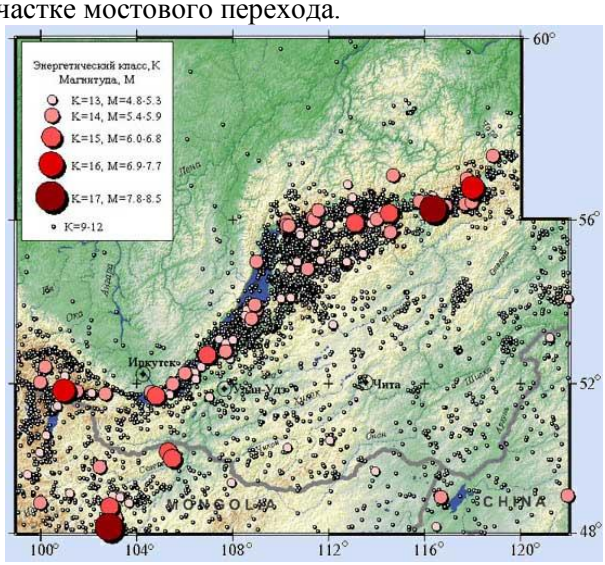


Рис. 2. Карта эпицентров землетрясений за период с 1950 по 2003 гг

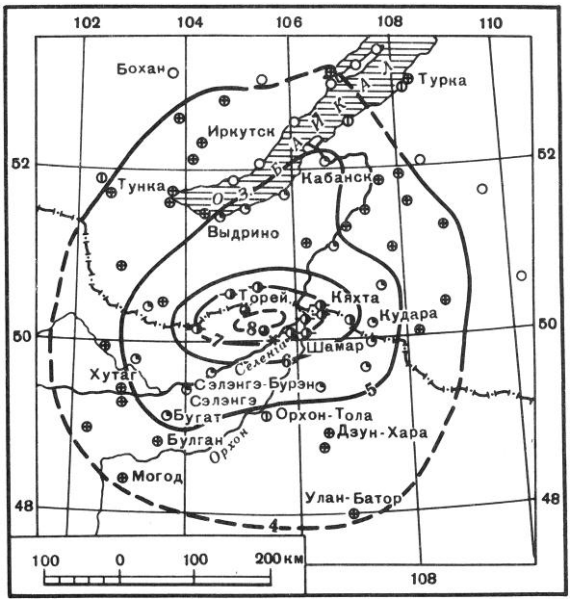


Рис. 3. Схема изосейст Бутэлийского (Кяхтинского) землетрясения 6 февраля 1957 г. Условные обозначения см. далее на рис. 5

Так при Бутэлийнском (Кяхтинском) землетрясении 06.02.1957 г. с M=6,5, K=15, эпицентр которого располагался на севере Монголии и был приурочен к Селенгинскому разлому (рис. 3, 4), интенсивность сейсмических сотрясений в населенных пунктах, расположенных в Селенгинском среднегорье (Торее, Петропавловке, Кяхте, Чикое, Алтан-Булаке, достигала 6-7 баллов [8, 9, 10].

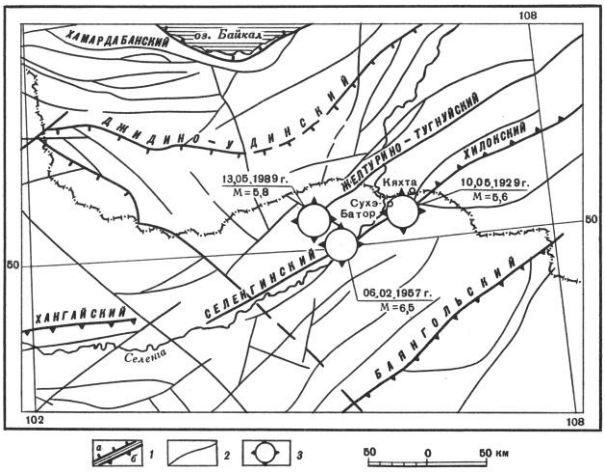


Рис. 4. Схема разрывной тектоники района землетрясения 13 мая 1989 г. Составлена по [2]. Условные обозначения: 1 – главные разрывные нарушения (а – сбросы, б – взбросы); 2 – прочие разрывы; 3 – эпицентры сильных землетрясений с указанием даты и магнитуды [10]

При Могодском землетрясении 05.01.1967 г. с M=7,8, K=17, эпицентр которого располагался в Центральной Монголии (рис. 5), интенсивность сотрясений в районе мостового перехода через р. Селенгу и в близлежащих населенных пунктах достигала 6 баллов [9].

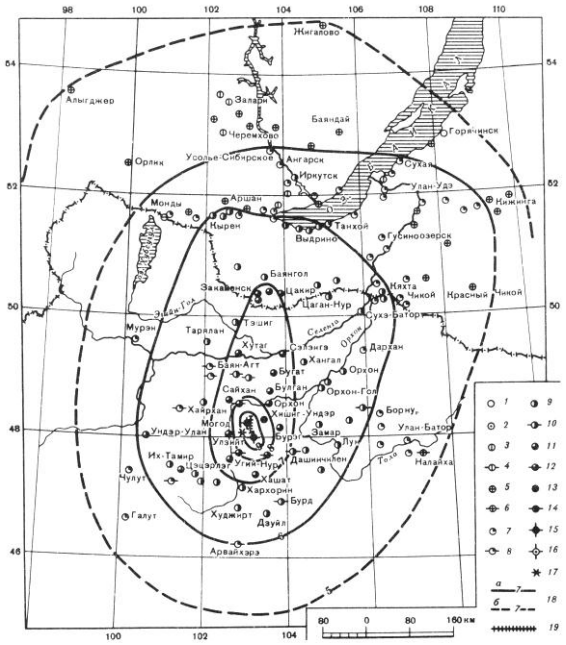


Рис. 5. Схема изосейст Могодского землетрясения 5 января 1967 г. Условные обозначения: 1-16 – пункты установленной балльности по шкале MSK-78: 1 – не ощущалось; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 3-4; 5 – 4; 6 – 4-5; 7 – 5; 8 – 5-6; 9 – 6; 10 – 5-7; 11 – 7; 12 – 7-8; 13 – 8; 14 – 8-9; 15 – 9; 16 – более 9; 17 – инструментальный эпицентр; 18 – линии изосейст (а – установленные, б – предполагаемые); 19 – сейсмотектонические дислокации. [9]

При Тарбагатайском землетрясении 02.10.1980 г. с M=5,0, K=13, эпицентр которого находился севернее мостового перехода в районе оз. Гусиного, сотрясениями различной (от 4 до 6 баллов) интенсивности была охвачена значительная территория Селенгинского среднегорья (рис. 6). В районе мостового перехода сила землетрясения достигала 4 баллов [11].

При Кяхтинском землетрясении 13.05.1989 г. с M=5,8, K=14,5, эпицентр которого находился в том же районе, что и землетрясения 1929 и 1957 гг., сила сотрясений в районе мостового перехода и близлежащих населенных пунктах достигала 6-7 баллов (рис. 7). Очаг землетрясения, по-видимому, был приурочен к пересечению поперечного (северо-западного) к Селенгинскому и Желтурино-Тугнуйским разломам (см. рис. 1) [10, 12].

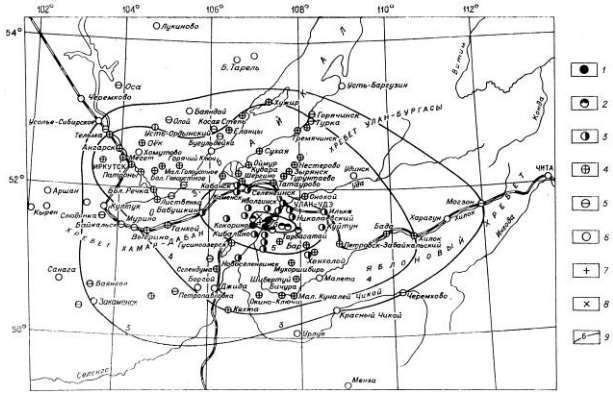


Рис. 6. Схема изосейст Тарбагатайского землетрясения 2 октября 1980 г. Условные обозначения: интенсивность сотрясения в баллах: 1 – 7, 2 – 6, 3 – 5, 4 – 4, 5 – 3, 6 – не ощущалось, 7 – эпицентр по макросейсмическим и 8 – по инструментальным данным, 9 – изосейсты [11]

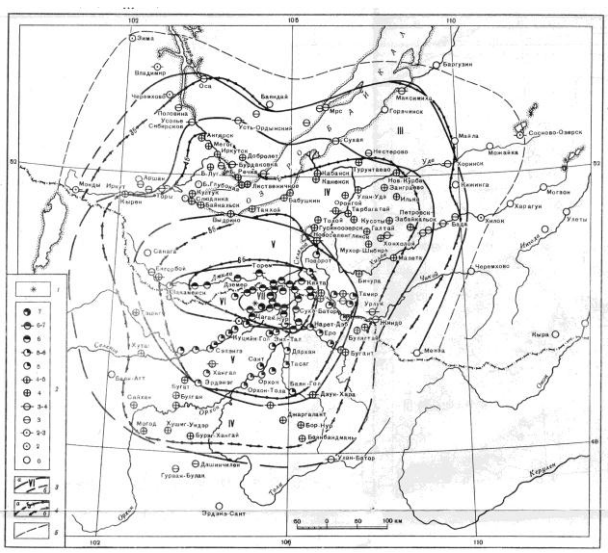


Рис. 7. Схема изосейст Кяхтинского землетрясения 13 мая 1989 г. 1 – инструментальный эпицентр; 2 – балльность; 3 – достоверная (а) и предполагаемая (б) изосейста и значение балльности изосеймального района (по первому способу интерпретации); 4 – достоверная (а) и предполагаемая (б); 5 – [10]

Наконец, эпицентр последнего ощутимого землетрясения 18.02.2006 г. с К = 12,9 располагался в Селенгинском среднегорье в непосредственной близости от мостового перехода. В табл. 1 приведены макросейсмические данные, зафиксированные на различных расстояниях от эпицентра.

Таблица 1

Макросейсмические данные о землетрясении 18 февраля 2006 г. в 01^h52^m ($К_Р$=12.9)

№ п/п	Пункт	Δ, км	I, баллы
1	Наушки	55	4-5
2	Оёр	43	4
3	Нижний Торей	51	4
4	Чикой	110	4
5	Закаменск	150	4
6	Шартыкей	51	3-4
7	Хулдат	54	3-4
8	Улекчин	80	3-4
9	Усть-Киран	104	3-4
10	Холтосон	147	3-4
11	Михайловка	88	3
12	Жиндо	189	3
13	Иркутск	237	3
14	Гусиное Озеро	116	2

Сейсмическая опасность района мостового перехода определяется не только землетрясениями, эпицентры которых располагались в непосредственной близости от него, но и транзитными сотрясениями, от очагов сильных землетрясений, отстоящих на десятки и сотни километров от него. Ниже приводятся данные о некоторых из таких землетрясений, которые с различной степенью ощутимости проявились в районе мостового перехода (табл. 2).

Кроме этого, степень сейсмической опасности рассчитывается эмпирически с использованием палеосейсмогеологических данных и коэффициентов затухания сейсмических волн с расстоянием. Ближайшими к мостовому переходу через р. Селенгу зонами ВОЗ (возникновения очагов землетрясений), выделенными по палеосейсмогеологическим и структурно-тектоническим данным, являются Восточно-Саянская с M_{max} =8,0 (150 км от мостового перехода), Тункинская, M_{max} =7,5 (170 км), Морская, M_{max}=7,5 (100 км), Селенгинская, М=6,5 (125 км), Хамбинская (Гусиноозерская), М=6,5 (40 км), Темникская, М=6,5 (100 км), Кижингская, М=6,0 (10 км), Бусэйнгольская, М=7,5 (100 км) [16].

Используя макросейсмическое уравнение I=1.5M–Slgr+C [17], характеризующее снижение сейсмической балльности с увеличением эпицентрального расстояния, рассчитанная вероятная интенсивность землетрясений из вышеуказанных зон ВОЗ для мостового перехода через р. Селенгу может достигать 8 баллов.

Таким образом, по данным о сильных земле-

Таблица 2

Интенсивность сотрясений в районе мостового перехода при землетрясениях на территории Юго-Восточной Сибири и Монголии

Дата	**Интенсивность в районе перехода в баллах MSK-64**	**Характеристика очага**	**Расстояние от эпицентра, км**	**Примечания** (литературные источники)
1829, 8 марта	7-8	-	200	[13]
1862, 12 января	7 (?)	10-11 баллов	210	Цаганское землетрясение
1885, 12 января	3	6 баллов	250	[13]
1903, 26 ноября		М=6,5, 9 баллов	200	Байкальское землетрясение [13]
1905, 9 июля	4-5	М=8.4	550	Таннуольское землетрясение [14]
1905, 23 июля	5	М=8.7	550	Таннуольское землетрясение [14]
1929, 10 мая	6			[8]
1934, 15 октября	5	М=6, 8 баллов	280	Чикойское землетрясение [13]
1957, 6 февраля	7	8 балов	85	Кяхтинское или Бутэлийское землетрясение [8, 9]
1959, 29 августа	5	М=6.8, 9 баллов	230	Среднебайкальское землетрясение [13]
1967, 5 января	6	М=7,5, 10 баллов	377	Могодское землетрясение [14]
1980, 2 октября	4	7 баллов	135	Тарбагатайское землетрясение [11]
1989, 13 мая	6	7 баллов	85	[10]
1999, 25 февраля	4	М=6,0	150	Южно-Байкальское землетрясение [15]
2006, 18 февраля	4-5	К=12,9	55	
2008, 27 августа	4-5	М=6,2, 8 баллов	200	

трясениях как местных очагов, так и удаленных на различные расстояния, а также палеосейсмогеологических и структурно-тектонических данных сейсмическая опасность района мостового перехода через р. Селенгу устанавливается в 8 баллов.

По геолого-геофизическим данным здесь выделяется линеаментная зона ВОЗ (возникновения очагов землетрясений) с М=6,5 [18], в результате чего на последних Картах общего сейсмического районирования территории РФ (ОСР-97, Карты А, В, С) рассматриваемый район характеризуется 8-8-9-балльной сейсмичностью.

В табл. 3 приведены данные расчетной сейсмической интенсивности в ближайших к мостовому переходу населенных пунктах [19].

Заключение

Таким образом, есть все основания полагать, что и для мостового перехода расчетная сейсмическая интенсивность равна 8, 8 и 9 баллам шкалы MSK-64 согласно Картам ОСР-97 (А, В, С).

Данные по новейшей геодинамике, а также макросейсмические сведения о сильных землетрясениях свидетельствуют о том, что в районе мостового перехода постоянно отмечаются тектонические деформации и неоднократно отмечались сейсмические сотрясения силой до 8 баллов и что сам мостовой переход за время его эксплуатации также неоднократно подвергался сейсмическим воздействиям.

Анализ современной геодинамики и сейсмической опасности в зоне мостового перехода через р. Селенгу свидетельствуют о том, что не исключена вероятность деформаций опор моста, которые за время эксплуатации моста с 40-х годов прошлого столетия могли привести к перераспределению усилий и напряжений в основных несущих конструкциях моста. Тем более что при проектировании и строительстве мост рассчитывался с запасом на 8 баллов, а не на 9, как это следует из последней карты ОСР территории РФ (Карта С).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новиков В. А., Новикова А. Н. Геологическая карта СССР. Масштаб 1:200 000. М-48-XVII / ред. П. И. Налетов. М. : ГУГиК ГГК СССР, 1964.
2. Карта разломов Юга Восточной Сибири. Масштаб 1:1 500 000 / В. К. Александров, А. Н. Дёмин, Т. В. Мордовская, А. П. Таскин, П. М. Хренов, С. П. Лебедев ; ред. П. М. Хренов ; М-во геологии СССР, ВОСТСИБНИИГГ и МС. Иркутск, 1982.
3. Николаев В. В. Сейсмичность в связи с динамикой и глубинным строением зоны Монголо-Охотского линеамента // Докл. АН СССР. 1986. Т. 291, № 3. С. 661–665.
4. Новиков В. А., Новикова А. Н. Геологическая карта СССР. Масштаб 1:200 000. М-48-XVII ; Объяснительная записка / ред. П. И. Налетов. М. : Недра, 1965. 72 с.
5. Базаров Д. Б. Четвертичные отложения и основные этапы развития рельефа Селенгинского среднегорья / отв. ред. С. А. Гурулев. Улан-Удэ : Бурят. кн. изд-во, 1968. 167 с.
6. Базаров Д. Б. Кайнозой Прибайкалья и Западного Забайкалья / отв. ред. Н. А. Логачев. Новосибирск : Наука, 1986. 182 с.
7. Флоренсов Н. А. Кайнозойская тектоника, геоморфология и история геологического развития // Геология СССР. Бурятская АССР. М. : Недра. 1964. Т. XXXV С. 424–454.
8. Голенецкий С. И., Пшенников К. В. О землетрясении 7 февраля 1957 г. в Северной Монголии // Бюлл. Совета по сейсмологии № 10. М. : Изд-во АН СССР, 1960. С. 98–107.
9. Землетрясения и основы сейсмического районирования Монголии / С. Д. Хилько, Р. А. Ку-

Таблица 3

Список населенных пунктов и расчетная сейсмическая интенсивность в них в р-не мостового перехода через р. Селенгу

Населенные пункты	Расчетная сейсмическая интенсивность в баллах шкалы MSK-64 для средних грунтовых условий и трех степеней сейсмической опасности – А (10%), В (5 %), С (1 %) в течение 50 лет		
	Карты ОСР-97		
	А	В	С
Джида	8	8	9
Дырестуй	8	8	9
Кяхта	8	8	9
Наушки	8	8	9
Селендума	8	8	9
Усть-Кяхта	8	8	9
Хоронхой	8	8	9

рушин, В. М. Кочетков и др. ; отв. ред. : В. П. Солоненко, Н. А. Флоренсов. М. : Наука, 1985. 225 с.
10. Голенецкий С. И., Николаев В. В., Курушин Р. А. Землетрясение 13.05.1989 г. на границе с Монголией // Землетрясения в СССР в 1989 году. М. : Наука. 1993. С. 101–112.
11. Сейсмичность района Оронгойских впадин и землетрясение 2 октября 1980 г. в Западном Забайкалье / Голенецкий С. И., Демьянович М. Г., Семенов Р. М. // Геология и геофизика. 1982. № 9. С. 45–54.
12. О макросейсмическом обследовании землетрясения в Южном Прибайкалье / Николаев В. В., Семенов Р. М., Зеленков П. Я. // Исследования по созданию научных основ прогноза землетрясений в Сибири. Иркутск : ИЗК СО АН СССР, 1989. С. 11–12. – (Оперативная информация ; вып. 3).
13. Сейсмическое районирование Восточной Сибири и его геолого-геофизические основы / отв. ред. В. П. Солоненко. Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1977. 304 с.
14. Сейсмотектоника и сейсмичность юго-восточной части Восточного Саяна / отв. ред. В. П. Солоненко. Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1975. 135 с.
15. Геодинамическая обстановка в районе Южно-Байкальского землетрясения 25.02.1999 г. и его характеристика / Ружич В. В., Семенов Р. М., Мельникова В. И. // Геология и геофизика. 2002. Т. 43, № 5. С. 470–483.
16. и др. Современная геодинамика: сейсмотектоника, прогноз землетрясений, сейсмический риск (фундаментальные и прикладные аспекты) / Леви К. Г., Хромовских В. С., Кочетков В. М., Николаев В. В., Семенов Р. М. // Литосфера Центральной Азии. Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1996. С. 150–182.
17. Голенецкий С. И. Сейсмичность Байкальской рифтовой области // Континентальный рифтогенез. М. : Сов. радио, 1977. С. 150–182.
18. Комплект карт сейсмического районирования территории Российской Федерации. Масштаб 1:8 000 000 / ред. : В. Н. Страхов, В. И. Уломов. М. : ОИФЗ РАН, 1999.
19. СНиП II-7-81. Строительные нормы и правила. Строительство в сейсмических районах. М. : Госстрой России. 2001. 44 с.

621.311

Соколов Виталий Юрьевич,
аспирант ИрГУПС, тел. 8-902-566-94-60

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЖЕСТКИХ СИММЕТРИЧНЫХ ТОКОПРОВОДОВ

V.Y. Sokolov

MODELING OF A RIGID SYMMETRICAL WIRING SYSTEM

Аннотация. *Моделирование режимов систем электроснабжения энергоемких производств, построенных с использованием жестких симметричных токопроводов, возможно эффективно осуществлять на основе фазных координат с использованием современных компьютерных технологий визуального моделирования.*

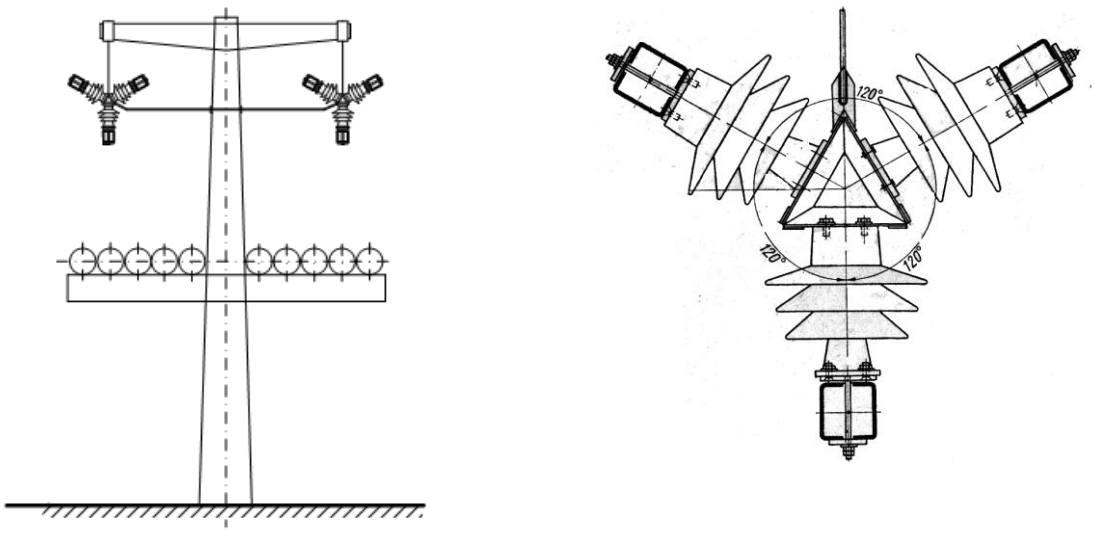
Моделирование показало, что при совместной прокладке токопровода с технологическими трубопроводами необходим учет последних при расчетах как симметричных, так и несимметричных режимов.

Ключевые слова: *системы электроснабжения, моделирование токопроводов.*

Abstract. *Based upon the developed method of the modeling system regimes' power-consuming industries, which are constructed with the use of a rigid symmetrical wiring system, it is possible to effectively implement visual modeling on the basis of phased coordinates, using the modern computer technologies system of the visual modeling of the power supply of difficult systems.*

It's been revealed, based upon the results of modeling, that under joint wire system laying with technological piping, it is essential to have an account of the piping when the calculations of symmetrical and asymmetrical regimes are conducted.

Keywords: *electric systems, rigid symmetrical wiring system.*



а) б)

Рис. 1. Жесткий токопровод:
а) – совместная прокладка токопровода и металлических труб; б) – сечение фазы

Введение. В системах электроснабжения (СЭС) энергоемких промышленных предприятий нашли широкое применение жесткие симметричные токопроводы, выполненные шинами корытного профиля, например, 2(100х45х6) [1]. Вследствие значительных рабочих токов имеет место существенное электромагнитное влияние между отдельными токоведущими частями устройства. Кроме того, часто используется совместная прокладка токопровода и технологических трубопроводов (рис. 1), что приводит к усложнению распределения электромагнитного поля. Указанные факторы требуют создания методов и компьютерных технологий для моделирования режимов СЭС, включающих мощные токопроводы.

Постановка задачи. Методы определения режимов СЭС, построенных на базе симметричных токопроводов, могут быть реализованы на основе фазных координат с использованием решетчатых схем замещения [2]. На основе этих методов и алгоритмов в ИрГУПС разработан программный комплекс FAZONORD, позволяющий рассчитывать режимы СЭС с многопроводными линиями электропередачи (ЛЭП) различного конструктивного исполнения, включающими до 100 проводов. Комплекс построен с использованием современных технологий визуального моделирования, что существенно повышает эффективность расчетов сложных систем электроснабжения. Следует отметить, что программный комплекс FAZONORD дает возможность достаточно точного учета влияния различных металлических конструкций, например трубопроводов, проложенных параллельно с ЛЭП. При этом трубопровод может быть смоделирован набором заземленных проводов. В настоящей статье обсуждаются результаты определения симметричных и несимметричных режимов СЭС, схема которой приведена на рис. 2. Расчетная схема, выполненная средствами комплекса FAZONORD, представлена на рис. 3.

Результаты моделирования. Результаты расчетов симметричных и несимметричных режимов представлены в табл. 1, 2 и на рис. 4, 5.

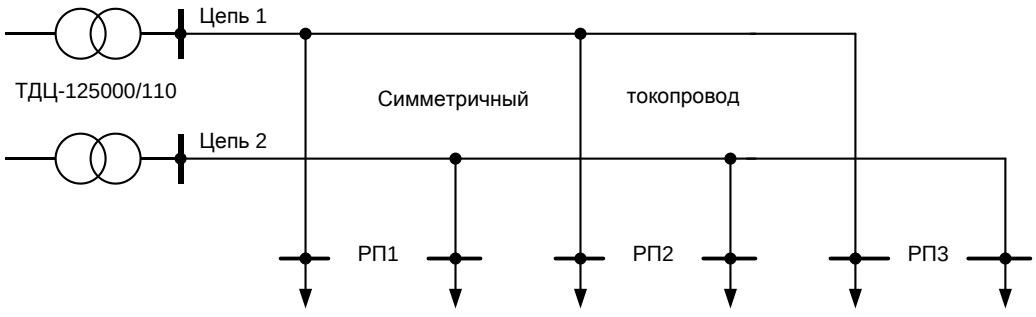


Рис. 2. Схема СЭС

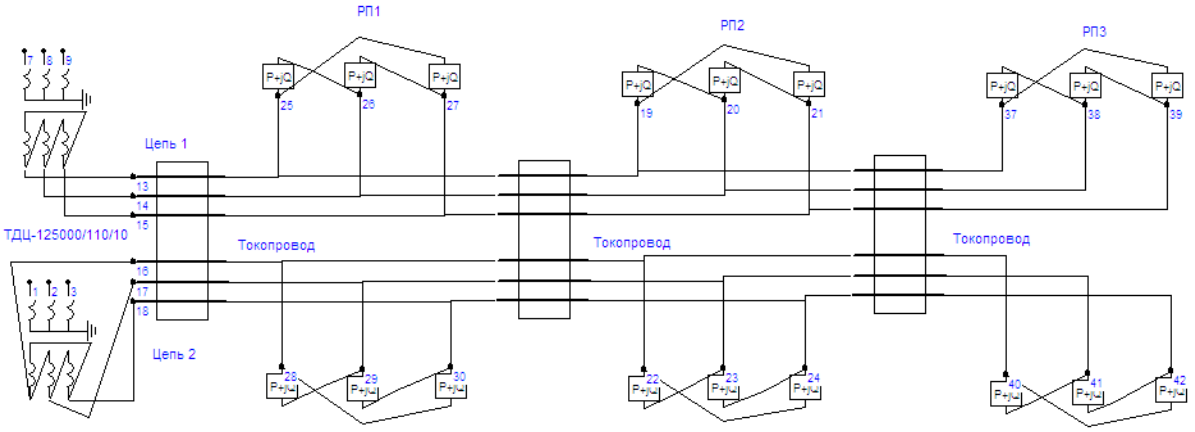


Рис. 3. Расчетная схема

Таблица 1

Фазные напряжения и коэффициенты несимметрии в режиме симметричных нагрузок

РП	Отсутствие трубопровода				Наличие трубопровода			
	K_{2U}, %	U_A, кВ	U_B, кВ	U_C, кВ	K_{2U}, %	U_A, кВ	U_B, кВ	U_C, кВ
Цепь 1								
РП1	0.70	6.03	4.92	5.30	0.71	6.1	4.73	5.46
РП2	1.10	5.76	4.71	5.07	1.11	5.82	4.53	5.21
РП3	1.25	5.66	4.66	5.01	1.26	5.74	4.47	5.15
Цепь 2								
РП1	0.67	4.9	5.30	6.08	0.67	5.04	5.11	6.15
РП2	0.98	4.7	5.16	5.87	0.99	4.84	4.97	5.93
РП3	1.12	4.62	5.10	5.79	1.13	4.76	4.92	5.84

Таблица 2

Фазные напряжения и коэффициенты несимметрии в режиме несимметричных нагрузок

РП	Отсутствие трубопровода				Наличие трубопровода			
	K_{2U},%	U_A, кВ	U_B, кВ	U_C, кВ	K_{2U},%	U_A, кВ	U_B, кВ	U_C, кВ
Цепь 1								
РП1	14.64	5.41	4.71	3.93	14.62	5.48	4.54	4.10
РП2	28.76	4.77	4.42	2.97	28.72	4.86	4.29	3.10
РП3	29.12	4.62	4.35	2.96	29.08	4.70	4.22	3.07
Цепь 2								
РП1	11.63	4.61	4.08	5.470	11.50	4.72	3.91	5.53
РП2	22.12	4.35	3.3	4.893	22.00	4.45	3.17	4.91
РП3	22.24	4.28	3.25	4.761	22.10	4.38	3.12	4.77

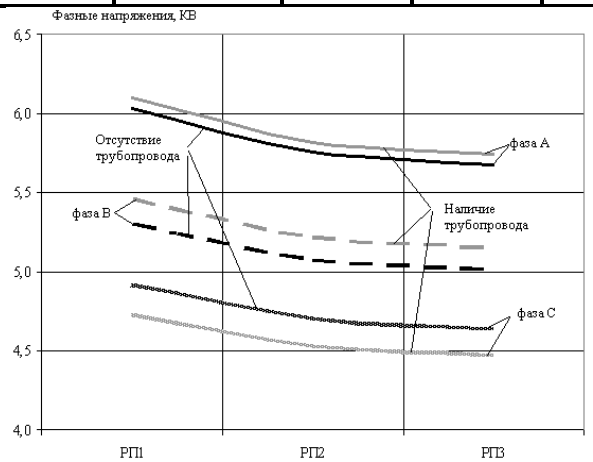


Рис. 4. Фазные напряжения в режиме симметричных нагрузок

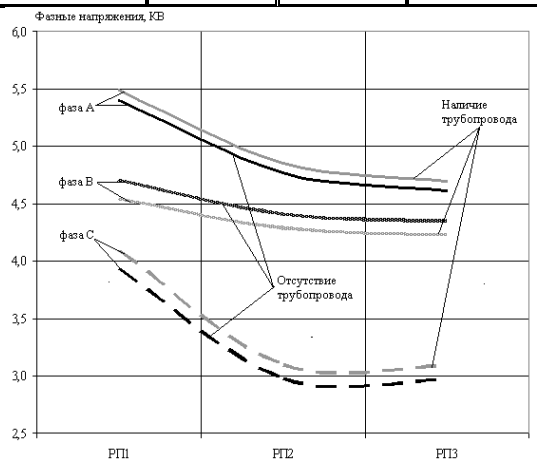


Рис. 5. Фазные напряжения в режиме несимметричных нагрузок

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что при расчете режимов СЭС требуется учет взаимных электромагнитных влияний между токоведущими частями и заземленными конструкциями, который невозможно выполнить, используя традиционное однолинейное представление. Такой учет особенно актуален при определении несимметричных режимов. Следует отметить, что наличие заземленного трубопровода влияет на результаты расчета режима. При этом в симметричном режиме наличие заземленной магистрали увеличивает коэффициенты несимметрии K_{2U} по обратной последовательности, а в режиме несимметричных нагрузок наблюдается противоположный эффект.

1. Моделирование режимов систем электроснабжения энергоемких производств, построенных с использованием жестких симметричных токопроводов, возможно эффективно осуществлять на основе фазных координат с использованием современных компьютерных технологий визуального моделирования сложных систем электроснабжения.

2. При прокладке токопровода совместно с технологическими трубопроводами необходим учет последних при расчетах как симметричных, так и несимметричных режимов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Семчинов А. М. Токопроводы промышленных предприятий. Л. : Энергия, 1972. 200 с.
2. Закарюкин В. П., Крюков А. В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск : Изд-во Иркут. ун-та, 2005. 273 с.

УДК 656.224

Мельниченко Олег Валерьевич,
к. т. н., доцент кафедры «Электроподвижной состав»,
Иркутский государственный университет путей сообщения, тел. (3952) 63-83-66, e-mail: melnichenko@irgups.ru

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОВОЗОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В ЗОНЕ ВЫСОКИХ СКОРОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ

O.V. Melnichenko

ENHANCE EFFICIENT TO WORK OF RECUPERATIVE BRAKING IN ALTERNATING CURRENT LOCOMOTIVES IN ZONE OF HIGH-SPEED TRAFFIC

Аннотация. *В статье проанализирована работа электровоза переменного тока при типовом и предлагаемом способах управления тиристорным преобразователем в режиме рекуперативного торможения. В результате показано, что применение предлагаемого способа значительно повышает возврат электроэнергии в тяговую сеть.*

Ключевые слова: электровоз, рекуперативное торможение, выпрямительно-инверторный преобразователь (ВИП), тяговая сеть, электроэнергия, угол регулирования напряжения.

Summary. *This article considers the work of the alternating current electric locomotive when using the model and offered method of control thyristor converter in the mode of recuperative braking. As a result it is shown that the application of the offered way considerably raises electric power recovery in the traction network.*

Keywords: *locomotive, recuperative braking, rectifier-inverter converter (RIC), traction network, electric power, angle of the voltage control.*

Интенсивное применение рекуперативного торможения на электровозах переменного тока позволяет добиваться значительной экономии электроэнергии. Эта экономия, прежде всего, достигается при поддержании требуемой скорости движения поездов на уклонах.

Значительным недостатком современных электровозов переменного тока режима рекуперативного торможения являются низкие энергетические показатели. Коэффициент мощности ($К_м$) электровоза в режиме рекуперативного торможения в эксплуатации не превышает 0,65, в результате этого – низкая эффективность его энергосбережения [1].

В настоящее время актуальной является проблема повышения энергетических показателей электровозов в режиме рекуперативного торможения, так как она относится к его ресурсосберегающим и регулировочным режимам работы, которые снижают эксплуатационные затраты на тягу поездов. Данная проблема особо значима для железнодорожной отрасли, что подтверждают стратегические направления научно-технического развития ОАО «Российские железные дороги» на период до 2015 года («Белая книга» ОАО «РЖД») № 964 от 31 августа 2007 года.

Для выявления одной из причин низкого возврата электрической энергии в контактную сеть современными отечественными электровозами в режиме рекуперативного торможения рассмотрим их упрощённую принципиальную схему. Она содержит тяговый трансформатор Т, имеющий первичную (U_1) и вторичную обмотки, выполненные в виде трёх последовательно соединенных секций, две из которых – на равное напряжение по 315 В (а1 – 1 и 1 – 2), а третья – на двойное напряжение 630 В (2 – х1), как показано на рис. 1. Каждая ветвь ВИП содержит пару последовательно соединённых управляемых плеч тиристоров, а их средам вторичной обмотки трансформатора. Силовая часть ВИП состоит из восьми тиристорных плеч V1 – V8. К плюсовой и минусовой шинам ВИП подключаются через сглаживающий реактор (РС) параллельно соединённые тяговые двигатели электровоза, работающие в генераторном режиме, содержащие якорь (Г1, Г2) и обмотки возбуждения (ОВ1, ОВ2).

В каждую цепь генератора включается блок балластных резисторов (ББР) $r_б$, который служит для выравнивания токов параллельно соединённых тяговых двигателей и обеспечивает устойчивую работу режима рекуперативного торможения [1].

Рекуперативное торможение, применяемое на электровозах переменного тока, включает в себя четыре зоны регулирования выпрямленного напряжения на генераторах с целью регулирования скорости движения электровоза (тормозной силы) путём подачи импульсов управления (β – угол опережения открытия тиристоров, $\alpha_р$ – угол регулирования по фазе) на определённые плечи ВИП.

Для того, чтобы подойти ближе к одной из проблем, снижающей энергетические показатели электровоза, рассмотрим на рисунках 2 и 3 электромагнитные процессы токов и напряжений в цепи постоянного и переменного тока за период.

Эти процессы были получены с измерительно-вычислительного комплекса (ИВК) при проведении эксплуатационных испытаний электровоза серии ВЛ80Р №1829 в типовом режиме рекуперативного торможения на полигоне ВСЖД – филиа-

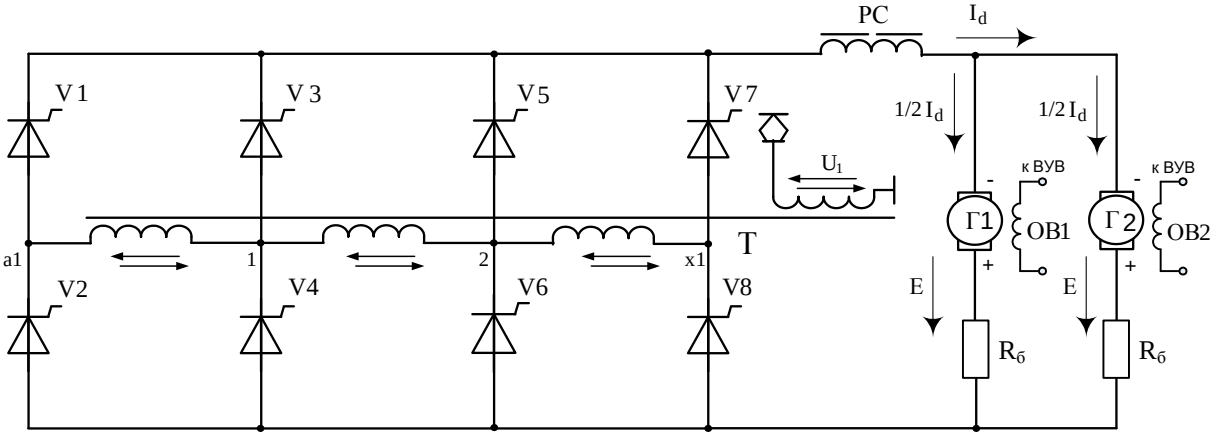


Рис. 1. Упрощённая принципиальная схема современных отечественных электровозов переменного тока в режиме рекуперативного торможения

ние точки подключены к соответствующим выво-

ла ОАО «РЖД».

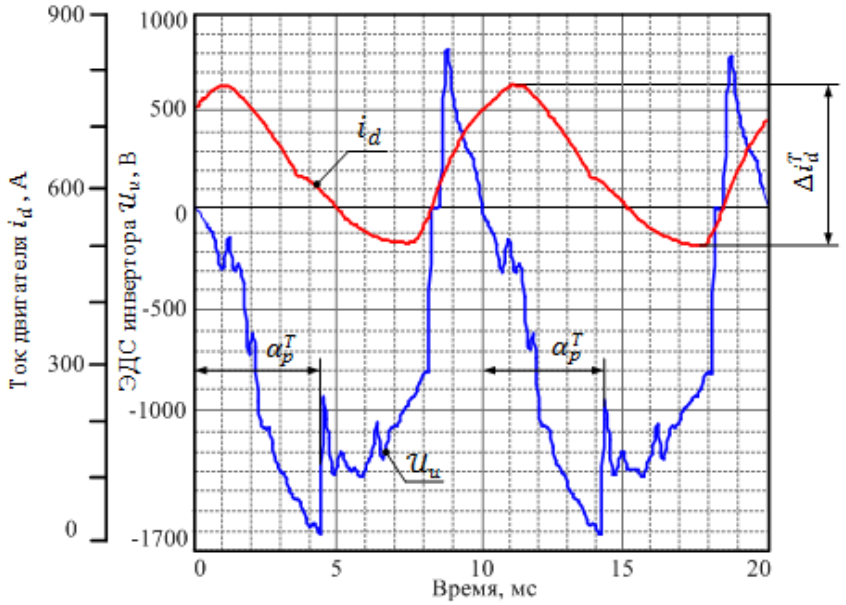


Рис. 2. Диаграммы электромагнитных процессов на 4-й зоне регулирования ЭДС инвертора и тока двигателя при типовом способе управления

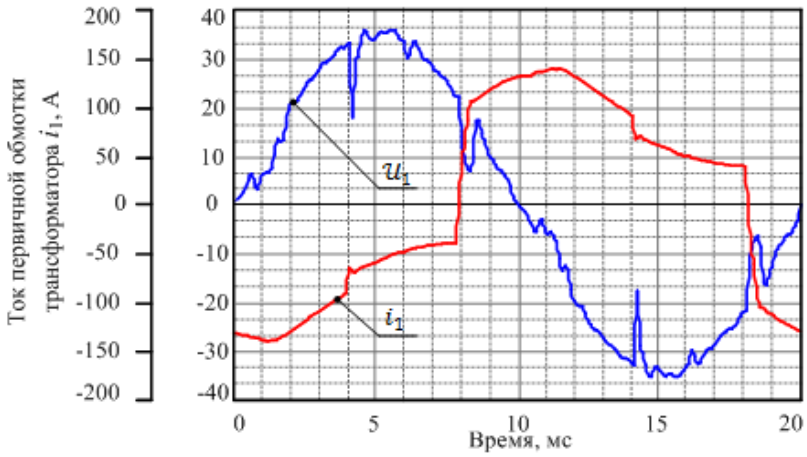


Рис. 3. Форма кривых напряжения контактной сети и тока в первичной обмотке тягового трансформатора секции электровоза при типовом способе управления

В типовом режиме четвёртая зона регулирования ЭДС инвертора ограничивается (сельсин рекуперации) на уровне 3,5 зоны, $\alpha^{т}_{р}$ = 90 эл. град. (рис. 2) [2]. Соответствующая форма кривых напряжения контактной сети и тока в первичной обмотке тягового трансформатора секции электровоза представлена на рис. 3. Это соответствует подключению выводов тягового трансформатора Т (а1 – х1) к генераторам, но секция (а1 – 1) включена на половину своих витков.

Казалось бы, чем больше витков вторичной обмотки тягового трансформатора, тем больше инвертирование электрической энергии в контактную сеть, вырабатываемой генераторами электровоза. Однако такое положение дел продиктовано исключением перенапряжения на генераторах и максимально может составлять на выходе ВИП 1180 В. Всё дело в том, что падение напряжения на ББР при возможном в эксплуатации токе якоря 1000 А составляет примерно 140 В, которое в результате складывается с напряжением вторичной обмотки тягового трансформатора и на выходе ВИП составляет их сумму.

С увеличением скорости движения тормозную силу регулируют, снижая ток возбуждения от 1000 А до минимального, напряжение при этом остаётся неизменным – 3,5 зоны, хотя при снижении тока якоря потери в ББР тоже снижаются, а коэффициент трансформации трансформатора ($К_т$) остаётся неизменным.

По мнению автора, перспективным может являться способ, который бы использовал сигнал обратной связи по току якоря в области высоких скоростей движения (примерно свыше 60 км/ч) и автоматически увеличивал бы фазу открытия тиристоров плеч инвертора электровоза, уменьшая коэффициент трансформации трансформатора.

Для проверки такого предположения рассмотрим несколько формул, характеризующих повышение возврата тока i_1 в контактную сеть электровоза, работающего в режиме рекуперативного торможения при изменении тока якоря, с учётом коэффициента трансформации трансформатора.

С включением в цепь якоря блока балластных резисторов определим падение напряжения на ББР при действии тока якоря по формуле

$$\Delta U^{I_d} = I_d \cdot R_{ББР}, \quad (1)$$

где I_d – ток якоря (рекуперации) ТЭД в режиме генератора;

$R_{ББР}$ – активное сопротивление блока балластных резисторов.

Напряжение на выходе инвертора составит

$$U_и = U_d^{max} - \Delta U^{I_d}, \quad (2)$$

где U_d^{max} – напряжение на выходе инвертора (в зависимости от фазы угла открытия тиристоров).

При этом коэффициент трансформации трансформатора будет равен

$$K_T = \frac{U_1}{U_и}, \quad (3)$$

где U_1 – напряжение первичной обмотки тягового трансформатора.

Тогда возврат тока в контактную сеть равен

$$i_1 = \frac{I_d}{K_T}. \quad (4)$$

Из формул (1–4) видно, что наиболее эффективной по возврату электроэнергии в контактную сеть является более полная четвёртая зона регулирования напряжения инвертора электровоза $U_и$, так как коэффициент трансформации трансформатора снижается. Снижение падения напряжения на ББР при уменьшении тока якоря позволяет повысить напряжение инвертора (1, 2).

Рассмотрим на рисунках 4 и 5 электромагнитные процессы токов и напряжений в цепи постоянного и переменного токов, полученные при проведении эксплуатационных испытаний того же электровоза ВЛ80Р в предлагаемом режиме рекуперативного торможения.

Энергосбережение предлагаемого способа заключается в том, что в зоне высоких скоростей движения при уменьшении тока якоря снижением возбуждения двигателя увеличивается фаза угла регулирования $\alpha^{П}_{р}$ плеч инвертора (рис. 4).

Это осуществляется за счёт разработанного автоматического регулятора, установленного в блок фазового регулирования (БФУ-535) блока управления ВИП (БУВИП-133) (рис. 6) [3].

Особый интерес представляет коэффициент относительной пульсации выпрямленного тока, так как он влияет на к.п.д. и коэффициент мощности электровоза

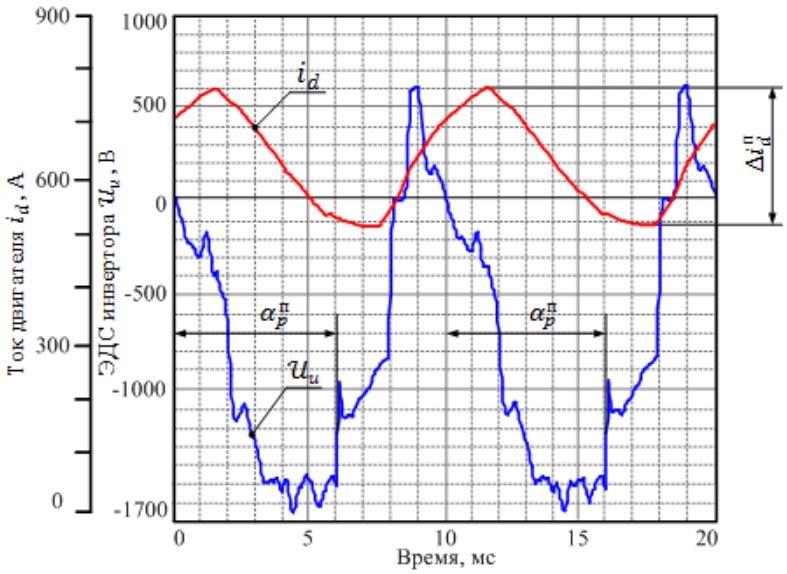


Рис. 4. Диаграммы электромагнитных процессов на 4-й зоне регулирования ЭДС инвертора и тока двигателя при новом способе управления

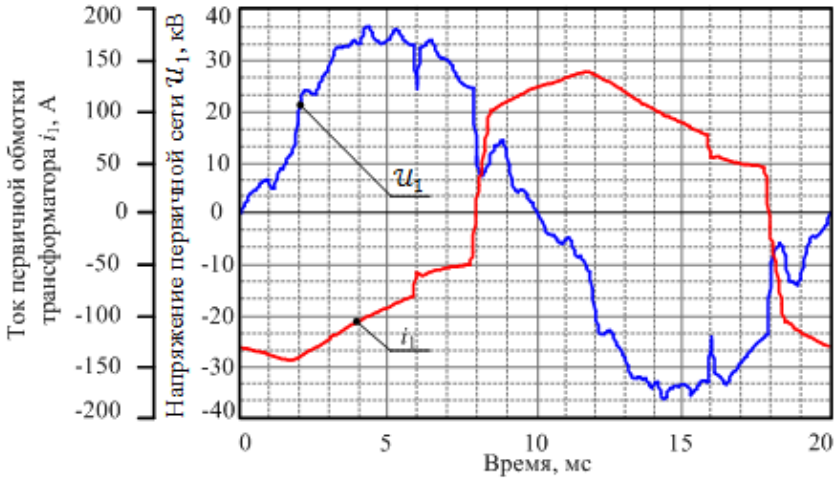


Рис. 5. Форма кривых напряжения контактной сети и тока в первичной обмотке тягового трансформатора секции электровоза при новом способе управления

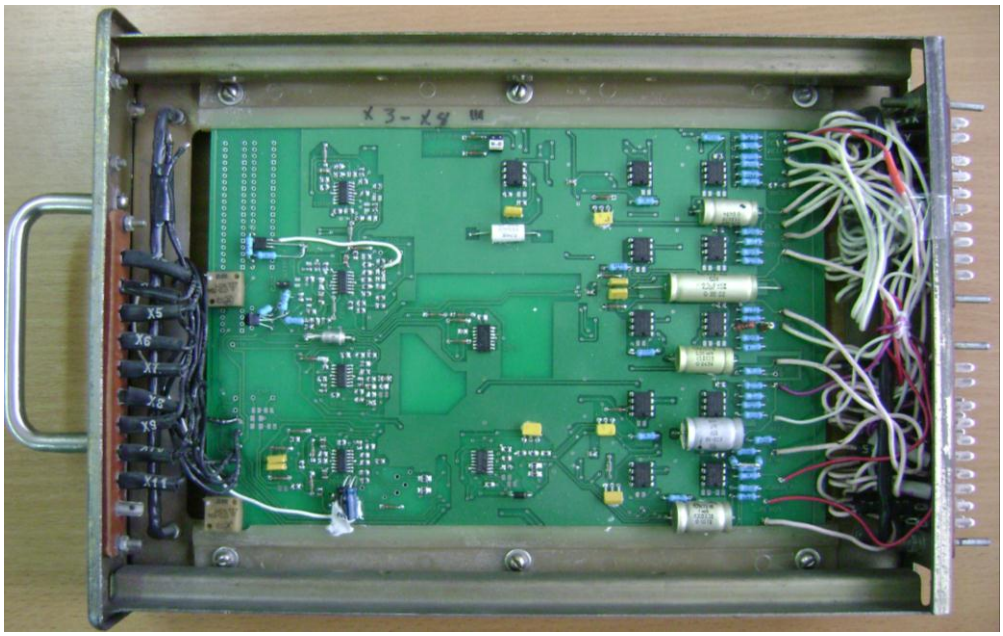


Рис. 6. Модернизированный блок фазового регулирования (БФУ-535М) БУВИП-133

$$K_{no} = \frac{\Delta \imath_d}{\mathrm{I}_d}, \qquad (5)$$

где Δi_d – величина полной пульсации тока, равная разности максимального и минимального значений выпрямленного тока;

I_d – среднее значение выпрямленного тока.

Увеличение степени пульсаций выпрямленного тока приводит к увеличению потерь энергии в активных сопротивлениях всех элементов системы электровоза. Согласно (5) получено, что пульсирующая составляющая тока двигателя $\Delta \imath_d^{\Pi}$ при предлагаемом способе (рис. 4) меньше на 14,6% относительно типового режима управления $\Delta \imath_d^{T}$ (рис. 2). Сравнивая токи в первичной обмотке тягового трансформатора (рис. 5 и 3), видно, что площадь тока при предлагаемом способе больше типового, а сама форма потребляемого тока ближе к синусоидальной. Вышерассмотренные факторы значительно влияют на повышение коэффициента мощности электровоза.

Для следующей оценки повышения энергетических показателей рекуперативного торможения электровозов построены внешние характеристики инвертора на 4-й зоне регулирования. Значения напряжений и тока замерялись во время

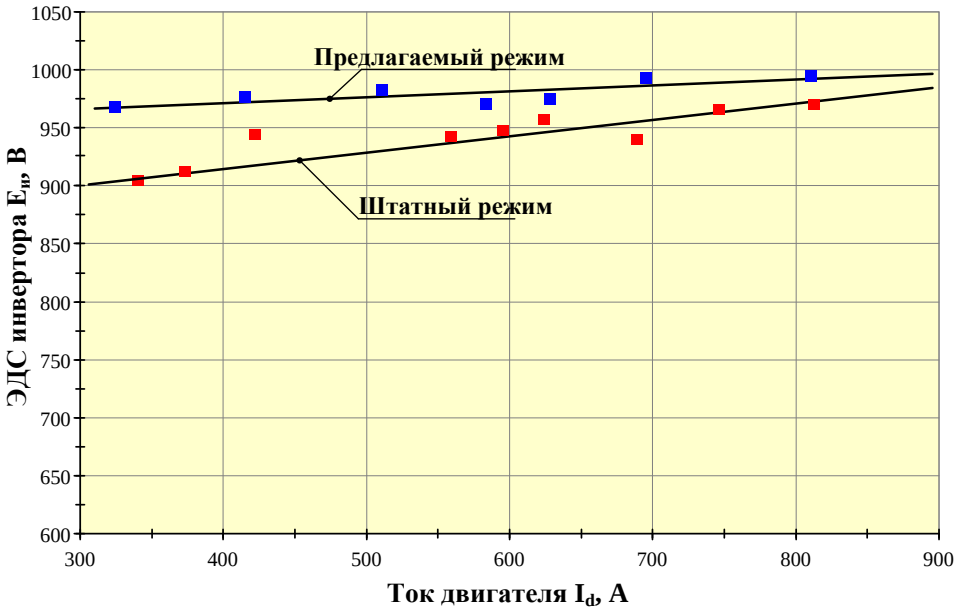


Рис. 7. Внешняя характеристика преобразователя при штатном и предлагаемом режимах рекуперативного торможения

движения электровоза при следовании в штатном и предлагаемом режимах на участке Слюдянка – Улан-Удэ ВСЖД – филиала ОАО «РЖД» (рис. 7).

Из рисунка 7 видно, что предлагаемая внешняя характеристика преобразователя лежит в зоне наибольшей энергетической эффективности, что обусловлено увеличением фазового угла регулирования тиристорных плеч инвертора $\alpha^{п}_{р}$ автоматическим регулятором (рис. 6). В настоящее время таким регулятором оборудованы два электровоза серии ВЛ80Р №1829 и №1849, приписанные к эксплуатационному локомотивному депо Иркутск-Сортировочный ВСЖД – филиала ОАО «РЖД», а также ведётся мониторинг их работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тихменев Б. Н., Кучумов В. А. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями. М. : Транспорт, 1988. 311 с.
2. Капустин Л. Д. Копанев А. С., Лозановский А. Л. Надежность и эффективность электровозов ВЛ80Р в эксплуатации / под ред. Л. Д. Капустина. М. : Транспорт, 1986. 240 с.
3. Электровоз ВЛ85 : руководство по эксплуатации / Б. А. Тушканов, Н. Г. Пушкарев, Л. А. Позднякова. М. : Транспорт, 1995. 480 с.

УДК 338

Краснощек Анатолий Анисимович,
к. э. н., начальник ВСЖД – филиала ОАО «РЖД»
Сольская Ирина Юрьевна,
д. э. н., профессор, зав. кафедрой «Финансы и антикризисное регулирование»
Данилов Владимир Андреевич,
магистрант ИрГУПС
Назаров Сергей Николаевич,
магистрант ИрГУПС

ОЦЕНКА УРОВНЯ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТРАНСПОРТНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ (ОАО «ТРАНСКОНТЕЙНЕР»)

A.A. Krasnoshok, I.U. Solskaya, V.A. Danilov, S.N. Nazarov

THE ESTIMATION OF ECONOMIC SAFETY LEVEL OF TRANSPORT ORGANIZATION (OAO «TRANSCONTAINER»)

Аннотация. *Представлены теоретические предпосылки и методологические подходы к оценке уровня экономической безопасности ОАО «ТрансКонтейнер». Рассмотрены институационные предпосылки формирования модели оценки уровня экономической безопасности и проведен расчет финансовых аспектов* экономической безопасности.

Ключевые слова: *экономическая безопасность, оценка, прогнозирование.*

Abstract. *In the article theoretical preconditions and methodological approaches to the estimation of the OAO economic safety level are presented. Preconditions of formation of economic safety level estimation model are considered and the calculation of economic safety financial aspects is carried out.*

Keywords: *economic safety, estimation, prognosis.*

Из всего многообразия принципов формирования системы интегральной экономической безопасности организации необходимо выделить такие, которые соответствуют предлагаемой трактовке совокупности «частного» и «стороннего» аспекта экономической безопасности, которые предполагают учет возможностей не только «прямого», но и «обратного» влияния состояния системы экономической безопасности.

В то же время необходимо помнить о том, что само по себе понятие экономической безопасности предприятия является **комплексным** и затрагивает практически все функциональные области его деятельности, и при оценке экономической безопасности ряд положений оценки пересекается с отдельными видами деятельности предприятия. Это касается, прежде всего, формулирования стратегических интересов предприятия и их количественной интерпретации. Поэтому в качестве основы формулировки принципов формирования системы предлагается использовать обеспечение соответствия требований экономической безопасности как категории стратегическим целям развития организации.

При анализе уровня экономической безопасности предприятия (организации) ОАО «ТрансКонтейнер» последовательность этапов анализа обусловлена последовательностью реализации авторского подхода к оценке[1] состояния экономической безопасности. Так, в анализе активов предприятия в первую очередь нужно оценить структуру активов на основе бухгалтерского баланса предприятия, но эти расчеты мы приведем позже. Для начала рассчитаем деловую активность фирмы. Оценить деловую активность предприятия можно только по соотношению темпов роста основных показателей: совокупных активов (Такт),

[1] Краснощек А.А., Сольская И.Ю. Системный подход к экономической безопасности ОАО «Российские железные дороги». Материалы научной конференции «Ресурсное и кадровое обеспечение инновационного развития дорог Восточного региона». Чита. 2010. С. 158-162.

объема продаж (Tvрп) и прибыли (Tn): 100% < Такт < Tvрп < Tn[2].

На анализируемом предприятии[3] темп роста активов – 99,05% (27304394тр*100/27566362тр), объема продаж (выручки) – 85,53% (3624092тр*100/4237160тр), чистой прибыли – 48,80% (9654тр*100/19782тр), то есть данное условие не выполнено: 100>99,05>85,53>48,80. Первое неравенство (100% > Такт) показывает, что предприятие не наращивает свой экономический потенциал и масштабы деятельности.

Второе неравенство (Такт > Tvрп) свидетельствует о том, что объем продаж растет медленнее экономического потенциала. Из этого можно сделать вывод о пониженной эффективности использования ресурсов на предприятии.

Третье неравенство (Tvрп > Tn) означает, что прибыль предприятия растет медленнее объема реализации продукции и совокупного капитала.

Таким образом, можно сказать, что уровень экономической безопасности предприятия снижается.

Из анализа структуры и динамики следует, что в целом наблюдается падение валюты баланса. Основную часть спада взяли на себя оборотные активы, по внеоборотным активам наблюдается возрастание на 46,32%. Это может быть обусловлено увеличением или переоценкой основных средств, началом строительства новых объектов или разработкой и патентом новой технологии.

Таблица 1

Горизонтальный и вертикальный анализ активов

Показатель	Сумма, тр.		Удельный вес, %		Изм., т.р.
	2009	2010	2009	2010	
Внеоборотные активы	19172436	19273424	69,55	70,59	100988
Оборотные активы	8393926	8030970	30,45	29,41	-362956
Итого	27566362	27304394	100	100	-261968

Для более точной оценки состояния активов необходимо провести дополнительный развернутый анализ структуры и изменения разделов баланса (табл. 2).

Анализ структурных изменений показал, что наблюдается прирост стоимости внеоборотных активов.

Таблица 2

Анализ изменения структуры внеоборотных активов

Показатель	Удельный вес, %		Абсолютное изменение, т.р.
	2009	2010	
1	4	5	6
НМА	0,002	0,002	-35
Основные средства	92,80	92,61	58492
Незавершенное строительство	6,74	6,91	38729
Отложенные налоговые обязательства	0,23	0,25	3802
Долгосрочные финансовые вложения	0,16	0,16	-
Прочие внеоборотные активы	0,07	0,07	-
Внеоборотные активы всего	100	100	100988

Наивысшую долю внеоборотных активов составляют основные средства, которые дали прирост на 0,33%, также высокий прирост по сравнению с другими показателями дало НЗС – на 3%. НМА по сравнению с минувшим годом упало на 35 тысяч и падение составило 9,46%. Исходя из этих данных, можно предположить:

1) Новое строительство.

2) Возможно, предприятие закупает новые контейнеры, вагоны или локомотивы.

3) Сокращение НМА можно объяснить сокращением прибыли, персонала и всей материальной базы.

В структуре же раздела существенных изменений не наблюдается.

Таблица 3

Анализ изменения структуры оборотных активов

Показатель	Удельный вес, %		Темп роста, %	Абс. изме, т. р.
	2009	2010		
запасы	6,61	7,44	107,72	42826
НДС	3,83	4,82	120,63	66243
дебиторская задолженность, в том числе	79,00	73,47	88,97	-731148
с покупателями и заказчиками	18,18	11,68	63,81	-552265
краткосрочные финансовые вложения	2,86	6,73	224,87	299941
денежные средства	5,16	4,83	89,41	-45889
прочие оборотные активы	2,54	2,72	102,38	5078
всего оборотные активы	100,00	100,00	95,68	-362956

Из данных таблицы следует, что общее количество оборотных активов сократилось на 4,32 %. В основном на это повлияла дебиторская задолженность, платежи по которой ожидаются более чем через 12 месяцев после отчетной даты.

[2] Данное соотношение принято называть «золотым правилом экономики предприятия». Если данные пропорции соблюдаются, то это свидетельствует о динамичности развития предприятия и укреплении его финансового положения.

[3] Официальный сайт ОАО «ТрансКонтейнер»: (http://www.trcont.ru/?id=186&L=0)

Понижение этого показателя может свидетельствовать о том, что клиенты данной компании стали расплачиваться с предоставляемыми услугами без рассрочки и вовремя. В дебиторской задолженности уменьшилась статья с покупателями и заказчиками на 46,19 %, что говорит о том, что клиенты ОАО «ТрансКонтейнер» расплачиваются по своим обязательствам. Также предприятие стало активно давать товарные кредиты и приобретать акции других фирм, о чем свидетельствует то, что статья краткосрочные финансовые вложения возросла на 124,87 %.

Запасы предприятия возросли на 7,72 %, а НДС по приобретенным ценностям – на 20,63 %. Это связано с тем, что перевозки стали осуществляется по грузам, на которые распространяются повышенные коэффициенты или облагаемые пошлиной. Также это может быть связано с тем, что перевозимая продукция стала дорожать. Денежные средства сократились на 10%.

Таблица 4

Состав оборотных средств по степени ликвидности

Группа оборотных средств	Остатки на конец отчетного периода по статьям актива баланса
1.Абсолютно ликвидные активы	Денежные средства (387528 т.р.)
2. Наиболее ликвидные активы	Краткосрочные финансовые вложения (540137 т.р.)
3. Быстро ликвидные активы	Дебиторская задолженность (5900194 т.р.)
4. Медленно ликвидные активы	Запасы (597442+387417=984859 т.р.)
Общая сумма оборотных средств	8030970 т.р.

Состояние экономической безопасности существенным образом зависит от изменения структуры и стоимости источников финансирования деятельности предприятия. Для оценки этих изменений проводится анализ динамики и структуры пассивов (табл. 5). Из проведенного анализа следует, что пассив баланса сократился на 0,95 %. Эти несущественные изменения вызвало сокращение краткосрочных обязательств на 7,29 % и уменьшение доли данной статьи в пассиве баланса. Также капитал и резервы увеличились на 0,11 %. Доля 3 и 4 разделов бухгалтерского баланса компании ОАО ТрансКонтейнер возросли на 0,72 и 0,22 % соответственно.

Анализ изменения структуры капитала и резервов (табл. 6) показал, что изменения по данному разделу практически не произошли. Капитал предприятия вообще не изменился, но в 2010 году уменьшился его удельный вес на 0,8 %. Положительные изменения произошли только со статьей Нераспределенная прибыль (непокрытый убыток), в текущем году увеличилась на 20 млн рублей. В результате чего разделы капитал и резервы увеличились на 0,11 %.

Таблица 5

Горизонтальный и вертикальный анализ пассивов, т. р.

Показатель	Сумма, т. р.		Удельный вес, %		Изменения, т.р.
	2009	2010	2009	2010	
Капитал и резервы	18742218	18762000	67,99	68,71	19782
Долгосрочные обязательства	4752710	4767660	17,24	17,46	14950
Краткосрочные обязательства	4071634	3774734	14,77	13,83	-296900
Итого	27566362	27304394	100,00	100,00	-261968

Таблица 6

Анализ изменения структуры капитала и резервов, т.р.

Показатель	Удельный вес, %		темп роста, %	Изменение, т.р.
	2009	2010		
Уставный капитал	74,14	74,06	100,00	-
Добавочный капитал	0,55	0,55	100,00	-
Резервный капитал	1,51	1,51	100,00	-
Нераспределенная прибыль (непокрытый убыток)	23,80	23,88	100,45	19982
Итого	100,00	100,00	100,11	19982

Из данных таблицы 7 следует, что долгосрочные обязательства возросли на 0,32 %. Это было вызвано увеличением отложенных налоговых обязательств на 6,51 % или на 15150 тр. Остальные статьи четвертого раздела бухгалтерского баланса ОАО «ТрансКонтейнер» остались без изменений.

Таблица 7

Анализ изменения структуры долгосрочных обязательств, т. р.

Показатель	Удельный вес,%		темп роста, %	Изм-е, т.р.
	2009	2010		
Займы и кредиты	95,10	94,80	100,00	-
Отложенные налоговые обязательства	4,90	5,20	106,51	15150
Итого	100,00	100,00	100,32	15150

Из данных таблицы 8 следует, что кредиторская задолженность предприятия уменьшилась на 3,63 %. Но в структуре краткосрочных обязательств она заняла практически полное место (99,35 %). В самой кредиторской задолженности произошли существенные структурные изменения. Задолженность перед поставщиками и подрядчи-

ками, а также по налогам и сборам сократились на 26,64 и 9,63 % соответственно. Также произошло существенное увеличение задолженности по заработной плате на 221,41 % и перед государством на 63,13 %. Это может быть вызвано тем, что в связи с увеличением объемов работы и нехваткой рабочей силы не выплачивались отпускные или депонирование зарплаты для кругооборота денег на счетах предприятия. Прочие краткосрочные обязательства снизились на 86,62 %, что составляет 155 680 000 рублей. Доля данной статьи сократилась в 4 раза. Все эти изменения привели к падению краткосрочных обязательств на 7,29 %.

Таблица 8

Анализ изменения структуры краткосрочных обязательств, тр.

Показатель	Удельный вес,%		темп роста, %	Изменение
	2009	2010		
1) Кредиторская задолженность	93,11	99,35	96,37	-141155
в том числе поставщики и подрядчики	21,40	16,93	73,36	-232118
перед персоналом	0,65	2,25	321,41	58581
перед государственными ВБФ	0,52	0,91	163,13	13362
по налогам и сборам	4,61	4,49	90,37	-18059
прочие кредиторы	68,40	74,76	101,33	37079
2) доходы будущих периодов	0,01	0,01	89,26	-65
3) прочие краткосрочные обязательства	4,41	0,64	13,38	-155680
Итого	100,00	100,00	92,71	-296900

Анализ финансовых результатов ОАО «ТрансКонтейнер» в течение 2006-2009 годов и 1 квартала 2010 года показал, что деятельность являлась прибыльной. При этом были достигнуты следующие финансовые результаты:

Чистая прибыль за 2006 год составила 1 441 971 тыс. руб., за 2007 год – 1 531 851 тыс. руб., за 2008 год – 2 680 236 тыс. руб., за 2009 год – 22 101 тыс. руб., за 1 квартал 2010 года – 19 782 тыс. руб.

Рентабельность собственного капитала в 2006 году составила 9,40 %, в 2007 году – 9,14 %, в 2008 году – 14,04 %, в 2009 году – 0,12 %, за 1 квартал 2010 года – 0,11 %.

Рентабельность активов в 2006 году составила 8,40 %, в 2007 году – 7,50 %, в 2008 году – 9,97 %, в 2009 году – 0,08 %, за 1 квартал 2010 года – 0,07 %. Рентабельность продукции (продаж) в 2006 году составила 35,35 %, в 2007 году – 19,66 %, в 2008 году – 21,95 %, в 2009 году – 4,74 %, за 1 квартал 2010 года – 11,22 %.

Основной причиной низкого значения чистой прибыли за 2009 год и 1 квартал 2010 года в сравнении с сопоставимыми периодами 2006-2008 годов является влияние финансового кризиса на рынок железнодорожных контейнерных перевозок, который привел к существенному снижению валовой прибыли за счет снижения объемов грузов, предъявленных к перевозке, и, как следствие, падению выручки от продажи услуг (-19,18% по сравнению с 2008 годом), увеличению процентных расходов по обслуживанию заимствований (+122,13 % по сравнению с 2008 годом).

По итогам 2009 года выручка составила 16 348 015 тыс. руб., что на 19,18 % меньше показателя за аналогичный период прошлого года, чистая прибыль сократилась на 99,18 %. За 1 квартал 2010 года выручка выросла на 16,92 % по сравнению с 1 кварталом 2009 года и составила 4 237 160 тыс. руб.

К факторам, оказавшим влияние на снижение размера выручки ОАО «ТрансКонтейнер» на 19,18 % за 2009 год по сравнению с 2008 годом, следует отнести снижение платежеспособного спроса, снижение объемов грузов, предъявленных к перевозкам, предоставление скидок на перевозки по отдельным направлениям. Рост выручки в 1 квартале 2010 года по сравнению с 1 кварталом 2009 года произошел из-за оживления рынка и проведенных мероприятий ОАО «ТрансКонтейнер» по оптимизации бизнеса. Органы управления ОАО «ТрансКонтейнер» оценивают степень влияния данного фактора как умеренную.

Падение валовой прибыли по итогам 2009 года в 5,4 раза по сравнению с 2008 годом связано с влиянием финансового кризиса на рынок железнодорожных перевозок, падением выручки. Рост валовой прибыли в 1 квартале 2010 года в 2 раза по сравнению с 1 кварталом 2009 года связан с оживлением рынка и проведенными мероприятиями ОАО «ТрансКонтейнер» по оптимизации бизнеса. Органы управления ОАО «ТрансКонтейнер» оценивают степень влияния данного фактора как существенную.

Себестоимость услуг по итогам 2009 года по сравнению с аналогичным периодом предыдущего года претерпела незначительные изменения, уменьшилась на 0,56 % по сравнению с 2008 годом. Себестоимость услуг в 1 квартале 2010 года выросла на 10,97 %.

Низкое значение выручки в 2006 году обусловлено началом ведения хозяйственной дея-

тельности ОАО «ТрансКонтейнер» (начало хозяйственной деятельности – с 01 июля 2006 года), последующий существенный рост выручки и валовой прибыли в 2007-2008 годах связан с ростом рынка железнодорожных контейнерных перевозок, привлечением крупных клиентов за счет предложения сквозного сервиса при перевозках грузов в международном сообщении, расширения агентской сети в странах СНГ и третьих странах, обеспечения комплексного обслуживания клиентов на принадлежащих ОАО «ТрансКонтейнер» контейнерных терминалах.

Отрицательное значение собственных оборотных средств за 2008-2009 годы и 1 квартал 2010 года свидетельствует о частичном использовании заемного капитала для создания внеоборотных активов.

Соотношение собственных средств и общих активов ОАО «ТрансКонтейнер» демонстрирует достаточно высокий уровень платежеспособности и финансовой устойчивости предприятия.

Таким образом, ключевым фактором, влияющим на деятельность ОАО «ТрансКонтейнер» и его рыночные позиции является размер парка фитинговых платформ, а также наличие разветвленной сети продаж и широкой клиентской базы. К прочим факторам, влияющим на деятельность ОАО «ТрансКонтейнер», относятся факторы оптимизации управления подвижным составом:

– снижение времени простоев парка (в ожидании, в ремонте, при погрузо-разгрузочных операциях);

– оптимизация маршрутов следования контейнеров;

– оптимизация структуры парка контейнеров и ж.-д. платформ по типоразмерам;

– своевременное отслеживание местонахождения контейнера и вагона.

На деятельность ОАО «ТрансКонтейнер» оказывает влияние экономическая ситуация в стране и мире: последствия мирового финансового кризиса, который привел к непрогнозируемому ранее снижению объемов контейнерных перевозок. Обладание значительными конкурентными преимуществами (крупный парк подвижного состава и автотранспорта, относительно низкий уровень долговой нагрузки, широкая диверсифицированная база клиентов и др.) дает ОАО «ТрансКонтейнер» возможность увеличить свою долю на рынке, смягчить негативные последствия мирового финансового кризиса и быстрее преодолеть его последствия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Краснощек А. А., Сольская И. Ю. Системный подход к экономической безопасности ОАО «Российские железные дороги» // Ресурсное и кадровое обеспечение инновационного развития дорог Восточного региона : материалы науч. конф. Чита. 2010. С. 158–162.

УДК 621.371

Нагуслаева Идам Батомункуевна,
к. ф.-м. н., старший научный сотрудник лаборатории геоэлектромагнетизма Отдела физических проблем Бурятского научного центра СО РАН, раб. тел.: (3012) 43-32-10, e-mail: idam@mail.ru
Башкуев Юрий Буддич,
д. т. н., профессор, зав. лабораторией геоэлектромагнетизма Отдела физических проблем Бурятского научного центра СО РАН, профессор кафедры «Телекоммуникационные системы» ИрГУПС, e-mail: buddich@mail.ru
Хаптанов Валерий Бажеевич,
к. ф.-м. н., доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории геоэлектромагнетизма Отдела физических проблем Бурятского научного центра СО РАН, раб. тел.: (3012) 43-32-10
Дембелов Михаил Георгиевич,
научный сотрудник лаборатории геоэлектромагнетизма Отдела физических проблем Бурятского научного центра СО РАН, раб. тел.: (3012) 43-32-10

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗЕМНОЙ ВОЛНЫ НАД УЗКИМИ ТЕКТОНИЧЕСКИМИ РАЗЛОМАМИ

I.B. Naguslaeva, Yu.B. Bashkuev, V.B. Khaptanov, M.G. Dembelov

ELECTROMAGNETIC FIELD OF A GROUND WAVE OVER NARROW TECTONIC FAULTS

Аннотация. *Рассмотрено распространение земной волны в диапазоне 1-20 МГц над тектоническими разломами шириной до 1 км. Показано, что электромагнитный «образ» тектонического разлома представляет, как правило, зону повышенной электропроводности с резко очерченными границами. Предложен метод выделения зоны разлома по изменению электромагнитного поля в диапазоне 10-20 МГц на короткой (до 10 км) трассе распространения радиоволн.*

Ключевые слова: *земная волна, тектонический разлом.*

Abstract. *Propagation of a ground wave is considered in a range of 1–20 MHz over tectonic faults up to 1 km wide. It is shown that electromagnetic "image" of a tectonic fault generally represents a zone of increased electroconductivity with sharply outlined borders. The range of frequencies is defined in which the fault zone is shown most notably in an electromagnetic field. The allocation method of a fault zone is offered based on a change of an electromagnetic field of a range of 10–20 MHz on a short (up to 10 km) line of radio-waves propagation.*

Keywords: *ground wave, tectonic fault.*

Введение. В настоящее время в мире активно развивается новое научное направление радиофизики – сейсмоэлектромагнетизм, включающее в себя распространение сейсмоэлектромагнитных эмиссий в СНЧ-СВЧ диапазонах [1, 2]. Проведенный обзор литературы по электромагнитным процессам в нагруженных горных породах [3] указал на решающее значение для эффективности сейсмопрогностических работ выбора места расположения пункта наблюдения с соответствующим типом подстилающей среды. С точки зрения распространения радиоволн, это задача о влиянии «посадочной площадки» на чувствительность и, в целом, эффективность работы сейсмоэлектромагнитного приемно-регистрирующего комплекса. Наиболее интересными с этой точки зрения являются зоны разломов в земной коре, которая разбита разломами на отдельные блоки. На рис. 1 представлен фрагмент карты разломов земной коры Баргузинской рифтовой впадины. Из легенды к карте следует, что региональные и локальные разломы могут быть достоверными и *предполагаемыми*, т. е. их существование требуется доказать каким-либо радиогеофизическим методом. Ширина таких разломов может варьироваться в широ-

ких пределах – от первых десятков метров до первых километров.

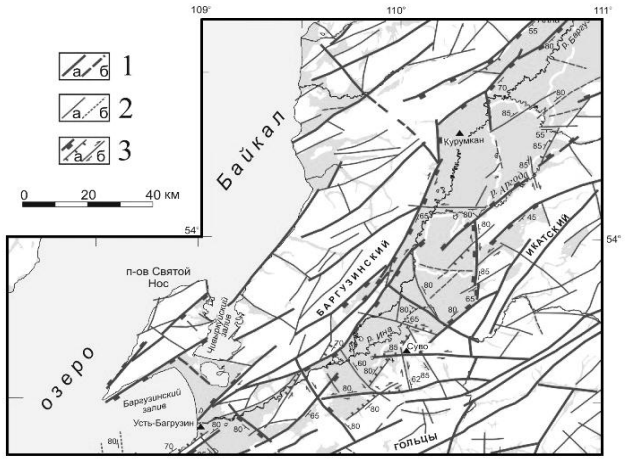


Рис. 1. Карта разломно-блокового строения земной коры Баргузинской рифтовой впадины и сопредельной территории: 1 – достоверные (а) и предполагаемые (б) региональные разломы; 2 – достоверные (а) и предполагаемые (б) локальные разломы; 3 – сбросы (а) и сдвиги (б)

Цель работы. Теоретическое и экспериментальное обоснование радиофизического метода выделения зоны разлома по изменению электромагнитного поля на короткой (до 10 км) трассе распространения радиоволн.

Решаемые задачи. 1) моделирование распространения земной волны над тектоническими разломами в диапазоне 1 – 20 МГц; 2) измерения естественного электромагнитного поля над зоной разлома в ОНЧ диапазоне.

Математическое моделирование и вычислительный эксперимент. В работе [3] предложена и обоснована геоэлектрическая модель зоны разлома, необходимая для расчетов распространения сейсмогенных электромагнитных эмиссий.

Геоэлектрическая модель разлома представляет, как правило, линейную зону повышенной электропроводности с резко очерченными границами. Модель расчетной трассы распространения длиной 10 км представляет кристаллический массив с удельным электрическим сопротивлением (УЭС) 1000 Ом·м и диэлектрической проницаемостью ε =10, разбитый двумя проводящими разломами с УЭС 10 Ом·м и ε =10, шириной по 1 км. Первый разлом отстоит от излучателя на расстоянии 5 км, второй разлом – на расстоянии 7 км (рис. 2).

В настоящее время наиболее распространенным методом расчета функции ослабления над электрически неоднородными трассами является метод численного решения интегрального уравнения Хаффорда [4]:

$$W(R) = 1 + i\sqrt{\frac{ikR}{2\pi}}\int_o^R W(x)\cdot \left[\delta(x) + (1-\frac{1}{ikr_2})\frac{\partial r_2}{\partial n}\right]\cdot \frac{\exp[ik(r_1+r_2-r_0)]dx}{\cos\psi\sqrt{x(R-x)}}, \quad (1)$$

где x – расстояние вдоль поверхности Земли между источником и точкой интегрирования; r_0, r_1, r_2 – расстояния по прямой между источником и приемником, источником и точкой интегрирования, приемником и точкой интегрирования соответственно; n – внешняя по отношению к Земле нормаль в точке интегрирования: ψ – угол между радиусом Земли и внешней нормалью в точке интегрирования. Электрические неоднородности трассы учитываются зависимостью импеданса от расстояния $\delta(x)$. Для численного интегрирования уравнения (1) используется алгоритм, основанный на методе конечных сумм. В табл. 1 приведен поверхностный импеданс кристаллического массива и зоны разлома на частотах 1, 3, 10 и 20 МГц.

Таблица 1

	Кристаллический массив		Зона разлома	
f, МГц	|δ|	φ_δ, град	|δ|	φ_δ, град
1	0,218	-29	0,023	-44,8
3	0,282	-14	0,04	-44,5
10	0,298	-4,5	0,075	-43,3
20	0,299	-2,3	0,105	-41,5

Расчеты в диапазоне 1 – 20 МГц для 5-кусочной модельной трассы с двумя тектоническими разломами шириной 1 км показывают ярко выраженный эффект «восстановления» поля над зоной разлома (рис. 2).

Эффект усиливается с ростом частоты. Так, на частоте 1 МГц поле над разломной зоной увеличилось незначительно, всего на 810 мкВ/м, а на частоте 20 МГц увеличение поля очень заметно и составляет 2,4 раза относительно поля перед разломом. Из графиков следует, что выделение зоны разлома по изменению электромагнитного поля на короткой радиотрассе лучше всего проводить в диапазоне от 10 до 20 МГц.

Отметим, что в работе [5] численные расчеты в диапазоне 2–1000 кГц для модельной трассы с шириной разлома в 10 км также показали ярко выраженный эффект «восстановления» поля над зоной разлома на частотах от 300 до 1000 кГц. Из

общего анализа данных следует, что оптимальный диапазон частот для выделения зоны разлома зависит от его ширины. Для разломов шириной от 100 м до 1000 м лучше всего проводить измерения уровня поля на частотах 10-20 МГц.

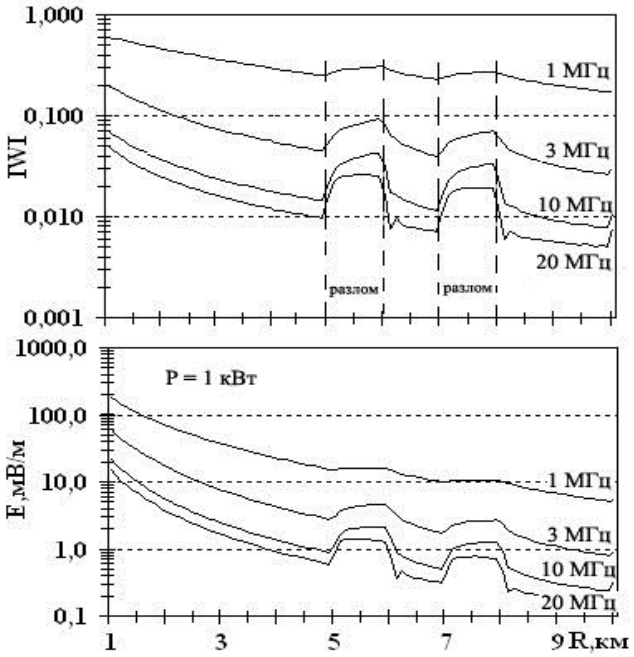


Рис. 2. Модуль функции ослабления и уровень поля земной волны на частотах 1,3, 10 и 20 МГц над зонами разломов

Натурный эксперимент и интерпретация полученных данных. Естественное поле регистрировалось на разломе «Саженная» на частоте 14,5 кГц с помощью полевого многоканального геофизического регистратора МГР-01 поперек оси разлома с шагом 50 м на 14 пикетах. Эксперимент проведен в полуденное время в конце октября 2008 года. Время измерений на пикете составляло 5 мин [5]. В результате измерений магнитной компоненты естественного поля по двум направлениям приема «север-юг» и «запад-восток» (рис. 3) установлен повышенный уровень случайного ОНЧ-импулъсного потока над зоной разлома (на рис. 3 зона разлома начинается с расстояния 150 м и выделена утолщенной линией). Одновременно на базовой станции «Верхняя Березовка» в окрестности г. Улан-Удэ с помощью стационарного комплекта МГР-01 регистрировалась та же магнитная компонента естественного поля. Её интенсивность по направлениям приема «север-юг» и «запад-восток» за каждые 5 минут измерений не превышала 90 импульсов. При сопоставлении одновременных измерений обнаружено, что увеличение числа импульсов над зоной разлома «Саженная» составляет десятки и сотни раз. Эффект увеличения ОНЧ-импульсного потока над разломной зоной интерпретируется нами не как литосферное ОНЧ-излучение («литосферики»), идущее из земной коры, а как результат увеличения уровня естественного поля над более проводящей зоной разлома (эффект «посадочной» площадки). Численные расчеты распространения радиоволн в ОНЧ-НЧ-СЧ-ВЧ диапазонах и измерения естественного поля над разломной зоной показывают увеличение поля над зоной разлома. Таким образом, над разломными зонами имеет место эффект «восстановления» поля типа «суша-море», т. е. уровень электромагнитного поля над разломом будет всегда повышаться из-за влияния «посадочной» площадки, имеющей высокую электропроводность. Этот эффект может быть использован для поиска предполагаемых разломов в сейсмоактивных районах. Методика эксперимента должна быть близкой к методике, описанной в работе [6].

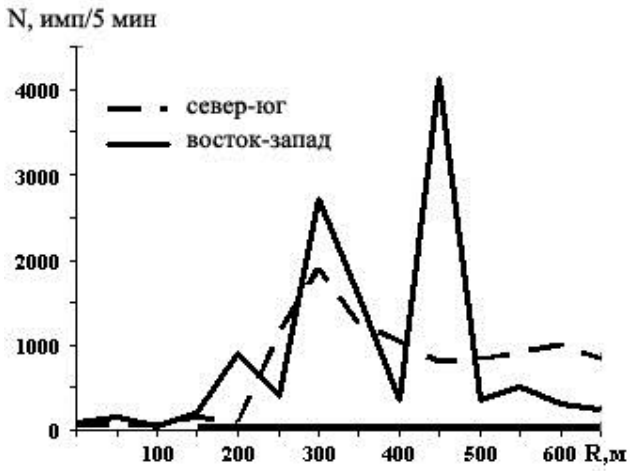


Рис. 3. Интенсивность импульсного потока магнитной компоненты естественного поля на разломе «Саженная»

Выводы. На основе геоэлектрической модели тектонического разлома [3] предложен метод выделения зоны разлома шириной до 1 км по существенному увеличению уровня поля над разломом в диапазоне 10–20 МГц на короткой радиотрассе. Модельные расчеты и измерения естественного электромагнитного поля над зоной разлома в ОНЧ диапазоне свидетельствуют о целесообразности развития данного направления исследований в области радиофизической диагностики тектонических разломов. Привлечение повышенного внимания к этому новому для радиофизики объекту исследований имеет важное практическое применение в области сейсмоэлектромагнетизма и электромагнитной экологии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Molchanov O. A., Hayakawa M. Seismo Electromagnetics and Related Phenomena: History and Latest Results // TERRAPUB. Tokyo, Japan. 2008. 189 p.
2. Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes // Ed. M. Hayakawa ; Published by Transworld Research Network. Kerala, India, 2009. 279 p.
3. Нагуслаева И. Б. Исследование электрических свойств подстилающей среды и пространственно-временных характеристик электромагнитного поля по данным радиоизмерений и моделирования : дис. на соиск. учен. степ. канд. физ.-мат. наук / ОФП БНЦ СО РАН. Улан-Удэ, 2009. 141 с.
4. Hufford G. A. An Integral Equation Approach to the Problem of Wave Propagation over an Irregular Surface // Quart. 1952. Vol. 9. Appl. Math. P. 391–404.
5. Радиофизическая диагностика зон тектонических нарушений / Башкуев Ю. Б., Хаптанов В. Б., Нагуслаева И. Б., Буянова Д. Г., Адвокатов В. Р., Дембелов М. Г. // Журнал радиоэлектроники. № 10. 2010. С. 405–421.
6. Поверхностные электромагнитные волны над двухслойной средой «лед-соленая вода». Результаты эксперимента / Башкуев Ю. Б., Хаптанов В. Б., Дембелов М. Г., Нагуслаева И. Б. // Журнал радиоэлектроники. 2010. № 10. С. 382–393.

УДК 546.49:551.578.4.504.064.36

Скворцов Валерий Александрович,
д. г-м. н., профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности и экология», ИрГУПС

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ МИГРАЦИИ РТУТИ ИЗ СНЕЖНОГО ПОКРОВА ВБЛИЗИ ПРЕДПРИЯТИЙ ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

V.A. Skvortsov

MODELING THE PHYSICO-CHEMICAL CONDITIONS OF MERCURY TRANSPORT FROM SNOW COVER NEAR CHEMICAL FACTORY

Аннотация. *Впервые смоделированы термодинамические условия поведения субмикроскопических (10^{-4} мм и менее) твёрдых кристаллических частиц ртути и аэрозолей из снежного покрова при взаимодействии их с окружающей средой вблизи городов Усолье-Сибирское и Ангарск Иркутской области, где преобладают профильные предприятия химической промышленности.*

Ключевые слова: *физико-химические (термодинамические) условия, перенос ртути, твёрдые частицы аэрозолей, снежный покров, предприятия химической промышленности.*

Abstract. *Thermodynamic conditions monitoring of the mercury and solid aerosol particles from snow cover performance have been modeled for the first time. The modeling has been conducted near the towns of Usolye-Sibirskoye, Angarsk wich are the center of the chemical industry of Irkutsk region.*

Keywords: *physico-chemical (termodynamic) conditions, mercury transport, solid aerosols, snow cover, chemical factory.*

Введение

Атмосферный аэрозоль, содержащий ртуть, образуется в результате выбросов в процессе технологических операций на промышленных предприятиях. Осаждаясь, он скапливается в снежном покрове, активно взаимодействует с окружающей средой и нарушает установившееся ранее экологическое равновесие.

Согласно статотчётности, только в 2007 году от стационарных источников химической промышленности в атмосферу поступило 15,3 тыс. т загрязняющих веществ, из них твёрдых 2,1 тыс. т, жидких и газообразных 13,2 тыс. т. Из специфических загрязняющих веществ в атмосферный воздух выброшено: 900,1 т дихлорэтана, 421,3 т мета-

на, 540,03 т бензола, 200,4 т толуола, 105,85 т стирола, 47,66 т аммиака и 0,34 т ртути [1].

Обоснование цели работы

В рассматриваемых нами городах на расстоянии до 20 км в твёрдом осадке снежного покрова за зимний период скапливается большое количество карбонатов (кальцита – $CaCO_3$ и доломита – $CaMg(CO_3)_2$), присутствует ртуть и другие металлы. Содержание техногенного кальцита в твёрдофазных частицах аэрозоля вблизи химического комбината в г. Усолье-Сибирское в десятки раз превышает фоновое значение, а в Ангарске – в 2-3 раза. Проблемы ртутного загрязнения природных и искусственных водоёмов, способы его предотвращения и ликвидации нашли своё отражение в публикациях [2-5]. Детальное изучение этих материалов показало что поведение ртути из твёрдого осадка снегогеохимических проб на глубину от предприятий химической промышленности исследователями не рассматривались.

Изучение поведения ртути и твёрдых частиц аэрозолей в окружающей среде требует привлечения современных методов исследования, среди которых одними из наиболее доступных и эффективных являются построения компьютерных физико-химических моделей.

Моделирование физико-химических условий

По данным моделирования снежного покрова, твёрдой фазы снега, воздуха и воды (табл. 1) физико-химическая модель может быть описана следующими независимыми компонентами *Ca–Mg–K–Na–S–C–Cl–F–N–Hg–Si–Al–Fe–H–O*, комбинации сочетаний которых отражают состав зависимых компонентов.

В соответствии с этим водная фаза содержит 183 компонента (катионы, анионы, молекулы), газовая – 13 и твёрдая – 57 компонентов. В состав твёрдой фазы включены минералы, определённые в составе выпаренного сухого остатка, которые теоретически могут быть встречены в почвах, сформированных на юрских и кембрийских отложениях, сложенных песчаниками, алевролитами, углистыми и глинистыми сланцами, доломитами, известняками, кремнисто-карбонатными отложениями с пропластками каменной соли и ангидрита, а впоследствии частично переформированных и деградируемых. Физико-химическое моделирование проводилось по программе «Селектор» [6, 7]. Рассчитывались модели при температуре от 2 до 5 °С, давлении 1 бар в условиях частичного равновесия. Выбранные температуры отражают начало и окончание таяния снега в весенний период, в течение которого и проходят наиболее активные геохимические процессы взаимодействия твёрдого осадка с окружающей средой.

Таблица 1

Исходные составы снега, твёрдого осадка, воздуха и воды

Снег		Твёрдый осадок		
Компоненты	Содержание, мг/л	Минералы	Химические формулы	Содержание, %
Ca^{2+}	33,1	Кальцит	$CaCO_3$	4
Mg^{2+}	1,7	Доломит	$CaMg(CO_3)_2$	28
K^+	1,7	Кварц	SiO_2	24
Na^+	1,5	*Плагиоклаз*:		
SO_4^{2-}	16,0	Альбит	$NaAlSi_3O_8$	15
HCO_3^-	9,2	Анортит	$CaAl_2Si_2O_8$	6
CO_3^{2-}	33,9	Калиевый полевой шпат	$KAlSi_3O_8$	17
Cl^-	3,5	*Амфибол:*		
F^-	1,2	Тремолит	$Ca_2Mg_5Si_8O_{22}(OH)_2$	1,1
NO_3^-	3,0	Актинолит	$Ca_2Fe_5Si_8O_{22}(OH)_2$	1,2
Hg^{2+}, мкг/м^2	0,2 [2]	Мусковит (гидрослюда)	$KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$	1,7
pH	9,15	Каолинит	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	1
		Гематит	Fe_2O_3	1
		Магнетит	Fe_3O_4	1
		Ртуть, мкг/м^2	*Hg*	40,6 [2]
Воздух, %	O – 20,95; N – 78,16; C – 0,016; Ar ~ 0,9 (не учитывается)			
Вода, %	O – 89; H – 11			

В начальный период, когда частицы твёрдого осадка ещё не начали взаимодействовать со снеговой водой и почвой, в равновесии отмечаются фазы газа (83,5 %) и раствора (16,4 %). Из газов преобладает азот (77,5 %) и кислород (21,9 %), что создаёт ультракислую среду ($pH = 0,7$ *и* $Eh = 1,1$),

в которой из ртутных комплексов в растворе будет выделяться только $HgCl_2^0$ (0,0003 мг/кг H_2O).

Сразу после соприкосновения твёрдых частиц осадка с почвенным слоем, представленным в интервале 0-5 м преимущественно супесью, часть кремнекислоты из раствора переходит в твёрдую фазу и в почве в данном интервале появляется новообразованный кварц (0,8 %), который оказывается устойчивым в равновесии с газом (78,9 %) и раствором (18,2 %). Кислотность-щелочность раствора в этом случае приближается к 1,6-1,7 и создаёт среду, благоприятную для образования галогенидных комплексов ртути. Концентрации их заметно возрастают: $HgCl^+$ (0,0041 мг/кг H_2O), $HgCl_2^0$ (5,6 мг/кг H_2O), $HgCl_3^+$ (0,0001 мг/кг H_2O).

При дальнейшем взаимодействии кристаллических частиц твёрдого осадка со снежной водой и воздухом происходит перераспределение из водной фазы в твердую *Fe, Si, K* и *Al*, что приводит при *pH* 2,4 к возможности образования в ассоциации с кварцем вторичных гидрослюдистых минералов (в частности, железистой разновидности иллита). Кроме возрастания содержания галогенидных комплексов $HgCl^+$ (4,9 мг/кг H_2O), отмечаются повышенные содержания Hg^{2+} (0,76 мг/кг H_2O) и других соединений $HgOH^+$ (0,02 мг/кг H_2O), Hg_2O^0 (0,003 мг/кг H_2O), HgF^+ (0,0002 мг/кг H_2O). При сопоставлении изменения *pH* с глубиной данная ситуация сохраняется до 7-8 м.

На глубине, близкой к 10 м в зоне контакта глинистых сланцев и песчаников, когда количество твердой фазы возрастает до 9,6 % и *pH* приближается к 3, в равновесии с кварцем и железистым иллитом появляются минералы группы каолинита – монтмориллонита, среди которых преобладают алюминиевые и калиевые разности, в меньшем количестве присутствует железистая разновидность монтмориллонита. Из ртутных соединений в растворе увеличиваются Hg^{2+} (20,9 мг/кг H_2O), $HgCl^+$ (18 мг/кг H_2O), $HgOH^+$ (2,4 мг/кг H_2O), HgF^+ (0,003 мг/кг H_2O), Hg_2O^0 (1 мг/кг H_2O).

Когда взаимодействие твёрдого осадка снега с талой водой за счёт инфильтрации продолжается и дальше на глубину по глинистым сланцам, соотношение между фазами меняется. Количество раствора составляет 16,3 %, газа 57,5 % и твёрдой фазы 26,1 %. В этом случае величина *pH* будет равняться 5,5, а *Eh* = 0,8. За счёт перераспределения кальция и магния из раствора и углекислоты из газа вместе с кварцем и разновидностями минералов группы иллита появляется кальцит и доломит. А резкое снижение концентрации большинства ртутных комплексов (исключение составляют $HgCl_2^0$ (12,7 мг/кг H_2O) и HgO^0 (4,9 мг/кг H_2O) приводит к образованию на глубине 17–18 м в твёрдой фазе порошковой ртути (HgO).

Ниже глинистых сланцев в скважинах на глубинах 21–24 м отмечается водоносный горизонт, представленный трещиноватыми песчаниками, сланцами и алевролитами. Пробы воды, взятые в скважинах, фиксируют величину *pH* от 6,5 до 7,6.

В кровле водоносного пласта, при движении остатков снеговой воды и растворённых твёрдых частиц по песчаникам и сланцам (когда соотношение между фазами: раствор 11,1 %, газ 34,1 % и твёрдая 54,7 %), в результате взаимодействия образуется устойчивая ассоциация кварца, иллита (аллюминиевого и железистого), кальцита, гейландита (появляющегося за счёт высокой активности кальция) и селадонита. В твёрдой фазе попрежнему присутствует порошковая ртуть, а в газах, по сравнению с вышезалегающим горизонтом, отсутствует CO_2. Рассматривая поведение ртутных компонентов в растворе, следует заметить, что содержание их заметно снижается. Это объясняется тем, что при взаимодействии раствора с водоносным горизонтом в результате инфильтрации происходит резкое разбавление просачивающихся растворов, и часть компонентов из них уходит в водоносный пласт и загрязняет его.

В подошве водоносного пласта, на глубине 25 м, в песчаниках за счёт увеличения активности *K* и *Na* и повышения *pH* до 8,1 появляются новообразованные полевые шпаты (калиевый полевой шпат и альбит). Количество твёрдой фазы в системе достигает 79,6 %, газовой 13,7 % и раствора 6,6 %. Углекислота в газах здесь отсутствует полностью, а количество азота возрастает до 91,3 %. Из ртутных комплексов в твёрдой фазе отмечается порошковая ртуть (HgO), в жидкой HgO^0 (2,4 мг/кг H_2O), $HgOH^+$ (0,0001 мг/кг H_2O) и HCl_2^0 (0,001 мг/кг H_2O).

Ниже водоносного горизонта песчаников на глубине 35 м находится водоупор, представленный алевролитами с прослоями песчаников. Количество твёрдого осадка, прореагировавшего с почвой и породами составляет 92,6 %, газа 4,5 % и раствора 2,8 %. При *pH* 11,1 в ассоциации образуются: кварц, железистый иллит, кальцит, селадонит, полевые шпаты, водный цеолит – вайракит и порошковая ртуть. Газовая фаза на 49,6 % представлена азотом. Из ртутных минералов в остаточном растворе фиксируется HgO^0 (2 мг/кг H_2O)
и в незначительных количествах присутствуют $HgOH^+$, $HgCl_2^0$ и $HgCl^+$.

И завершается физико-химическая модель, имитирующая процесс термодинамического взаимодействия снеговой воды, содержащей твёрдые частицы, с почвой и породами при *pH* 13,5 на глубине 42–43 м, в песчаниках на известковом цементе с прослоями глинистых сланцев. Количество твёрдой фазы в системе на заключительном этапе составляет 97,5 %, газовой 1,5 % и раствора 0,8 %. Твёрдая фаза заканчивается образованием в юрских песчаниках устойчивой ассоциации: кварц, железистый иллит, кальцит, селадонит, калиевый полевой шпат, альбит-анортит, вайракит, гематит. Данная новообразованная ассоциация полностью отвечает исходному составу переработанного твёрдого осадка снегогеохимической пробы.

Обсуждение и выводы

Проведённые нами исследования показывают, что поступившие в атмосферу выбросы от промышленных предприятий и частично от природных объектов (массивов выветрелых горных пород) собираются аэрозолями, вымываются атмосферными осадками и включаются в круговорот в почве, породах, воде.

Тающий снег вместе с содержащимися в нём твёрдыми частицами аэрозолей (включаясь в круговорот) на разных стадиях начинает активно взаимодействовать с почвой, горными породами, водоносным горизонтом. Все стадии сопровождаются определёнными изменениями.

Как показывают наши данные и результаты других исследователей [5], в дерновых лесных почвах, развивающихся на продуктах выветривания бескарбонатных юрских песчаников под сосновыми или смешанными разнотравными лесами, состоящими из дёрнового горизонта и поочерёдно сменяющихся литогенных супесчаных слоёв, вниз по почвенному профилю наблюдается увеличение *pH*.

В песчано-глинистых отложениях при взаимодействии с инфильтрующим раствором происходят метасоматические изменения, сопровождающиеся появлением новообразованных вторичных минералов. От поверхности на глубину в песчано-глинистых породах отмечаются проявления следующих процессов: окварцевания, гидрослюдизации, каолинизации, карбонатизации, калишпатизации и альбитизации.

В верхних горизонтах геологического разреза, где в породах отмечается окварцевание, вся ртуть находится в растворе и её повышенные концентрации до *pH* 1,6 и *Eh* 1,1 связаны непосредственно с галогенидными комплексами, но с глубиной в растворе при *pH* от 2,4 и выше и *Eh* равном 1 баланс ртути между галогенидными комплексами (которые количественно преобладают), свободной ртутью, окисью и гидратом изменяется.

В средней части геологического разреза в породах отмечается карбонатизация и в растворе при *pH* 5,5 и *Eh* 0,9 происходит перераспределение ртути. Это связано с тем, что основное её количество переходит в твёрдую фазу (HgO), а в растворе в относительно повышенных количествах она отмечается только в нейтральных комплексах ($HgCl_2^0$ и HgO^0).

Далее вниз по разрезу при возрастании щёлочности происходит увеличение содержания ртути в твёрдой фазе и уменьшение её (до полного исчезновения) в жидкой фазе.

Физико-химическое моделирование показало, что в кислой среде, пока ртуть находится в растворе в виде легкорастворимых солей, она представляет наибольшую опасность для загрязнения почв, растений, воды, и только после перехода её в твёрдую фазу при *pH* 5,5 до водоносного горизонта и дальнейшем увеличении щёлочности с глубиной эта опасность значительно снижается. Так что физико-химическое моделирование позволяет оценить границы распространения ртутных комплексов на глубину и контролировать экологическую ситуацию.

В заключение мне хотелось поблагодарить студентов Терека С.В., Мельникова М.П., Воробьёву Е.С., Дёмину Н.С., которые принимали наиболее активное участие в формировании и расчётах модели.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Государственный доклад о состоянии окружающей среды Иркутской области в 2007 году. Иркутск : Изд-во «Облмашинформ», 2008. 357 с.
2. Антропогенная компонента и баланс ртути в экосистеме Братского водохранилища / Коваль П. В., Калмычков Г. В., Лавров С. М., Удодов Ю. Н., Бутаков Е. В., Файфилд Ф. В., Алиева В. И. // Докл. РАН. 2003. Т. 388, № 2. С. 225–227.
3. Павлов А. Л. Физико-химическая обстановка миграции и отложения ртути и сопутствующих элементов при низких температурах // Вопросы металлогении ртути. М. : Наука, 1968. С. 53–72.
4. Проблемы ртутного загрязнения природных и искусственных водоёмов, способы его предотвращения и ликвидации : тезисы докл. Междунар. конф., 13-16 сент. 2000 г., Иркутск / отв. ред. П. В. Коваль, М. И. Кузьмин. Иркутск : Изд. Ин-та геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН, 2000. 115 с.
5. Седых Е. С., Зарипов Р. Х. Ртуть в почвах Усольского промышленного района (Верхнее Приангарье) // Сибир. эколог. журн. 2002. № 1. С. 21–28.
6. Чудненко К. В. Селектор-Windows. Программное средство расчёта химических равновесий минимизацией термодинамических потенциалов : (кратк. инструкция). Иркутск : Изд. Ин-та геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН, 2005. 100 с.
7. Karpov I. K., Chudnenko K. V., Kulik D. A. Modeling Chemical Mass-Transfer in Geochemical Processes: Thermodynamic Relations, Conditions of Equilibria and Numerical Algorithms // Amer. J. Sci. 1997. Vol. 297. P. 767–806.

УКД 621.879

Булатов Юрий Николаевич,
аспирант, ГОУ ВПО «Братский государственный университет»,
кафедра «Управление в технических системах»,
тел. 89501381582, e-mail: bulatovyura@yandex.ru;
Игнатьев Игорь Владимирович,
к. т. н., доцент, ГОУ ВПО «Братский государственный университет»,
кафедра «Управление в технических системах»,
тел. 8-3953-32-53-57, uts@brstu.ru;
Попик Виталий Александрович,
к. т. н., доцент, ГОУ ВПО «Братский государственный университет»
кафедра «Системы электроснабжения»
тел. 8-3953-32-53-57

МЕТОДИКА ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ НАСТРОЕК СИСТЕМ АРЧВ ГЕНЕРАТОРОВ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

U.N. Bulatov, I.V. Ignatyev, V.A. Popik

TECHNIQUE OF SAMPLING OPTIMAL SETTINGS OF POWER STATIONS GENERATORS ARRF SYSTEMS

Аннотация. *Разработана методика выбора оптимальных настроек систем автоматического регулирования частоты вращения (АРЧВ) турбин генераторов электростанций. Предложен пассивный подход к идентификации электроэнергетических систем (ЭЭС) в диапазоне частот собственных колебаний системы с применением технологии вейвлет-преобразования. Представлена модель трёхмашинной системы, на которой показана высокая эффективность предложенной методики.*

Ключевые слова: *электроэнергетическая система, автоматический регулятор частоты вращения, генератор, турбина, идентификация.*

Abstract. *The technique of sampling optimal settings of automatic regulator of rotation frequency (ARRF) systems turbines of power stations generators is developed. The passive approach to identification of electropower systems (EPS) in a frequency range of an eigentone of system with application of technology of wavelet-transformation is offered. The model of three-machine systems on which high efficiency of the offered technique is shown is presented.*

Keywords: *electropower system, automatic regulator of rotation frequency, generator, turbine, identification.*

1. Введение. Постановка задачи

Рост мощности электроэнергетических систем (ЭЭС) предъявляет всё более жёсткие требования к качеству регулирования частоты и обменной мощности. Стабилизация частоты и качество регулирования перетоков мощности по транзитным связям в настоящее время являются основными критериями повышения надёжности и устойчивости параллельной работы генераторов электростанций сложных ЭЭС. Среди факторов, которые влияют на надёжность и устойчивость работы крупного энергообъединения, важнейшее место занимает необходимость постоянного поддержания баланса генерируемой и потребляемой активной мощности при номинальной частоте.

Функция первичного регулирования частоты на электростанциях возлагается на автоматические регуляторы частоты вращения (АРЧВ) турбины. В нормальном режиме работы ЭЭС постоянно имеют место случайные изменения нагрузки, которые должны компенсироваться вращающимся резервом. В каждой машине возникают переходные процессы, выражающиеся в механических колебаниях ротора, колебаниях напряжения, тока по отношению к другим электрическим машинам ЭЭС. Эти колебания отражаются на перетоках мощности по линиям электропередачи. Обычно они невелики, и, следовательно, с ними можно не считаться. Но положение изменяется, когда речь идёт о межсистемных связях, соединяющих группы машин. Для того чтобы иметь возможность воздействовать на эти колебания, управлять ими, необходимо изучить реакцию отдельных элементов всей объединённой энергосистемы на малые случайные возмущения. Оптимальная настройка систем АРЧВ генераторов электростанций позволит существенно повысить устойчивость и демпферные свойства ЭЭС. Существующие способы синтеза оптимальных принципов управления частотой энергосистем имеют ряд недостатков. В связи с этим требуется разработка новых способов оптимизации параметров систем АРЧВ.

2. Методика оптимальной настройки систем АРЧВ

Для определения оптимальных настроек систем АРЧВ была разработана и программно реализована методика, в основе которой лежит метод стандартных коэффициентов [1]. Процедура поиска настроек регуляторов системы согласно этой методике заключается в приближении коэффициентов характеристического полинома математической модели ЭЭС к стандартным формам Баттерворта. При этом корни характеристического полинома оптимально распределяются на комплексной плоскости, тем самым обеспечивается необходимая степень устойчивости системы. Определение настроек АРЧВ производится путём решения задачи оптимизации с помощью генетического алгоритма (ГА), сводящего к минимуму следующий квадратичный критерий:

$$J = \int_0^{\Omega} e^2(j\omega)d\omega \to \min, \qquad (1)$$

где $e(j\omega) = D^{ж}(j\omega) - D^{м}(j\omega)$ – рассогласование между желаемым набором значений $D^{ж}(j\omega)$ и «модельным» набором $D^{м}(j\omega)$ характеристических полиномов; Ω – «полоса пропускания» системы (рабочий частотный диапазон системы).

Таким образом, для реализации алгоритма необходимо иметь математическое описание в виде характеристического полинома, отражающего динамические свойства исследуемой ЭЭС. Для этого требуется выполнить идентификацию системы.

Одним из развивающихся направлений идентификации динамических систем является использование частотных характеристик, позволяющих по экспериментальным данным «вход – выход» выявить динамические свойства системы. В связи с этим в интегрированной среде MATLAB был программно реализован алгоритм, позволяющий проводить непараметрическую идентификацию ЭЭС [2, 3]. В алгоритме используется аппарат дискретного преобразования Фурье, с помощью которого можно получить различные спектральные и временные характеристики, в том числе и комплексную передаточную функцию $W(j\omega)$, как отношение прямого преобразования Фурье выход-

ного сигнала объекта к прямому преобразованию входного сигнала.

При идентификации для получения достаточно точных оценок динамики системы целесообразно применять широкополосные сигналы. В качестве таких сигналов хорошо подходят либо случайные, либо псевдослучайные сигналы. Однако, поскольку нарушение нормального процесса эксплуатации ЭЭС нежелательно, методика идентификации должна ориентироваться на пассивный подход, при котором в качестве тестового воздействия на систему используется выделенный паразитный шум регулятора. Существует много способов решения данной задачи, ориентированных на применение специальных фильтров, но, по мнению авторов, наиболее эффективным является метод, реализующий программную обработку исходных выборок с помощью технологии вейвлет-преобразования [4].

При вейвлет-анализе сигнал раскладывается на составляющие с аппроксимирующими коэффициентами, которые представляют сглаженный сигнал, и детализирующими коэффициентами, описывающими колебательный процесс. Таким образом, шумовая компонента больше отражается в детализирующих коэффициентах. Поэтому при выделении шума обрабатывают обычно детализирующие коэффициенты. Алгоритм выделения шума регулятора был реализован в MATLAB при использовании функций вейвлет-анализа пакета Wavelet Toolbox. На рис. 1 показана эффективность применения технологии вейвлет-преобразования для выделения шума регулятора.

Частотные характеристики, полученные с помощью выделенного шума регулятора, как правило, оказываются весьма «изрезанными». Истинная же передаточная функция $W(j\omega)$ является гладкой функцией. Поэтому, чтобы получить более достоверную оценку комплексной передаточной функции системы, необходимо проводить дополнительную обработку, например, использовать методику сглаживания эмпирической оценки комплексной передаточной функции системы, основанную на применении весовых окон [5].

При идентификации частотных каналов регулирования параллельно работающих генераторов электростанции по предлагаемой методике целесообразно представлять систему так, чтобы были учтены связи агрегатов, работающих на общую системную нагрузку. Здесь необходимо отметить, что если рассматривается группа агрегатов, работающих на общие шины, то они, как правило, являются однотипными, т. е. одинаковыми по своим конструктивным данным и, следовательно, характеризуются близкими динамическими свойствами.

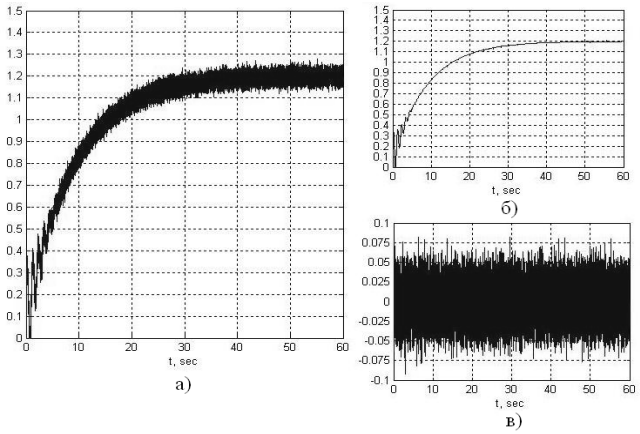


Рис. 1. Выделение шума регулятора с помощью технологии вейвлет-преобразования: а) исходный сигнал регулятора с 5% шумом; б) выделенный полезный сигнал; в) шум регулятора

Кроме этого, как указывается в [6], для устойчивости связанной системы необходимо и достаточно, чтобы были устойчивы все n однотипные входящие в цепь системы. Это обстоятельство позволяет переходить к рассмотрению такой системы как эквивалентной, что даёт возможность существенно снизить порядок характеристического уравнения и применять более простые методы идентификации и синтеза, чем это требуется для многосвязных систем. Для этого предлагается принимать один из параллельно работающих агрегатов в качестве «ведущего», представлять всю эквивалентную систему так, как показано на рис. 2, и определять одни настройки АРЧВ для всей системы.

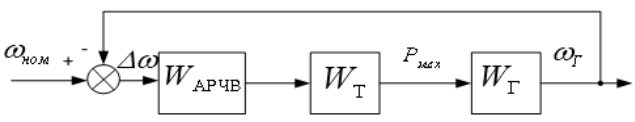


Рис. 2. Структурное представление эквивалентной системы группы параллельно работающих генераторов электростанции

Передаточные функции генератора $W_Г$ и турбины W_T находятся экспериментально в виде частотных характеристик как отношения спектров выходных и входных сигналов соответствующих звеньев с помощью алгоритма, реализованного в MATLAB [2, 3]. Здесь необходимо учесть, что каждый агрегат вносит свои колебания в систему (собственные колебания), и рабочий диапазон частот, необходимый для получения достоверной математической модели, будет определяться с учётом всех составляющих свободного движения. Для этого предлагается использовать метод, основанный на волновом подходе [7]. Согласно этому методу, «полоса пропускания» ЭЭС определяется как сумма отдельных составляющих собственных колебаний различных мод свободного движения:

$$\Omega = \sum_{i=1}^{N} \Omega_i , \qquad (2)$$

где N – число параллельно работающих генераторов электростанции; Ω_i – частота собственных колебаний системы для отдельного мода свободных движений, т. е. частота колебаний, вносимых отдельным генератором.

Устойчивость ЭЭС предлагается оценивать по показателю скорости изменения фазы характеристического годографа системы с помощью анализа кривой [8]:

$$V(\omega) = \left[\frac{d\varphi_D(\omega)}{d\omega} \right]^{-1}, \qquad (3)$$

где $\varphi_D(\omega)$ – фазово-частотная характеристика (ФЧХ), определяемая по частотному годографу системы $D(j\omega)$.

При частоте ω_p, отражающей эквивалентную частоту собственных колебаний системы, характеристика (3) определяет действительную часть некоторого эквивалентного корня, по которой можно оценивать степень устойчивости системы. При этом, как отмечается в [8], оценка (3) при частоте равной нулю позволяет определять запас апериодической устойчивости ЭЭС в целом.

Алгоритм методики оптимальной настройки систем АРЧВ генераторов электростанций, включающий в себя идентификацию ЭЭС, настройку регуляторов и оценку устойчивости, показан на рис. 3.

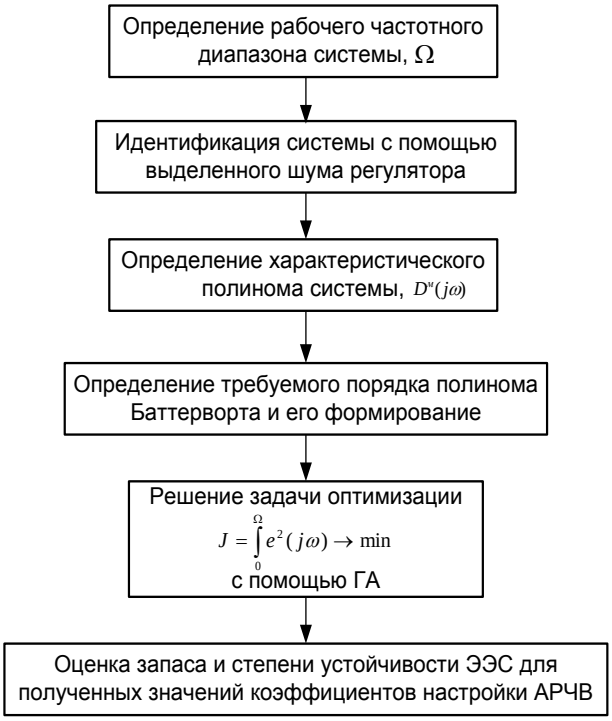


Рис. 3. Алгоритм методики оптимальной настройки систем АРЧВ

3. Апробация и анализ результатов исследования на математических моделях ЭЭС в MATLAB

Апробация предложенной методики оптимальной настройки систем АРЧВ генераторов электростанций проводилась в интегрированной среде MATLAB на созданных моделях ЭЭС, представляющих собой одно-, двух- и трёхмашинные системы, работающие на шины бесконечной мощности. Например, схема модели трёхмашинной системы в MATLAB показана на рис. 4. Данная модель состоит из различных блоков силовых элементов, реализованных в пакете SimPowerSystems: генераторы, трансформаторы, линия электропередачи, нагрузки, выключатель. Модели гидротурбин, а также систем АРЧВ типа ЭГР-2И (блоки Hydraulic Turbine and PID-regulator of speed), имеющих ПИД-закон регулирования, с возможностями изменения их параметров были созданы авторами с помощью пакета Simulink [9, 10].

Используя предложенный подход к идентификации, три однотипных агрегата были заменены одним эквивалентным, для которого была получена комплексная передаточная функция частотного канала регулирования генератора в соответствии с «полосой пропускания» системы. После этого, согласно разработанному алгоритму (рис. 3), был

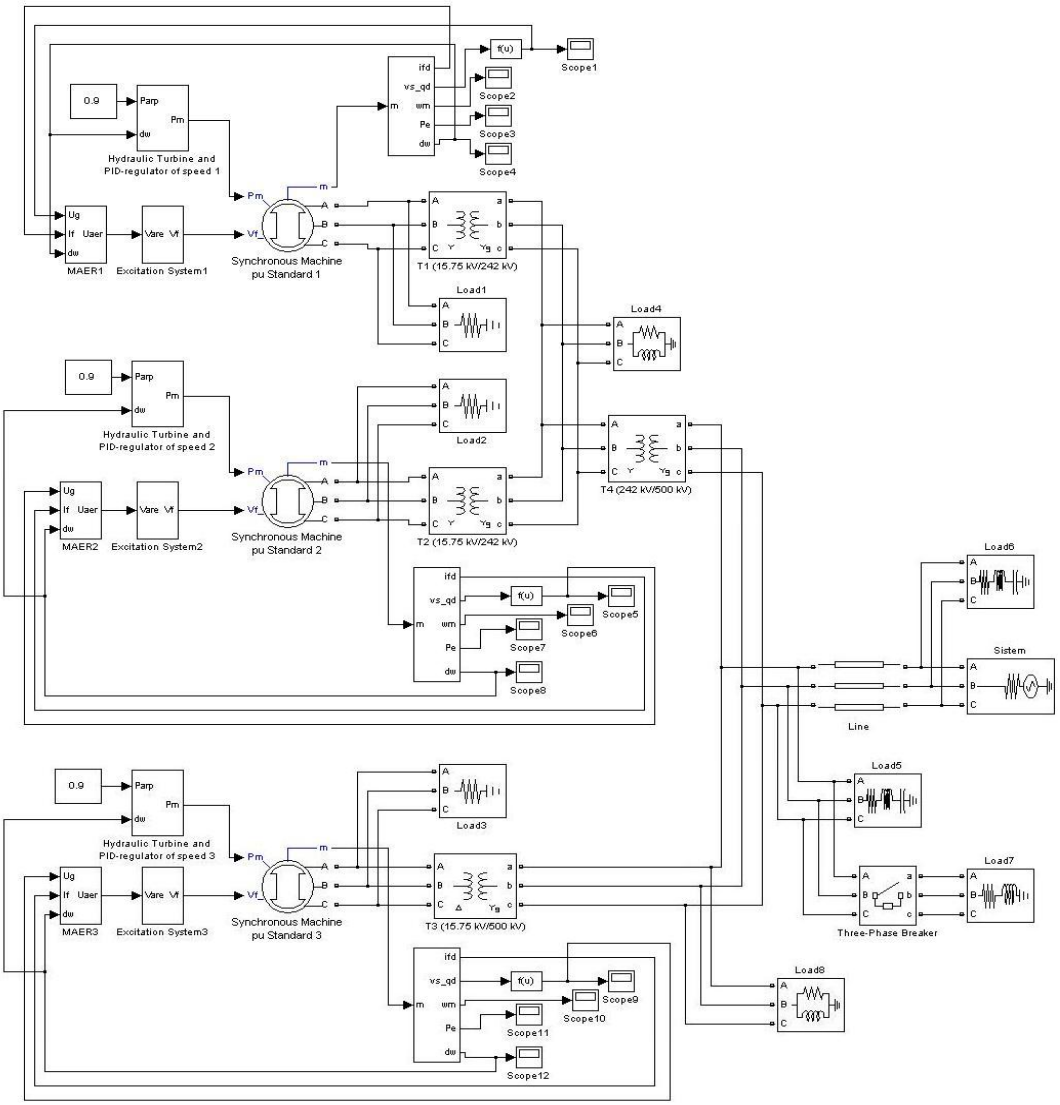


Рис. 4. Модель трёхмашинной системы в MATLAB

составлен характеристический полином исследуемой ЭЭС и определены настройки систем АРЧВ: k_p = -23,43, k_i = -2,38, k_d = 9,75.

Сравнительный анализ полученных оптимальных настроек систем АРЧВ и первоначальных настроек, при которых проходила процедура идентификации, показывает повышение степени устойчивости исследуемой ЭЭС. Кроме этого, улучшились демпферные свойства системы при электромеханических колебаниях, что видно из фрагментов осциллограмм изменения частоты вращения ротора генераторов после подключения крупного потребителя в момент времени T = 20 с (рис. 5).

4. Апробация и анализ результатов исследования на физической модели

Разработчиком физической модели, на которой проводились исследования, является Иженерно-производственный центр «Учебная техника» г. Челябинска. Данная модель представляет собой автономную электрическую систему, содержащую генератор, приводимый во вращение первичным двигателем, в качестве которого выступает машина постоянного тока. Изменяя напряжение на якоре машины постоянного тока, можно изменять частоту вращения ротора генератора. Измерение частоты производится с помощью специального блока через преобразователь угловых перемещений. Регулятор частоты вращения представляет собой идеальный ПИД-регулятор, реализованный в виде специальной программы. Любой сигнал модели через терминал, блок ввода-вывода цифровых сигналов и коннектор с помощью специальной многофункциональной платы можно получить в цифровом виде для дальнейшего использования. Исследуемая модель, структурная схема которой показана на рис. 6, может работать как в ручном, так и в автоматическом режиме управления.

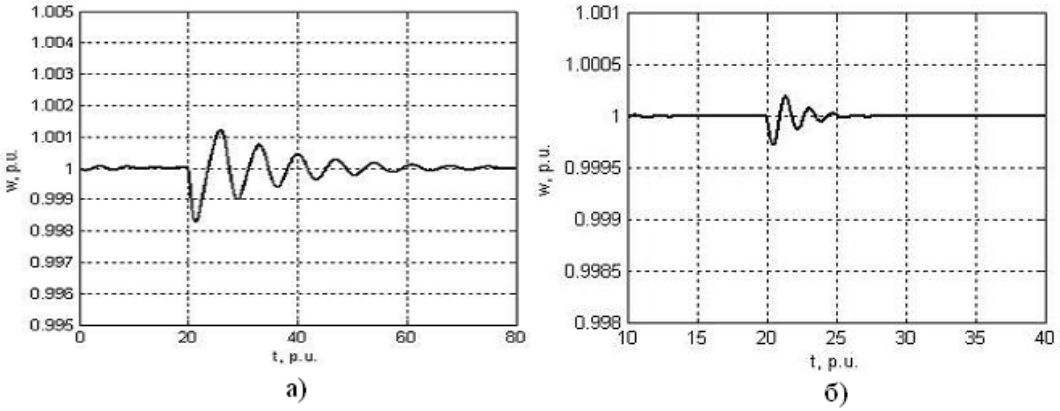


Рис. 5. Осциллограммы изменения частоты вращения ротора генератора: а) первоначальная настройка; б) оптимальная настройка систем АРЧВ

Идентификация системы проводилась в ручном режиме управления путём ступенчатого воздействия на вход (резкое повышение напряжения питания машины постоянного тока). В результате была получена переходная характеристика объекта (рис. 7).

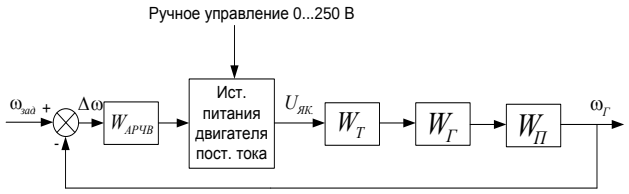


Рис. 6. Структурная схема исследуемой физической модели

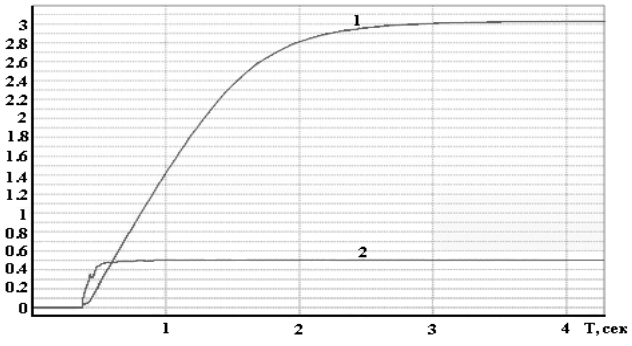


Рис. 7. Переходная характеристика объекта при ступенчатом воздействии: 1 – частота вращения синхронной машины, $\omega_г$; 2 – напряжение якоря машины постоянного тока, $U_{як}$

В соответствии с полученной характеристикой была составлена передаточная функция исследуемого объекта регулирования $W_{об} = \frac{1{,}09104}{1{,}20375p + 1}$. Затем для структурной схемы (рис. 6) исследуемой системы был сформирован характеристический полином:

$$D^M(p) = (1.20375 + 1.09104 \cdot k_d)p^2 + (1.09104 \times \times k_p + 1)p + 1.09104 \cdot k_i, \quad (4)$$

где k_p, k_i, k_d – искомые настройки системы АРЧВ.

В результате работы генетического алгоритма для соответствующего рабочего частотного диапазона исследуемой модели ($\Omega = 1.83$ Гц) были получены следующие оптимальные настройки АРЧВ: $k_p = 1.296$, $k_i = 0.572$, $k_d = 0.242$.

Сравнительный анализ оптимальных настроек системы АРЧВ и настроек, предлагаемых разработчиками по умолчанию ($k_p = 0{,}05$, $k_i = 0{,}035$, $k_d = 0$), показывает повышение степени устойчивости исследуемой физической модели ЭЭС (табл. 1). Кроме этого, улучшились демпферные свойства системы, что видно из фрагментов осциллограмм изменения частоты вращения ротора генераторов после подключения дополнительной нагрузки (рис. 8).

Таблица 1

Степень устойчивости физической модели ЭЭС при различных настройках АРЧВ

Настройки АРЧВ	Степень устойчивости, $V(\omega_р)$	Запас апериодической устойчивости, $V(0)$
По умолчанию: $k_p = 0{,}05$, $k_i = 0{,}035$, $k_d = 0$	0,0437	1,1873
Оптимальные настройки: $k_p = 1{,}296$, $k_i = 0{,}572$, $k_d = 0{,}242$	0,4468	2,2381

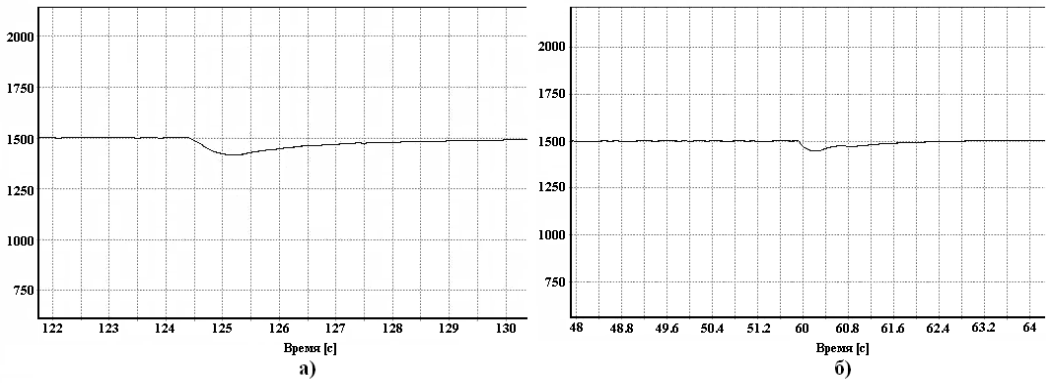


Рис. 8. Осциллограммы изменения частоты вращения ротора генератора: а) для настроек АРЧВ по умолчанию; б) для найденных оптимальных настроек

5. Выводы

Как показали исследования на математических моделях ЭЭС в MATLAB, а также на физической модели автономной электрической системы, предложенная методика оптимизации настроек автоматических регуляторов частоты вращения турбин генераторов электростанций позволяет повысить запас устойчивости электроэнергетической системы. При этом в значительной мере улучшается демпфирование электромеханических колебаний частоты в ЭЭС, возникающих в результате изменения нагрузок потребителей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Булатов Ю. Н., Игнатьев И. В. Оптимизация коэффициентов регулирования системы АРЧМ с использованием генетического алгоритма // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. № 1 (21). С. 150–153.
2. Булатов Ю. Н., Дьяконица С. А. Алгоритм непараметрической идентификации ЭЭС для получения оптимальных коэффициентов стабилизации АРВ генераторов // Тр. Братск. гос. ун-та. Сер. «Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири». Братск : БрГУ, 2009. Т. 1. С. 7–11.
3. Булатов Ю. Н., Игнатьев И. В. Определение оптимальных коэффициентов стабилизации систем АРВ и АРЧВ по непараметрическим моделям турбогенераторов электростанций // Системы. Методы. Технологии. 2009. № 3. С. 79–83.
4. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. 464 с.
5. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя : пер. с англ. / под ред. Я. З. Цыпкина. М. : Наука. Гл. ред физ.-мат. лит., 1991. 432 с.
6. Соболев О. С. Однотипные связанные системы регулирования. М. : Энергия, 1973.
7. Бушуев В. В, Лизалек Н. Н., Новиков Н. Л. Динамические свойства энергосистем. М. : Энергоатомиздат, 1995. 320 с.
8. Бушуев В. В. Динамические свойства электроэнергетических систем. М. : Энергоатомиздат, 1987. 120 с.
9. Булатов Ю. Н., Игнатьев И. В. Методика согласованной настройки систем АРВ и АРЧВ генератора // Тр. Братск. гос. ун-та: Сер. «Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири». Братск : БрГУ, 2009. Т. 1. С. 3–7.
10. Булатов Ю. Н., Игнатьев И. В. Моделирование гидротурбин и автоматических регуляторов частоты и активной мощности в среде MATLAB // Системы. Методы. Технологии. 2009. № 4. С. 67–70.

УДК 621.926

Ульянов Борис Александрович,
д. т. н. профессор кафедры ХТТ
Ангарской государственной технической академии, тел: (3955)52-23-88
Свиридов Дмитрий Петрович,
старший преподаватель кафедры УАТ
Ангарской государственной технической академии
тел: (3955)52-23-88, 8-908-655-55-50, e-mail: dmitriy999@inbox.ru
Семенов Иван Александрович,
к. т. н., доцент кафедры ХТТ
Ангарской государственной технической академии, тел: (3955)52-23-88

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КАВИТАЦИОННОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ МОЛОКА КЕДРОВОГО

D.P. Sviridov, I.A. Semenov, B.A. Ulyanov

USAGE OF CAVITATION GRINDING FOR CEDAR MILK PRODUCTION

Аннотация. *Рассмотрена возможность промышленного производства кедрового молока. Предложена принципиальная технологическая схема производства и ее аппаратурное оформление.*

Ключевые слова: *измельчение, гомогенизация, центрифугирование, стерилизация.*

Abstract. *Possibility of the cedar milk industrial production was discussed. Production principal scheme was suggested.*

Keywords: *grinding, homogenization, centrifugation, sterilization.*

Процессы измельчения и диспергирования твердых материалов имеют большое значение в химической и пищевой промышленности. Благодаря диспергированию нерастворимых компонентов удается интенсифицировать целый ряд химических и массообменных процессов. В пищевой промышленности огромное количество продуктов получают в виде эмульсий и суспензий, что значительно повышает их усвояемость, позволяет хранить и потреблять эти продукты в однородном виде [1]. С древних времен было известно целебное действие молока из кедровых орехов. Современные исследования в области медицины подтверждают ценные свойства этого продукта, обладающего мощным лечебным и профилактическим действием. Однако промышленное производство его до сих пор не осуществлено из-за недостаточной изученности процессов тонкого измельчения и отсутствия соответствующих аппаратов. Решение этой задачи имеет большое практическое значение для Восточно-Сибирского региона страны, располагающего большими запасами этого ценного сырья [2]. Производство кедрового молока включает в себя ряд стадий, связанных с измельчением исходного материала, сепарацией его и санитарной обработкой:

1. Дробление исходного материала до частиц размером 1,0 – 1,5 мм. Можно осуществлять с помощью стандартных измельчителей, изготавливаемых для пищевой промышленности.

2. Помол целесообразно осуществлять в водной среде, которая обеспечивает транспортировку материала и создает условия для кавитационного воздействия на обрабатываемый материал. На этой стадии предпочтительным является использование гидродинамической кавитации.

3. Ультразвуковая обработка взвеси служит для тонкого измельчения частиц в условиях акустической кавитации.

4. Сепарация смеси служит для отделения частиц размером более 1,5 мкм и возврата их на повторное измельчение.

5. Стерилизация предназначена для выполнения санитарных норм и обеспечения продолжительного срока хранения продукта.

Получение кедрового молока предполагает использование дробилки, мельницы, мешалки, кавитационного диспергатора, стерилизатора, упаковочного комплекса.

Нами разработана схема непрерывного процесса производства кедрового молока с измельчением твердой фазы в присутствии воды (рис. 1).

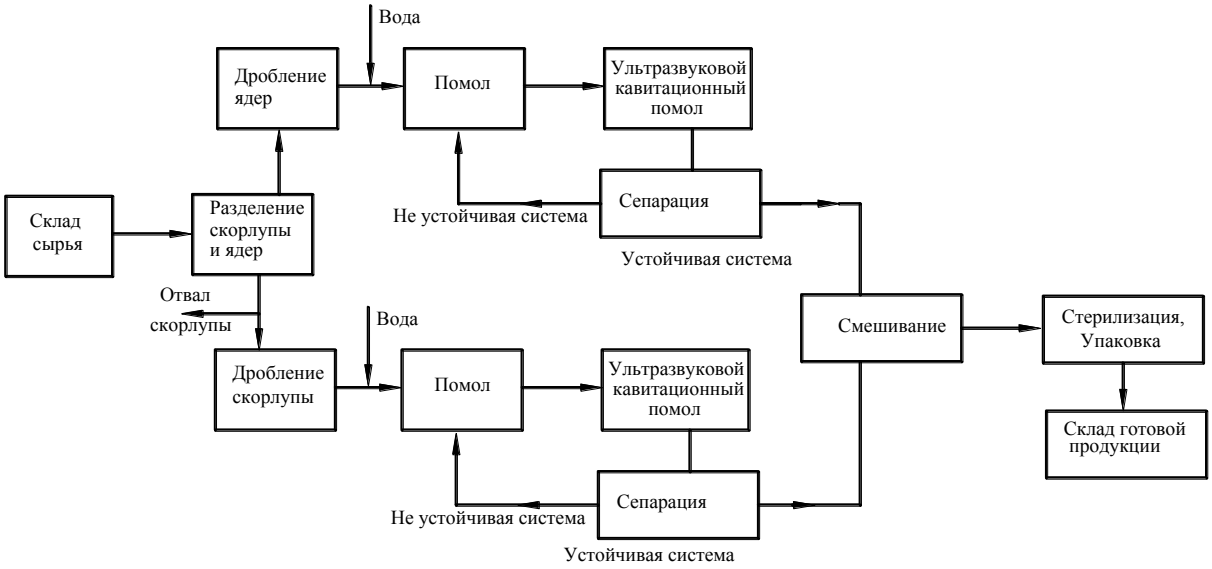


Рис. 1. Схема получения молока кедрового с дроблением и помолом в присутствии воды

Со склада сырье подается на отделение ядра от скорлупы, эта операция необходима по следующим причинам. Во-первых, готовый продукт должен содержать только четвертую часть скорлупы, содержащейся в цельном орехе, и после стадии отделения три четверти скорлупы выводится с линии. Данное содержание скорлупы в молоке обосновано органолептическими показателями.

Во-вторых, совместное измельчение липидов и тканей скорлупы неизбежно повлечет их поглощение скорлупой, что в свою очередь повлечет снижение органолептических свойств продукта.

Измельчение скорлупы требует значительно больших затрат энергии, чем измельчение ядра, в связи с этим целесообразно раздельное их измельчение.

Также, измельчение скорлупы в чистой воде более эффективно, поскольку присутствие капель липидов приведет к нерациональному рассеиванию звуковой энергии.

Далее ядро и скорлупа отдельными потоками подаются на грубое дробление первой стадии измельчения, на которой их ткани обрушиваются до частиц размером не более 3 мм в поперечнике. Это необходимо для того, чтобы подготовить параметры измельчаемой массы к помолу. На стадии помола происходит измельчение частиц ореха до размеров, позволяющих обеспечить удовлетворительную стойкость дисперсной системы, то есть достаточно стойкой для ее транспортирования по трубопроводу. Помол осуществляется в присутствии воды, в соотношении 1 массовая доля ядра на 7 – 8 массовых долей воды, а скорлупа 1 к 5 – 6. Далее дисперсные системы направляются в ульразвуковой кавитационный измельчитель-диспергатор для коллоидного помола. После чего оба потока перемешивают и молоко подается на стерилизацию и упаковку.

Измельчители, удовлетворяющие требованиям к измельченному ореху с частицами до 1,5 мм в поперечнике, широко представлены в современной пищевой промышленности.

Мельницы серии УИМ-2 или УИМ-2С (РФ) используются для измельчения широкого диапазона продуктов и материалов с различными свойствами: прочность, хрупкость, вязкость, жирность, волокнистость. Фракции измельчения, в среднем, от 20 до 8000 мкм (0,02 ÷ 8 мм), в зависимости от вида продукта. Размер кусков сырья на входе до 25 мм.

Такие мельницы представляют собой дезинтегратор – устройство с четырьмя роторами различного диаметра, которые вставлены друг в друга по принципу «матрешки». Два ротора вращаются в одну сторону, а два – в противоположную. В стенках роторов выполнены отверстия. Частицы сырья поступают в центральную часть устройства (в ротор наименьшего диаметра). Под воздействием центробежных сил частицы проходят через отверстия в роторах к периферии. Во время движения частицы многократно соударяются с элементами ротора, друг с другом и измельчаются. В специальных мельницах используются износостойкие пластины, многократно повышающие стойкость измельчающих рядов.

На этой стадии измельчения может быть использована также высокоэффективная конусная дробилка HCS 90, выпускаемая компанией «Лимин» (КНР). В ней реализован принцип дробления и смятия между дробильными материалами. Этот

принцип обеспечивает высокую равномерность получаемой фракции. Форма получаемых частиц оказывается близка к равноосной и практически исключается игловидная форма измельченных частиц.

Наиболее сложной и энергоемкой стадией является измельчение твердых частиц и получение устойчивой суспензии. Выполненные нами исследования показали, что частицы размером ~ 1,5 мкм и менее, обеспечивающие кинетическую устойчивость взвеси, можно получить путем кавитационной обработки. Причем кавитационное измельчение целесообразно сочетать с механическим, приводящим к разлому частиц и образованию микротрещин.

Мы поставили перед собой задачу разработать аппарат для измельчения взвешенных в жидкости частиц различного происхождения с возможностью регулирования гранулометрического состава продуктов измельчения и с возможностью быстрой и легкой разборки для проведения регулярных профилактических работ. Рабочие органы аппарата должны препятствовать образованию заторов. Скорость движения взвеси в аппарате должна быть постоянной и достаточной для поддержания частиц во взвешенном состоянии. Измельчающие рабочие органы машины (ребра) должны быть оптимально приспособлены к измельчению частиц текущего размера.

Предлагаемое устройство состоит из конического ротора, состоящего из верхнего и нижнего конуса (рис. 2) [3], статора, также состоящего из верхнего и нижнего конуса, рамы, привода, картера, станции регулировки положения ротора относительно статора, штуцера ввода взвеси, штуцера вывода продукта измельчения, крепежа статора. При этом на рабочих поверхностях статора и ротора выполнены ребра.

Работа измельчителя осуществляется следующим образом. Включается привод 4, исходная взвесь подается в штуцер подвода сырья 7, которая далее движется вниз в зазоре между статором и ротором в зоне верхних конусов. Взвешенные частицы, попадая на ребра статора и ротора, разламываются, т. е. измельчаются механически. Далее взвесь движется в зазоре между статором и ротором в зоне нижних конусов, где высота ребер меньше, а линейная скорость ребер достигает значения, при котором возникает кавитация. Таким образом, в зоне нижних конусов измельчение идет как механически, так и за счет кавитации. Далее продукт измельчения поступает в картер, откуда отводится через штуцер отвода продуктов измельчения. При этом взвесь может двигаться внутри аппарата за счет центробежных сил, развиваемых вращающимся ротором.

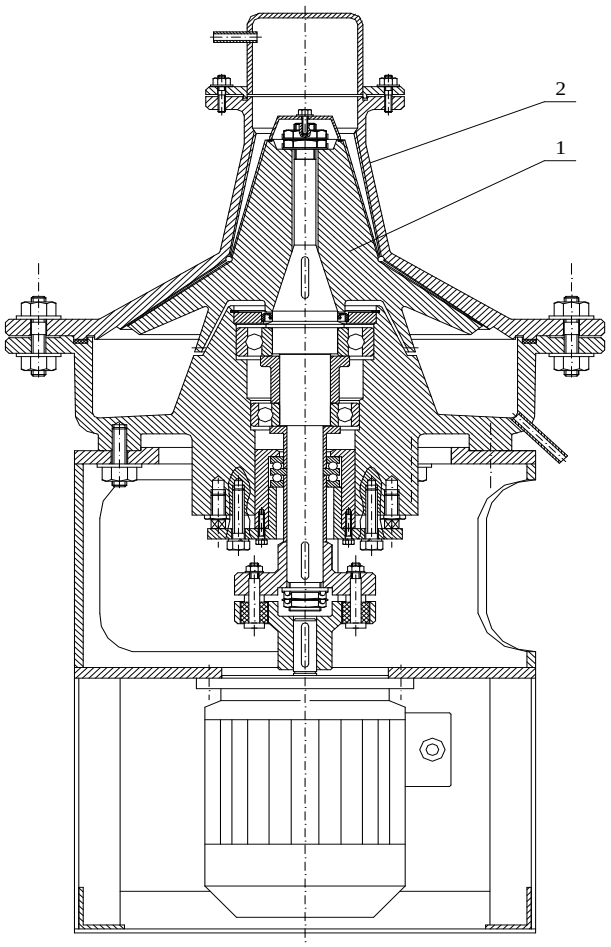


Рис. 2. Измельчитель конусно-кавитационный

При снятии крепежных болтов статора и ротора и подъеме статора открывается доступ ко всем рабочим частям измельчителя, что позволяет производить профилактические мероприятия.

Окончательное диспергирование частиц и получение устойчивой взвеси осуществляется в ультразвуковом лабиринтном гомогенизаторе [6]. Названный аппарат разработан нами для обработки молока кедрового ультразвуком. При этом предусмотрена возможность регулирования расхода обрабатываемой среды и регулирования времени воздействия облучения на обрабатываемую среду.

Крупные частицы, размер которых превышает 1,5 мкм, отделяются в центрифуге с регулируемым отбором продуктов разделения (рис. 3) [4] и возвращаются на стадию помола.

Мы поставили перед собой задачу разработать конструкцию центрифуги непрерывного действия для отделения из взвеси кедрового молока именно той фракции частиц, которая не соответст-

вует условию устойчивости с соблюдением следующих требований:

1. Возможность регулирования фракционного состава продуктов разделения.
2. Возможность регулирования производительности аппарата.
3. Возможность быстрой разборки и сборки рабочих частей центрифуги для осуществления регулярных профилактических мероприятий.
4. Возможность регулирования фракционного состава продуктов разделения.
5. Возможность регулирования производительности аппарата.
6. Возможность быстрой разборки и сборки рабочих частей центрифуги для осуществления регулярных профилактических мероприятий.

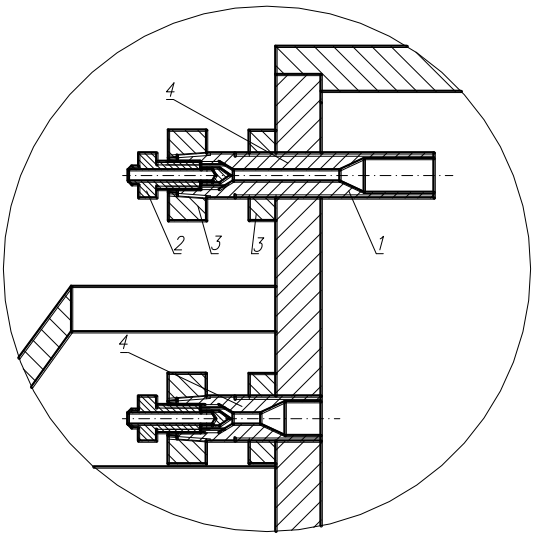


Рис. 3. Устройство клапанов отбора фракций (вид I с рис. 4)

Центрифуга снабжена приводом, позволяющим плавно регулировать частоту вращения рабочего барабана за счет плавного изменения частоты вращения электродвигателя, что позволяет регулировать производительность аппарата при различных расходах молока. При этом рабочий барабан снабжен регулируемыми клапанами отбора продуктов разделения 4 (рис. 3) которые обеспечивают регулируемую высоту отбора продуктов разделения и их расход. Это позволяет приспособить аппарат для работы с различным по составу молоком, причем рабочий барабан может быть снабжен двумя, тремя или более рядами указанных клапанов по числу фракций, которые необходимо отделить. При этом каждый ряд клапанов настраивается на отбор одной из фракций. Клапаны отбора продуктов разделения состоят из корпуса 1, иглы 2 и контргаек 3. Контргайка иглы имеет коническую резьбу, а ответная резьба на корпусе имеет разрез для компенсации деформаций. Такое устройство клапанов позволяет плавно регулировать параметры отбираемых продуктов разделения и обеспечивает его надежную работу.

Работа центрифуги осуществляется следующим образом (рис. 4) включается электропривод 7, кедровое молоко подается от ультразвукового гомогенизатора в трубу подвода сырья 8, по которой оно движется к центру днища 15 рабочего барабана и попадает на ребра 14, посредством которых вовлекается во вращательное движение вместе с барабаном и прижимается центробежными силами к обечайке барабана, где начинается осаждение более тяжелых частиц и всплытие более легких фракций.

Под действием вновь поступающего от гомогенизатора молока массы взвеси движутся к верхней части барабана вдоль образующих цилиндра барабана. При этом скорость вращения барабана такая, что нижний слой движущейся массы, обогащенной тяжелыми фракциями, не будет смешиваться с верхним слоем, обогащенным легкими фракциями. В верхней части барабана расположены клапаны отбора тяжелых и легких фракций. Возможна установка дополнительных рядов клапанов отбора промежуточных фракций. Предусмотрена возможность настраивать желаемую высоту отбора необходимой фракции вращением корпуса клапана в резьбовом отверстии обечайки. Во время работы центрифуги массы, обогащенные легкими фракциями, сливаются в отверстия клапанов, находящиеся на более высоком уровне, а массы, обогащенные более тяжелыми частицами орехов, сливаются в отверстия клапанов, расположенные на более низком уровне. При настройке сливных клапанов необходимо установить желаемый расход каждой фракции, вращая иглы 2 (рис. 4, 5), прикрывая или открывая этим отверстие канала в корпусе клапана.

Приемные камеры продуктов разделения снабжены быстросъемными эксцентриковыми затворами, предназначенными для быстрого и легкого отъема названных камер для доступа к частям центрифуги, требующим регулярной промывки и стерилизации.

Таким образом, сочетая вышеуказанные способы регулировки клапанов с регулировкой частоты вращения барабана и расходом сырьевой взвеси молока, можно настроить центрифугу на работу с желаемой производительностью и необходимым гранулометрическим составом каждой отбираемой фракции.

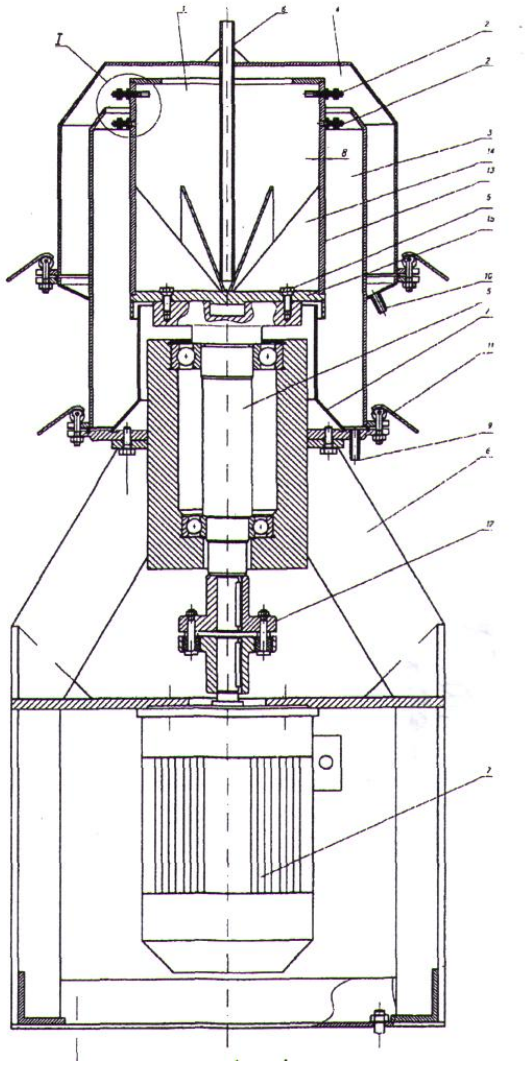


Рис. 4. Центрифуга с регулируемым отбором продуктов разделения

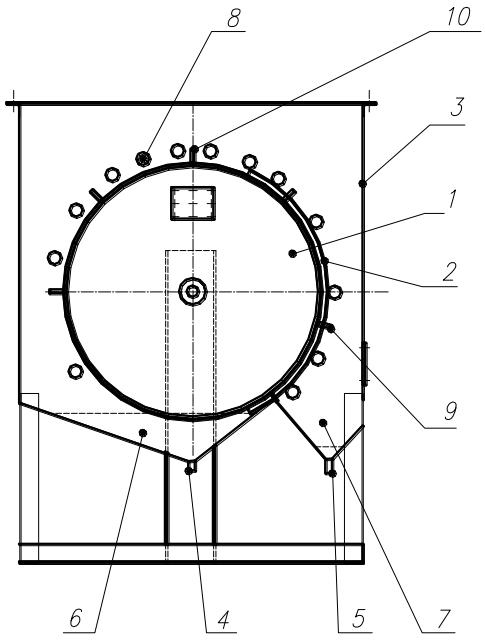


Рис. 5. Стерилизатор барабанный

В устройствах для стерилизации жидкостей облучением ультрафиолетовыми лучами в тонкой пленке, известных ранее, основной причиной недостаточной стерилизации всего объема жидкости является сравнительно большая толщина текучей пленки жидкости. Текучая пленка жидкости предполагает наличие в ее толщине, по крайней мере, нескольких элементарных слоев жидкости, способных двигаться самотеком, преодолевая силы вязкости за счет силы гравитации. Поэтому излучение может не достигать нижних слоев движущейся пленки, в результате чего не обеспечивается стерилизация нижних слоев жидкости.

Для осуществления низкотемпературной стерилизации кедрового молока нами была поставлена задача разработать аппарат для стерилизации непрозрачного продукта облучением ультрафиолетовыми лучами, с гарантированным и равномерным облучением всего объема обрабатываемой жидкости, при температуре, не допускающей деструкцию ингредиентов молока, что очень важно для его белковых и других структур.

Нами предложено устройство (рис. 5) [5], состоящее из барабана-носителя 1, желоба 2, корпуса 3, штуцера ввода нестерильной жидкости 4, штуцера отвода стерильной жидкости 5, резервуара для нестерильной жидкости 6, резервуара для стерильной жидкости 7, источников стерилизующего излучения 8, ножа съемника 9, ножа распределителя 10.

Работа устройства осуществляется следующим образом. Молоко кедровое подводят в резервуар 6 через штуцер 4. Уровень жидкости поддерживается на высоте, достаточной для смачивания обечайки барабана 1. Барабан 1 вращается приводом (на рисунке условно не показан). Обечайка и борт барабана 1 смачиваются жидкостью, находящейся в резервуаре 6, которая образует текучую пленку. Жидкость двигается вместе с барабаном в сторону ножа распределителя 10, за счет которого снимаются излишки взвеси и сливаются по ножу 10 обратно в резервуар 6.

Оставшаяся тонкая нетекучая пленка жидкости, находясь на обечайке барабана 1, проходит под источниками ультрафиолетового облучения, за счет которого и происходит стерилизация молока. Достигнув ножа съемника 9, взвесь снимается с обечайки барабана и по этому же ножу стекает в резервуар для стерильной жидкости 7. Желоб 2 не позволяет жидкости, находящейся на торцах и бортах барабана, сливаться в резервуар для стерильного молока 7, а направляет ее в резервуар для нестерильной жидкости.

Для исключения окислительных реакций аппарат может продуваться инертным к кедровому молоку газом. Изменяя скорость вращения барабана, можно регулировать толщину пленки жидкости и производительность аппарата.

Таким образом, предложенный нами стерилизатор позволяет решить поставленную нами задачу о низкотемпературной стерилизации кедрового молока.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агранат Б. А., Башкиров В. И. Ультразвуковая технология // М. : Металлургия, 1974. 504 с.
2. Азаров Б. М., Васильев А. А., Будаев Ю. С. Пищевая ценность ореха кедра сибирского и направления его использования в кондитерской и хлебопекарной промышленности // Биохим. и технолог. процессы в пищевой промышленности. Улан-Удэ, 1985. С. 48–53.
3. Пат. 2329867 RU C2, МПК B 02 C 2/10. Измельчитель конусно-кавитационный / Свиридов Д. П., Ульянов Б. А., Сучков Д. Н., Кущин А. А. 2008, Бюл. №21.
4. Пат. 2322306 RU C2, МПК B 04 B 11/00. Центрифуга с регулируемым отбором продуктов разделения / Свиридов Д. П., Ульянов Б. А., Сучков Д. Н., Кущин А. А. 2008, Бюл. № 11.
5. Пат. 2328311 RU C2, МПК A 61 L 2/08. Стерилизатор непрозрачных и других жидкостей в ультратонкой пленке барабанный / Свиридов Д. П., Сучков Д. Н., Кущин А. А. 2008, Бюл. № 19.
6. Патент 2325231 RU C2, МПК B 02 C 19/18. Гомогенизатор ультразвуковой лабиринтный / Свиридов Д. П., Ульянов Б. А., Сучков Д. Н., Кущин А. А. 2008, Бюл. № 11.

УДК 62-752

Говердовский Владимир Николаевич,
кафедра технологии транспортного машиностроения и эксплуатации машин,
Сибирский государственный университет путей сообщения
тел.: (383) 328–0427, 8-905-951-9880; e-mail: vova57ng@yahoo.com

Бабенков Владимир Валерьевич,
Западносибирская дирекция по ремонту тягового подвижного состава, г. Новосибирск

Говердовский Павел Владимирович,
Кафедра технологии транспортного машиностроения и эксплуатации машин,
Сибирский государственный университет путей сообщения
тел.: (383) 328–0427, 8-905-951-9880; e-mail: vova57ng@yahoo.com

Смородин Юрий Николаевич,
Западносибирская дирекция по ремонту тягового подвижного состава, г. Новосибирск

Трофимов Андрей Николаевич,
Кафедра технологии транспортного машиностроения и эксплуатации машин,
Сибирский государственный университет путей сообщения
тел.: (383) 328–0427, 8-905-951-9880; e-mail: vova57ng@yahoo.com

СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ ВИБРОЗАЩИТНЫХ СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

V.N. Hoverdovsky, V.V. Babenkov, P.V. Hoverdovsky, U.N. Smorodin, A.N. Trofimov

RAILWAY ROLLING STOCK VIBRATION PROTECTING SYSTEMS STRUCTURAL SYNTHESIS

Аннотация. *Рассматривается метод структурного синтеза элементов многокаскадных виброзащитных систем объектов обычного и скоростного подвижного состава. Сущность метода заключается в наслоении избыточных кинематических цепей и механизмов, способных генерировать свойство «отрицательной» жесткости. Эффективность метода иллюстрируется применительно к синтезу подвесок для сидений операторов. Обсуждается возможность применения метода к задачам совершенствования современных и создания перспективных подвесок локомотивных и вагонных тележек.*

Ключевые слова: *структурный синтез, механизм преобразования движения, виброзащитная система.*

Abstract. *The paper presents a method of type and number synthesis of elements for multistage vibration protecting systems of vehicles of regular and high-speed rolling stock. The method consists in joining redundant kinematic chains and mechanisms that enable generating "negative" stiffness. Efficiency of the method is illustrated with reference to the synthesis of suspensions for the operator seats. It is the subject of a speculation that concerns a certain feature for the method with reference to upgrade of recent suspensions and prospective ones for locomotive and car trucks.*

Keywords: *type and number synthesis, function-generation mechanism, vibration protecting system.*

Введение

Синтез механизмов, способных генерировать свойство «отрицательной» жесткости, и их введение в структуру виброзащитных систем (ВЗС) открывает неограниченные возможности повышения качества виброзащиты. Механизмы преобразования движения (МПД) как структурные элементы ВЗС играют важную роль в достижении необходимого качества. МПД должен обеспечивать рациональную схему компоновки ВЗС и взаимодействие ее структурных элементов в процессе преобразования входного движения в требуемое движение на выходе ВЗС. Наряду с этим МПД для ВЗС с «отрицательной» жесткостью должен не увеличивать количество структурных связей, снижающих чувствительность механической системы, и минимизировать влияние хаотических вибраций механизмов с «отрицательной» жесткостью на закон движения ВЗС [1].

В статье рассматривается метод структурного синтеза МПД, которые могут обеспечить генерирование свойства «отрицательной» жесткости в железнодорожных ВЗС. Сущность метода заключается во введении структурной избыточности путем наслоения избыточных элементов на структуру исходного МПД с тем, чтобы генерировать свойство в заданном направлении движения ВЗС при рациональных значениях структурных характеристик избыточного МПД (или, иначе, МПД-претендента). Практические возможности метода иллюстрируются применительно к задачам модернизации существующих и проектирования перспективных ВЗС сидений для членов локомотивных бригад, а также ВЗС локомотивных и вагонных тележек.

Структурная избыточность мпд

Для синтеза МПД-претендентов, содержащих избыточные структурные элементы, способные генерировать свойство «отрицательной» жесткости, могут быть использованы основные положения общей теории структуры механизмов [2]. Наряду с этим введем понятия: структурный элемент, или элемент, подсистема и система. Под элементом здесь понимается звено или кинематическая пара (КП). Подсистема – кинематическая цепь (КЦ) механизма, система – проектируемый механизм. Введем также следующие начальные условия: (а) количественные значения структурных характеристик исходных МПД и МПД-претендентов касаются прежде всего механизмов с одной степенью свободы, т. е. $W=1$; (б) МПД-претенденты должны иметь параллельную структуру, т. е. рассматриваются лишь схемы, в которых есть несколько КЦ, т. к. механизмы должны выдерживать воздействие сил и моментов большой величины; (в) основные КЦ (ОКЦ) и избыточные КЦ (ИКЦ) включают как низшие КП (НКП), так и высшие КП (ВКП).

Для исследования структурных характеристик можно использовать формулы вида:

$$W=6(m-1)-\sum_{i=1}^{3}(6-i)\cdot p_{(6-i)} \qquad (1)$$

Здесь $m=n+1$ – общее число звеньев, где n – число подвижных звеньев, $p_{(6-i)}$ – общее число НКП и ВКП i-й подвижности.

Преобразуем формулу (1) к более удобному для анализа универсальному виду:

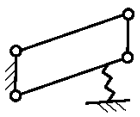
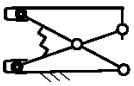
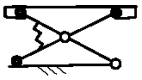
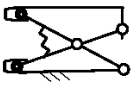
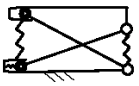
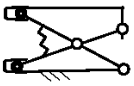
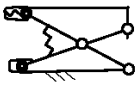
$$W=6(1-n_{KC})+\sum H_i \qquad (2)$$

Здесь n_{KC} – общее число КЦ, $\sum H_i$ – общее число степеней свободы (ЧСС) КП i-й подвижности.

МПД-претендент может быть получен путем введения избыточных ЧСС, КЦ, упругих элементов с приводом (УЭ), или, иначе, избыточных механизмов (ИМ). Под избыточным здесь понимается такой структурный элемент ВЗС, удаление ко-

Таблица 1

Введение избыточности разного уровня

Вид избыточности	Структурная схема		Структурные числа	
	Исходный	Избыточный	Исходный МПД	Избыточный МПД
Избыточное ЧСС			$W=1;\ n_{KC}=2;$ $n_{S(KC)}=1;\ n=3;$ $p_{5(KC)}=4;\ n_{4(KC)}=0$	$W=2;\ n_{KC}=2;$ $n_{S(KC)}=2;\ n=3;$ $p_{5(\delta)}=3;\ n_{4(KC)}=1$
Избыточная КП			$W=1;\ n_{\delta}=2;$ $n_{S(KC)}=1;\ n=5;$ $p_{5(KC)}=7;\ n_{4(KC)}=0$	$W=2;\ n_{KC}=2;$ $n_{S(KC)}=2;\ n=6;$ $p_{5(KC)}=8;\ n_{4(KC)}=0$
Избыточная КЦ			$W=1;\ n_{KC}=2;$ $n_{S(KC)}=1;\ n=5;$ $p_{5(KC)}=7;\ n_{4(KC)}=0$	$W=2+1;\ n_{KC}=4;$ $n_{S(KC)}=3;\ n=5;$ $p_{5(KC)}=6;\ n_{4(KC)}=0$
Избыточный УЭ с приводом (ИМ)			$W=1;\ n_{KC}=2;$ $n_{S(KC)}=1;\ n=5;$ $p_{5(KC)}=7;\ n_{4(KC)}=0$	$W=1;\ n_{KC}=2;$ $n_{S(KC)}=2;\ n=5;$ $p_{5(KC)}=7;\ n_{4(KC)}=0$

Примечание: n_{KC} – число КЦ в МПД, $n_{S(KC)}$ – число УЭ в одной КЦ, $p_{5(KC)}$ и $p_{4(KC)}$ – числа НКП и ВКП в одной КЦ

торого не приводит к ее отказу в виде, например, уменьшения ЧСС, снижения точности позиционного управления движением выходного звена, ухудшения исходных упругих свойств или изменения размеров рабочего пространства ВЗС.

В свою очередь, увеличение ЧСС можно получить, например, путем введения избыточных КП. Избыточные КЦ могут быть сформированы за счет: (а) добавления пассивных КП; (б) присоединения КЦ; (в) преобразования пассивной КП (добавление датчика относительных перемещений) в активную КП; (г) формирования активной КЦ из пассивной КЦ (добавление привода). Добавление датчика относительных перемещений к пассивной КП или избыточной пассивной КЦ с датчиком повышает чувствительность МПД. Это важно для достижения одной из конечных целей синтеза ВЗС с «отрицательной» жесткостью, заключающейся в минимизации основных частот ВЗС:

$$f_0=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k_{\Sigma}}{M}}=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{n_g g}{z}}\to\min, \qquad (3)$$

где k_{Σ} – интегральная жесткость ВЗС, M – подрессоренная масса ВЗС; $n_g\in(0;1]$ – коэффициент гравитации; g – ускорение свободного падения; z – рабочий ход (подвижность МПД в направлении «отрицательной» жесткости).

Подходы (а)–(б) могут быть реализованы при дополнительных условиях, препятствующих снижению показателей качества. В частности, недопустимо снижение точности позиционного управления движением выходного звена МПД, увеличение сил трения, уменьшение размеров рабочего пространства ВЗС.

В этой связи присоединение ИКЦ требует, прежде всего, инвариантности ЧСС МПД до и после присоединения ИКЦ [3]:

$$W=W_1+W_2=in\,\mathrm{var}. \qquad (4)$$

Здесь W_1 и W_2 – ЧСС исходного МПД и МПД-претендента.

Это означает, что ИКЦ должна иметь нулевое или отрицательное ЧСС: $H_{RKC}=\{0,-1,...\}$. В дополнение к условию (4), число избыточных структурных связей q_{RC} в МПД-претенденте не должно, по меньшей мере, увеличиваться в сравнении с исходным МПД, т. е.

$$q_{RC}=W_1+W_2-s\cdot n+\sum_{i=1}^{s-1}(6-i)\,p_{(6-i)}\le q_{RC}^{(1)}. \qquad (5)$$

Здесь $\sum(6-i)p_{(6-i)}$ – основные структурные связи пространственного $(s=6)$, или плоского $(s=3)$, МПД-претендента.

Несложно показать, что, варьируя значения структурных чисел в формуле (5), можно получить ИКЦ, в которой $q_{RC} \le 0$.

Подход (в) повышает добротность КП, т. к. снижение качества этой – вновь сформированной – КП может быть идентифицировано по информации с датчика, например путем контроля предельных значений кинематических характеристик МПД-претендента с помощью программируемого микропроцесса. Уменьшение ЧСС из-за ограничений рабочего пространства ВЗС может быть проверено подобно контролю ограничений КП и взаимовлияния КЦ.

Наконец, целесообразность введения избыточной активной КЦ, т. е. подход (г), и возможность ее существования в МПД могут быть проверены с помощью ряда критериев, включая критерий невырожденности МПД [4].

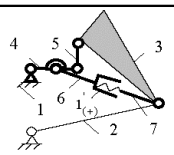
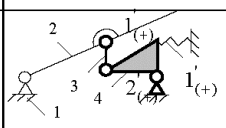
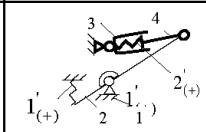
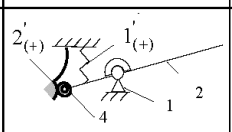
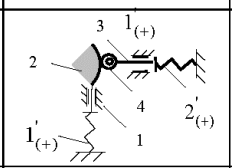
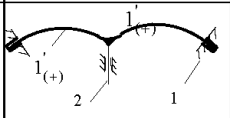
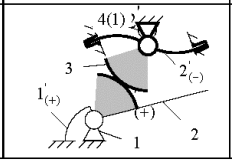
Структура МПД-претендентов для транспортных ВЗС

Развитие МПД для ВЗС с «отрицательной» жесткостью началось с 1960-х годов и дало немалое количество технических решений [5, 6]. Однако этот процесс проходил по большей части эмпирически. Поэтому немногие МПД имеют рациональную структуру и, как следствие, способны генерировать свойство «отрицательной» жесткости (см. табл. 2).

Таким образом, методы структурного синте-

Таблица 2

Простейшие ВЗС с «отрицательной» жесткостью [1]

№	Структурная схема	Метод структурного синтеза ВЗС с «отрицательной» жесткостью	Структурные числа	Условие подвижности в направлении «отрицательной» жесткости
1	2	3	4	5
1		Синтез ИКЦ, содержащей звенья 5-7 и связанной со звеньями 2–3 ОКЦ и УЭ типа $1'_{(+)}$	n = 6, $p_5 = 8$, $p_4 = 0$, $W_1 = 1$, $W_2 = 0$	Общая неустойчивость ИКЦ
2		Синтез ИКЦ, содержащей звенья 3-4 и связанной со звеном 2 ОКЦ, а также УЭ типа $1'_{(+)}$	n = 3, $p_5 = 4$, $p_4 = 0$, $W_1 = 1$, $W_2 = 0$	Общая неустойчивость ИКЦ
3		Синтез ИКЦ, содержащей, по меньшей мере, звенья 3–4 и связанной со звеном 2 ОКЦ и УЭ типа $1'_{(+)}$ и $2'_{(+)}$	n = 3, $p_5 = 4$, $p_4 = 0$, $W_1 = 1$, $W_2 = 0$	Общая неустойчивость ИКЦ
4		Синтез ИКЦ, содержащей, по меньшей мере, звено 3 и связанной со звеном 2 ОКЦ и УЭ типа $1'_{(+)}$ и $2'_{(+)}$	n = 2, $p_5 = 2$, $p_4 = 1$, $W_1 = 1$, $W_2 = 0$	Локальная неустойчивость ОКЦ
5		Синтез ИКЦ, содержащей, по меньшей мере, звенья 3–4 и связанной со звеном 2 ОКЦ и УЭ типа $1'_{(+)}$ и $2'_{(+)}$	n = 3, $p_5 = 3$, $p_4 = 1$, $W_1 = 1$, $W_2 = 1$	Локальная неустойчивость ОКЦ
6		Синтез УЭ типа $1'_{(+)}$, которые могут иметь «отрицательную» жесткость при закритическом деформировании «в малом»	n = 1, $p_5 = 1$, $p_4 = 0$, $W_1 = 1$, $W_2 = 0$	Локальная неустойчивость УЭ типа $1'_{(+)}$
7		Синтез ИМ, содержащего УЭ типа $2'_{(-)}$ с «отрицательной» жесткостью при закритическом деформировании «в большом» и ИКЦ для присоединения ИМ к ОКЦ	n = 2, $p_5 = 2$, $p_4 = 1$, $W_1 = 1$, $W_2 = 0$	Общая неустойчивость УЭ типа $2'_{(-)}$

Примечание: $1'_{(+)}$ и $2'_{(+)}$ – типы УЭ с «положительной» жесткостью, $2'_{(-)}$ – тип УЭ с «отрицательной» жесткостью.

за ВЗС с «отрицательной» жесткостью можно классифицировать следующим образом:

(1) Синтез ИКЦ, присоединяемой к ОКЦ и связанной с ней основным $1'_{(+)}$ и избыточным $2'_{(+)}$ УЭ с «положительной» жесткостью.

(2) Синтез ИМ, УЭ $1'_{(+)}$ которого может иметь «отрицательную» жесткость при закритическом деформировании «в малом».

(3) Синтез ИМ, снабженный УЭ $2'_{(-)}$ с «отрицательной» жесткостью при закритическом деформировании «в большом» ИКЦ для присоединения ИМ к ОКЦ исходного МПД.

Термины «в малом» или «в большом», в соответствии с теорией устойчивости, означают, что закритические деформации УЭ являются, соответственно, малыми или большими относительно их геометрических размеров в направлении «отрицательной» жесткости [7].

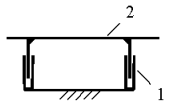
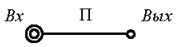
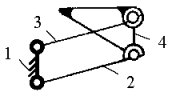
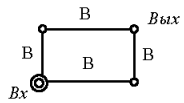
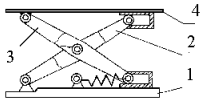
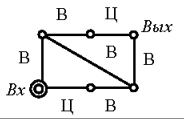
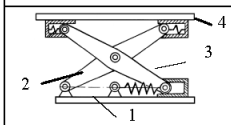
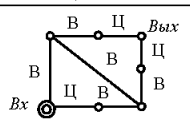
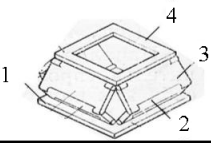
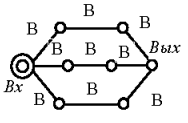
ВЗС операторов железнодорожного подвижного состава

В наземных транспортных и самоходных технологических машинах, несмотря на значительное количество конструктивных особенностей, можно различить шесть основных типов плоских и пространственных МПД для подвесок сидений операторов [5, 6]. В табл. 3 показаны серийные образцы подвесок известных типов, которые применяют или планируют применить в сиденьях для виброзащиты локомотивных бригад. Структурные схемы подвесок расположены в порядке увеличения их сложности. Для удобства решения задач структурного синтеза каждый МПД представлен в виде меченого графа [8], в котором грани – КП, а вершины – звенья. В каждом графе вершина *Вх* означает стойку, вершина *Вых* – выходное звено, грани *П* или *В* – поступательную или вращательную КП; *Ц* – центроидную КП. Строка 1 показывает МПД $(П)_N$-типа, где каждый из N-контуров ОКЦ содержит одну поступательную КП, соединяющую вход и выход. Строка 2 – МПД $(BBBB)_N$-типа. В строке 3 представлен МПД $(B2(BBЦ))_N$-типа, содержащий избыточные вращательные КП, чтобы уменьшить трение в относительном движении звеньев. Здесь же показан его вариант $(B2(BBЦ)Ц)_N$-типа, увеличивающий ЧСС МПД на единицу. Наконец, в строке 4 – МПД $(BBB)_{3N}$-типа, где $N \geq 2$ – число контуров.

Используя метод наслоения избыточных структурных элементов (ИКЦ, ИМ), можно получить атлас МПД-претендентов для ВЗС с «отрицательной» жесткостью. При этом выбор рациональ-

Таблица 3

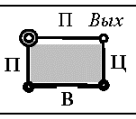
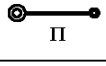
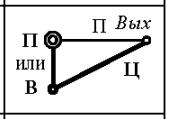
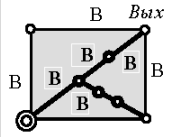
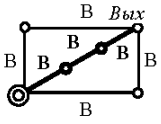
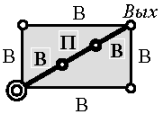
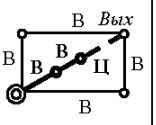
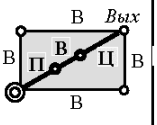
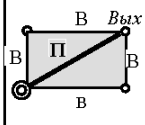
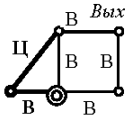
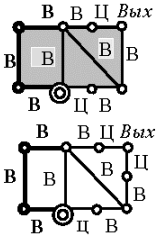
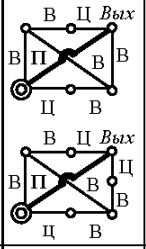
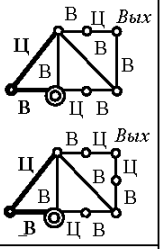
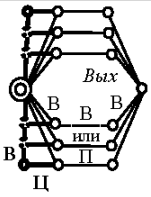
Подвески сидений для членов локомотивных бригад [1]

№	Серийный образец	Разработчик	Структурная схема	Граф МПД
1		Comfort Ride Inc. (США)		
2		Bostrom, KAB//Seating (Англия); Industrial Seats Co. и Seats Inc. (США)		
3		Grammer AG (Германия); Industrial Seats Co., Motion Master, National Seating и Seats Inc. (США)		
				
4		Институт машиноведения РАН (Россия)		

Примечание: 1 – стойка, 2–4 – входное, промежуточные и выходное звенья; *П*, *В* – НКП, *Ц* – ВКП; ◎ – вершина (стойка), ○ – вершина (подвижное звено), \ – грань (КП).

Таблица 4

ВЗС с «отрицательной» жесткостью: атлас МПД-претендентов для подвесок сидений [1]

Исходные МПД из табл. 3	Избыточные структурные элементы (ИКЦ и ИМ) из табл. 2						
	1	2	3	4	5	6	7
1							
2							
3							
4							

Примечание: здесь и далее, структурные элементы, обеспечивающие генерирование свойства «отрицательной» жесткости, выделены цветом.

ных значений и контроль структурных характеристик МПД-претендентов удобно выполнять путем их перестановок по формулам (2) и (5).

В табл. 4 представлены примеры синтеза МПД-претендентов для подвесок сидений. Схемы получены путем поочередного присоединения ИКЦ или ИМ из табл. 2 к каждому исходному МПД из табл. 3.

Следует отметить, что в табл. 4 схемы, выделенные фоном, являются известными решениями, остальные схемы – новые МПД-претенденты. Причем каждая схема в табл. 4, как известная, так и новая, есть результат вычислений, а не эмпирического конструирования, как было во всех известных случаях.

В табл. 4 многие ячейки столбцов 1–5 не заполнены. Это означает невозможность решения задач синтеза рациональных схем путем присоединения избыточных элементов 1–5 из табл. 2 к исходным МПД. Причины следующие:

1) Работоспособным может быть МПД с короткой КЦ. МПД – генератор ошибок позиционного управления движением выходного звена. Чем протяженнее КЦ, тем обширнее область ошибок из-за зазоров в КП, т. к. каждый из них увеличивает ЧСС на единицу и, следовательно, области ошибок определяются избыточным ЧСС [1].

2) ИКЦ и ИМ из табл. 2 (схемы 1–5) соединяет стойку и выходное звено. Это вносит в процесс преобразования движения дополнительные ошибки, т.к. система с «отрицательной» жесткостью стремится к хаотическому движению [9].

3) Существует одна сборка ОКЦ с ИКЦ или ИМ, допускающая возможность движения выходного звена МПД по заданному закону. При прочих сборках «отрицательная» жесткость утрачивается, т. к. свойство генерируется лишь в окрестностях т. н. особых точек траектории. Например, при смене направления движения в рычажных механизмах (схемы 1–3 в табл. 2), при выстое кулачков (схемы 4, 5) и т. п. МПД превращается в неподвижную конструкцию [3].

4) Схема 6 в табл. 2 может быть работоспособной только при наличии несущего УЭ типа $1'_{(+)}$ помимо имеющегося.

В отличие от схем, размещенных в ячейках столбцов 1–6 табл. 4, каждый МПД-претендент, согласно схеме в столбце 7, – результат наслоения ИМ, содержащего УЭ с «отрицательной» жесткостью типа $2'_{(-)}$ и ИКЦ для его присоединения, независимо от особенностей исходного МПД. Поэтому столбец 4 заполнен. Метод наслоения подобных ИМ имеет ряд преимуществ:

1) ИМ совместим с исходным МПД любой структуры. ИМ не увеличивает структурные числа исходного МПД, т. к. ИКЦ параллельна ОКЦ, оставляя ОКЦ открытой. При заданных ограничениях на размеры рабочего пространства ВЗС, МПД с двумя активными ОКЦ и одной ИКЦ, например *ВЦ*-типа, для присоединения УЭ типа $2'_{(-)}$, содержащей не более двух КП, одна из которых – ВКП, имеют наиболее рациональные структурные характеристики [1].

2) Возможно присоединение ИМ к плоским и пространственным исходным МПД. Причем последний граф в таблице 4 (строка 4, столбец 7) означает, что ИМ может быть присоединен к исходному МПД с любым количеством КЦ.

3) Присоединение ИМ не ухудшает процесс преобразования движения, т. к. ИКЦ соединяет стойку и входное звено МПД, а не входное и выходное звенья, как в схемах, размещенных в ячейках столбцов 1–6 табл. 4.

4) «Отрицательная» жесткость – внутреннее свойство ИМ. Поэтому это свойство не зависит от деформированного состояния несущих УЭ ВЗС, а также номера и последовательности сборки ОКЦ и ИКЦ. Как следствие, допустимо множество сборок исходного МПД и ИКЦ.

Табл. 5 иллюстрирует эффективность метода наслоения ИМ, содержащего УЭ типа $2'_{(-)}$ и ИКЦ, для решения задач проектирования подвесок сидений человека-оператора. Для модернизации механической или пневматической подвески достаточно выбрать граф из атласа (см. табл. 4) и определить рациональные значения структурных характеристик по формулам (2), (4) и (5). Например, выбрав граф 3–7 (строка 3, столбец 7), можно синтезировать рычажные МПД *ВВВВ*-типа с ИКЦ *ВЦ*-типа для модернизации подвесок, применяемых, по меньшей мере, в 80 % современных транспортных и самоходных технологических машин.

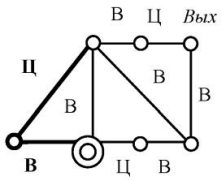
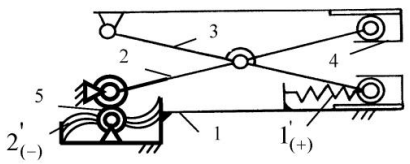
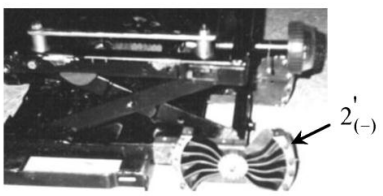
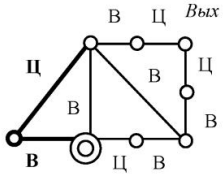
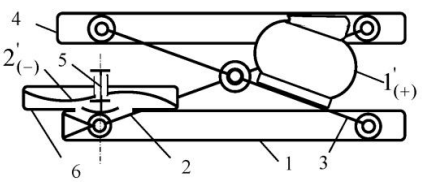
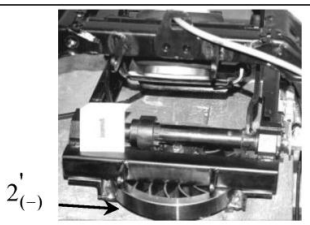
ВЗС локомотивных и вагонных тележек

Используя метод наслоения ИМ, содержащих УЭ типа $2'_{(-)}$ и ИКЦ для присоединения УЭ к исходной ВЗС, можно генерировать свойство «отрицательной» жесткости в подвесках тележек. Ниже представлен обзор (см. табл. 6) схем подвесок тележек, которые используются во всех основных типах грузового и пассажирского железнодорожного подвижного состава, движущегося на обычных и высоких скоростях.

Можно показать возможность решения задачи проектирования МПД-претендентов для подвесок вагонных и локомотивных тележек по аналогии с процедурой синтеза подвесок сидений. Так, используя метод наслоения ИКЦ и ИМ, можно поочередно присоединить ИМ согласно схеме 7 из табл. 2 к каждому исходному МПД из табл. 6.

Таблица 5

Подвески сидений с ИМ, генерирующими свойство «отрицательной» жесткости [3]

№	Граф МПД	Структурная схема	Образец подвески
1			
2			

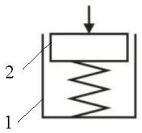
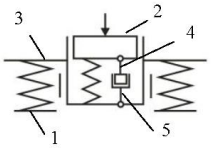
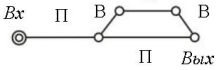
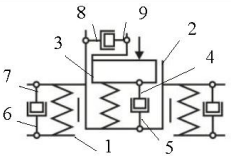
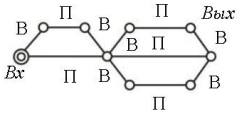
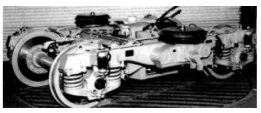
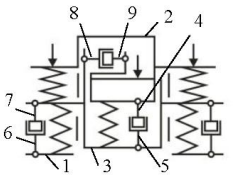
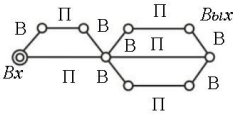
Результаты синтеза в виде меченых графов МПД-претендентов представлены в табл. 7.

Заключение

Результаты длительных исследований показывают, что ВЗС с «отрицательной» жесткостью способны многократно повысить качество виброзащиты человека и техники на обычном и скоростном железнодорожном транспорте. Однако до недавнего времени проектирование подобных ВЗС осуществлялось главным образом эмпирически. Поэтому уже на стадии структурного синтеза неизбежно возникали ошибки, которые в конечном счете не позволяли известным железнодорожным ВЗС с «отрицательной» жесткостью конкурировать по технологичности и эксплуатационным свойствам с традиционными ВЗС. Представленный метод структурного синтеза, заключающийся во введении избыточных структурных элементов, способных генерировать свойство «отрицательной» жесткости в ВЗС любого типа, позволяет многократно повысить качество виброзащиты. Он также позволяет расширить атлас работоспособных ВЗС с рациональными значениями структурных характеристик, рационально распорядиться рабочим пространством, отведенным для ВЗС человека-оператора или технического объекта, сделать ее свободной от недостатков, характерных для систем с «отрицательной» жесткостью. В частности, избежать влияния хаотического движения таких систем на основной закон движения

Таблица 6

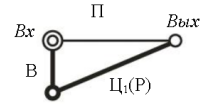
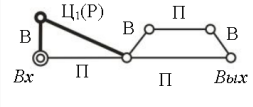
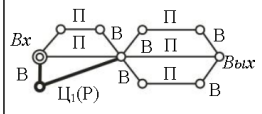
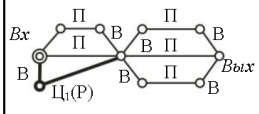
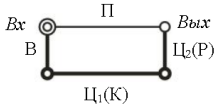
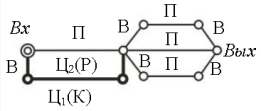
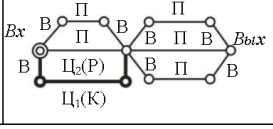
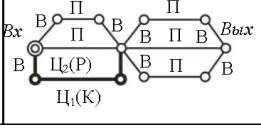
Локомотивные и вагонные тележки

№	Серийный образец	Разработчик	Структурная схема	Граф МПД
1		ЦНИИ-Х3-О (Россия); Barber S-2 (Amsted Rail Co, США)		
2		КВЗ-ЦНИИ I (Россия); BT10 (British Rail Mark 3, Великобритания)		
3		68-4095 (Трансмаш, Россия); ETR-460 (Италия)		
4		Сапсан (Германия – Россия); Серия 300 (Shinkansen, Япония); X2000 (Швеция)		

Примечание (обозначения и термины): 1 – колёсная пара (*Вх*), 2 – надрессорная балка (*Вых*), 3 – рама тележки; 4-9 – избыточные структурные звенья.

Таблица 7

ВЗС с «отрицательной» жесткостью: атлас МПД-претендентов для тележек

№	1	2	3	4
1				
2				

ВЗС, исключить влияние структурной избыточности на точность позиционного управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Говердовский В.Н. Структурный синтез механизмов для систем виброизоляции в диапазоне инфрачастот. // Научный вестник НГТУ. – 2004. – № 3(18). – С. 77–90.
2. Dasgupta A. Type identification and mobility analysis of spatial parallel manipulators. Mechanism and Machine Theory. – 2002. – № 37. –pp. 1287–1306.
3. Lee C.-M., Goverdovskiy V.N. Type synthesis of function-generating mechanisms for seat suspensions // International Journal of Automotive Technology. – 2009. – №1. – pp. 37–48.
4. Notash L., Huang L. On the design of fault tolerant parallel manipulators // Mechanism and Machine Theory. – 2003. – № 38. – pp. 85–101.
5. Алабужев П.М., Гритчин А.А., Ким Л.И. и др. Виброзащитные системы с квазинулевой жесткостью. – Л. : Машиностроение, 1986.
6. Чупраков Ю.И. Гидравлические системы защиты человека-оператора от общей вибрации. – М. : Машиностроение, 1987.
7. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. – М. : Наука, 1967.
8. Пейсах Э.Е., Нестеров В.А. Система проектирования плоских рычажных механизмов. – М. : Машиностроение, 1988.
9. Lee C.-M., Goverdovskiy V.N., Samoilenko S.B. Prediction of non-chaotic motion of the elastic system with small stiffness // Journal of Sound and Vibration. – 2004. № 272. – pp. 643–655.

УДК 378.6

Третьяков Валерий Григорьевич,
д. и. н., профессор кафедры «Философия и социальные науки», ИрГУПС, тел. 639737

ВОЗНИКНОВЕНИЕ И ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ТРАНСПОРТНОГО ВУЗА В ИРКУТСКЕ В 1932–1934 гг.

Tretyakov V G.

OCCURRENCE AND ACTIVITY OF TRANSPORT HIGHER EDUCATION INSTITUTION IN IRKUTSK IN 1932–1934

Аннотация: *Показаны политические, социально-экономические предпосылки образования первого транспортного института, его деятельность в эти годы, проблемы, решаемые руководством Восточно-Сибирского края и вуза, причины прекращения его деятельности.*

Ключевые слова: *Восточно-Сибирский край, Восточно-Сибирский институт инженеров транспорта, студенты, учебные заведения, учебные планы, организация учебного процесса, учебно-методическая работа.*

Abstract: *In the article the political, sociological and economic background of the first Transport higher educational institution foundation and its activity in 1970s are described. The problems that were being solved by the East Siberia and Institute authorities as well as its activities directions are given by the author.*

Keywords: *Eastern Siberia, the East-Siberian institute of engineers of transport, students, educational institutions, curricula, the organisation of educational process, educational-methodical work.*

Иркутский государственный университет путей сообщения как самостоятельное высшее учебное заведение существует с 1975 года. Его открытие было связано с началом строительства Байкало-Амурской магистрали. Потребность в этом вузе была обоснована Постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 9 мая 1963 г. № 533 и приказом МПС от 18 июля 1975 г. № 1534. Однако история нашего университета начинается с 1930-х годов прошлого века.

В дореволюционной России было два высших учебных заведения, готовивших инженерные кадры для железных дорог – в Петербурге и Москве. Они ежегодно выпускали по тысяче специалистов в год, что вполне хватало для того количества железных дорог. Но уже по плану перспективного развития железнодорожного транспорта, подготовленному в январе 1916 г., дополнительно предполагалось открыть 40 специальных школ для подготовки техников. Планировалось значительное увеличение приема студентов в Петербургский и Московский институты, а также открытие нового института железнодорожного транспорта в Екатеринославе, Ростове-на-Дону или Харькове.

Поскольку в период революции и гражданской войны количество выпускаемых инженеров резко сократилось, то в конце 1920-х начале 1930-х гг. появилась острая необходимость в быстрой подготовке большого количества инженеров. Правда, в 1920-е гг. отношение к высшей школе было весьма противоречивым. С одной стороны, ощущалась острая нехватка специалистов с высшим образованием и как следствие – потребность в их подготовке. С другой стороны, сфера образования втягивалась во внутриполитическую борьбу; в вузовской среде навязывалось негативное отношение к старой, дореволюционной профессуре как к оплоту буржуазной идеологии. Вузовские преподаватели обвинялись в том, что не ведут борьбу с правым уклоном и троцкистскими настроениями, нет должной критики и самокритики, не развивается социалистическое соревнование. Руководящие партийные органы стремились к тому, чтобы во главе вузов и их подразделений стояли только члены ВКП(б). Критике подвергались такие учебные заведения, в которых доля служащих среди студентов была более 40 %. Упор был сделан на то, чтобы в вузы поступали дети из семей рабочих, крестьян и батраков [1].

Основные направления развития высшей школы в период так называемого развернутого строительства социализма были сформулированы

в постановлении ЦИК и СНК СССР от 23 июля 1930 г. «О реорганизации вузов, техникумов и рабфаков». Этим постановлением предусматривался ряд мероприятий. Так, многофакультетные высшие учебные заведения преобразовывались в отраслевые учебные заведения, а однородные специальности разных учебных заведений объединялись. Все технические учебные заведения передавались в ведение отраслевых хозяйственных объединений соответствующих наркоматов. В ведении народных комиссариатов просвещения оставались университеты в составе факультетов, не реорганизованные в вузы, педагогические и художественные учебные заведения. За этим комиссариатом сохранялось программно-методическое руководство и обеспечение всех учебных заведений учебными планами и программами. При каждом вузе создавались рабочие факультеты – рабфаки. Ранее существующие рабфаки присоединялись к вновь образованным вузам. Реорганизацию многофакультных вузов предусматривалось провести в месячный срок [2].

С восстановлением экономики после гражданской войны встала задача развития железнодорожного транспорта в России. Руководство партии и правительство разрабатывали различные мероприятия по развитию железных дорог. А для обеспечения устойчивой работы этого вида транспорта нужны были высококвалифицированные рабочие и инженерно-технические кадры (потребность в инженерных кадрах в конце 1920-х гг. обеспечивалась лишь на 27 %). На железнодорожный транспорт административным путем возвращали работников, ранее занятых на железной дороге и перешедших по разным причинам в другие отрасли и учреждения. Для подготовки и переподготовки работников железнодорожного транспорта была создана разветвленная сеть технических школ, курсов, техникумов и вузов.

Для ускорения подготовки инженерно-технических кадров вводилось всеобщее обучение работников дороги, имеющих большой практический опыт работы, но не имеющих необходимого образования, поощрялись заочные формы повышения профессионального уровня. Был создан электромеханический институт в Свердловске и такой же вечерний в Омске для переподготовки практиков, работающих в высшем и среднем звеньях транспортного хозяйства; были открыты вечерние транспортные академии в Москве, Ленинграде, Харькове.

Все эти мероприятия принесли значительные успехи. Уже в 1927 г. на железных дорогах страны действовали 151 школа ФЗУ, 34 техникума и 2 вуза; в 1933 г. уже функционировали 262 ФЗУ, 107 техникумов и 9 вузов железнодорожного профиля.

В Восточной Сибири до революции 1917 г. не было ни одного высшего учебного заведения. В Иркутске первый вуз – госуниверситет – был образован в 1918 г. К началу 1930-х годов имелись все условия для появления в Иркутске и транспортного вуза. В городе и области стабильно работали авиамоторостроительный, энергетический, горно-металлургический, лесопромышленный, строительный, животноводческий техникумы. Формировалась специализированная система рабфака – педфак, медфак, экфак. Почти все отрасли экономики готовили для себя специалистов через свои отраслевые вузы, только транспортная отрасль не имела своих учебных заведений. Инженерные и руководящие кадры для нашей дороги готовились в других городах, а руководители – в Ленинградской транспортной академии.

До 1929 г. специалистов-транспортников выпускали в основном Ленинградский институт инженеров путей сообщения (ЛИИПС) и Московский институт инженеров транспорта (МИИТ). Сначала эти институты находились в ведении народного комиссариата просвещения, но в 1928 г. их передали в ведение НКПС, который начал активно способствовать развитию существующих и образованию новых вузов для подготовки инженеров для железных дорог. А в 1929 г. для ускоренной подготовки командных кадров для железнодорожного транспорта в Ленинграде была открыта Всероссийская академия железнодорожного транспорта (ВАЖТ), которая выпускала около ста специалистов в год. Обучение слушателей продолжалось в течение двух лет. Поскольку в академию принимали слушателей только по направлению региональных партийных органов, то Восточно-Сибирский крайком партии ежегодно обсуждал кандидатуры для направления на учебу в это заведение. Как правило, подававших заявление было больше, чем выделяемых мест, поэтому многим отказывали, находя самые разные причины [3].

Для партийных и советских органов Восточной Сибири вопрос о подготовке инженерно-технических кадров был очень важным. Всем было ясно, что для сооружения и эксплуатации современных промышленных предприятий нужны грамотные специалисты, причем вышедшие из рабоче-крестьянской молодежи. В 1930 г. на заседании Иркутского окружного комитета ВКП(б) был утвержден план проведения похода рабочей и батрацкой молодежи на учебу во втузы и техникумы. В частности, планом предусматривалось через массовую разъяснительную работу довести

до сведения каждого молодого рабочего и батрака вопрос о необходимости подготовки пролетарских специалистов, командиров социалистического производства и транспорта. Подчеркивалась и необходимость включить эту массу молодежи в борьбу за учебу во втузах, предполагалось организовать подготовительные курсы, подобрать педагогический персонал, разработать учебные программы и пособия. Поход в высшие учебные заведения предполагалось провести в марте–апреле и к весеннему набору 1930 г. завербовать минимум 250 чел., а к осеннему – 750 – 800 чел. [4].

Для подготовки весеннего набора планировалось открыть подготовительные курсы в Маратовском, Свердловском, Ангарском и Ленинском районах, причем отдельно для поступления во втузы и в техникумы. Для подготовки осеннего набора дополнительно такие курсы были организованы в Усолье-Сибирском, Слюдянке, Зиме, Тулуне, Куйтуне. Во время учебы на подготовительных курсах предусматривались освобождение от общественной деятельности и работа только в дневную смену. Партийные и хозяйственные органы обязывались обеспечить эти курсы всем необходимым, особенно опытными руководителями.

Комсомольским вожакам давались персональные задания по вербовке сельской молодежи в высшие учебные заведения. В январе – марте 1930 г. для пропаганды необходимости поступления пролетарской молодежи на учебу на крупные предприятия промышленности и транспорта были направлены бригады агитаторов из числа вузовских работников. Им рекомендовалось проводить специальные рабочие собрания, где и выдвигать лучших рабочих для учебы. Для организации такого похода в городах и районах области были образованы особые комиссии. На предприятиях были организованы тройки, а окончательный отбор кандидатов в студенты ложился на окружную пятерку. Для освещения этого похода и привлечения к нему внимания молодежи предполагалось выпустить три специальных номера газеты «Даешь вуз» [5].

В августе 1930 г. бюро Иркутского окружкома сформировало специальную комиссию, которая подготовила на заседание оргбюро Восточно-Сибирского края весь комплекс вопросов о вузах и техникумах в Иркутске [6].

11 июля 1931 г. бюро Восточно-Сибирского крайкома ВКП(б) обсудило вопрос о реализации решений ЦК ВКП(б) от 5 июня 1931 г. «О сибирских железных дорогах». Для подготовки этого вопроса была образована специальная комиссия во главе с Житковым и Кришталем. В результате обсуждения вопроса на бюро было принято следующее решение:

1. Представленный комиссией проект резолюции принять за основу. В суточный срок комиссии отредактировать проект, предложенный с учетом мнений и предложений членов крайкома и представить его на утверждение секретариата крайкома.

2. Поручить организационному отделу совместно с партийными и профсоюзными организациями дорог подготовить и внести на секретариат конкретные предложения о совершенствовании партийной работы на транспорте.

3. Поручить крайкому с привлечением заинтересованных организаций изучить и подготовить необходимые материалы о строительстве подъездных путей.

4. Просить ЦК ускорить разрешение вопроса об открытии транспортного вуза в Иркутске, настаивать перед ЦК ВКП(б) о необходимости проведения этого мероприятия.

5. Поручить начальнику Забайкальской железной дороги Житкову в пятидневный срок подготовить проект докладной записки в ЦК ВКП(б) по этому вопросу [7].

Вопрос об открытии в Иркутске транспортного втуза был рассмотрен 1 сентября 1931 г. на заседании бюро Восточно-Сибирского крайкома партии. На нем обсуждался вопрос «О решении ЦК ВКП(б) об открытии в г. Иркутске транспортного втуза». Бюро приняло решение о создании специальной комиссии в составе Иевлева, Алыпова и Вдовина. Комиссия была обязана подготовить все необходимые документы, материалы, связанные с открытием этого втуза, и доложить о проделанной работе на следующем заседании бюро комитета [8].

26 сентября 1931 г. на заседании секретариата Восточно-Сибирского крайкома ВКП(б) было подчеркнуто, что в соответствии с предыдущими решениями необходимо обеспечить начало занятий в институте железнодорожного транспорта Восточно-Сибирского края, который должен быть открыт в помещении на ст. Иннокентьевской, не позднее 1 января 1932 г. Тогда же дирекции Забайкальской железной дороги было предложено к началу учебного года обеспечить готовность института к учебному процессу, а для этого выделить помещения, оборудование, учебные и наглядные пособия.

Конечно, в принятии решения об открытии железнодорожного вуза в Иркутске принимали участие все заинтересованные стороны. Настойчиво добивался открытия этого института директор Забайкальской железной дороги Житков. Будучи в Москве в НКПС, он узнавал о продвижении реше-

ния вопроса об открытии в Иркутске института железнодорожного транспорта. Вероятно, от него потребовали решение крайкома ВКП(б). Поэтому он запросил срочной телеграммой решение крайкома по этому вопросу. В аппарат НКПС из Иркутска была отправлена срочная телеграмма, в которой указывалось, что 26 сентября 1931 г. бюро крайкома приняло решение об открытии транспортного вуза на ст. Иннокентьевская с января 1932 г. [9].

Здесь можно заметить, что 30 июня 1931 года народный комиссариат путей сообщения (НКПС) издал приказ «О реорганизации и специализации ВТУЗов железнодорожного транспорта». В этом документе указаны все уже существующие вузы и вновь строящиеся. Пунктом 11 ставился вопрос о создании к началу 1932 учебного года электромеханического института для подготовки специалистов электромеханической специальности для железных дорог Урала и Сибири, включая строительство этого ВТУЗа в план 1932 года. О железнодорожном вузе в Иркутске здесь совсем не упоминается. Таким образом, НКПС не планировал в ближайшее время открытие в Иркутске транспортного вуза. Открытия такого учебного заведения добивался и добился Восточно-Сибирский крайком ВКП(б).

При создании нового учебного заведения пришлось решать немало сложных организационных вопросов. Так, для быстрого и успешного развертывания процесса обучения было признано целесообразным перевести Читинский транспортно-эксплуатационно-механический техникум с аналогичными институту специальностями в Ленинский район Иркутска. В этой связи дирекция Забайкальской железной дороги обязывалась перевести техникум не позднее 10 ноября для использования его кабинетов и лабораторий в учебной работе нового транспортного института. Вместе с тем было решено путейско-строительный техникум из Иркутска перевести в Читу. Дирекция Забайкальской железной дороги, Читинский городской комитет и Ленинский райком ВКП(б) г. Иркутска при переброске инженерно-технических работников и работников вновь образованного транспортного института должны были обеспечить их жилой площадью.

Секретариат крайкома партии утвердил в должности директора создававшегося института А.А. Вахмина, заведующим учебной частью – Казимирова, заведующим механическим отделением – Комиссарова, заместителем директора по административно-хозяйственной части – М.Д. Красильникова. Одновременно было предложено отпустить Красильникова учиться в первый набор института. Отделу кадров крайкома ВКП(б) и дирекции Забайкальской железной дороги было рекомендовано освободить в декадный срок указанных лиц для работы в институте.

На том же заседании секретариата крайкома (26.09.1931 г.) был утвержден и контингент первого набора для обучения в количестве 250 чел. Указывалось, в частности, что 75 % учащихся должны быть представителями рабочего класса, причем 65 % из них – членами ВКП(б) или ВЛКСМ. Отделу кадров крайкома было поручено ходатайствовать перед ЦК партии и НКПС о предоставлении в институт транспорта для Восточно-Сибирского края не менее 30 мест. Кроме того, было рекомендовано с 1 сентября 1932 г. организовать рабфак при институте с контингентом для первого года обучения для всех курсов 400 чел.

Дирекция Забайкальской железной дороги, отдел кадров и культпром крайкома должны были в месячный срок определить необходимое количество научных работников для института. Для работы в институте в качестве руководящих работников и преподавателей в Иркутск через НКПС предполагалось командировать трех инженеров-механиков и трех инженеров-эксплуатационников. В планах организаторов значился и пункт, рассчитанный на длительную перспективу – обратиться с просьбой в ЦК партии и НКПС о выделении необходимых бюджетных средств на строительство нового здания института, техникума и рабфака; подготовительные работы к строительству планировалось начать уже в 1931 г. Вопросами строительства зданий для нового института занималась дирекция Забайкальской железной дороги.

К сожалению, далеко не все запланированные мероприятия были выполнены должным образом. 18 октября 1931 г. на бюро Восточно-Сибирского крайкома было отмечено, что решение об организации транспортного втуза не нашло практического отражения в работе дирекции Забайкальской железной дороги. Утвержденный руководящий состав института до сих пор был не выделен, временная финансовая база института не создана, перемещение техникумов из Ленинского района в Читу и обратно не состоялось, не разработаны были вопросы капитального строительства вуза.

Отмечая невыполнение дирекцией Забайкальской железной дороги решений партийных органов об организации транспортного института, бюро крайкома приняло следующее постановление:

1. Подтвердить постановление секретариата ВКП(б) от 26 сентября 1931 г. об открытии транс-

портного вуза в Иркутске в январе 1932 г. на ст. Иннокентьевской.

2. Предложить директору Забайкальской железной дороги Житкову дать объяснение о невыполнении решения крайкома ВКП(б) об открытии транспортного вуза.

3. Предложить дирекции Забайкальской железной дороги в трехдневный срок выделить ответственное лицо за организацию вуза, обязав его подекадно информировать отдел кадров крайкома о ходе работ по созданию института.

4. Календарный план практических мероприятий, намеченный отделом кадров крайкома, утвердить. Предложить заинтересованным организациям под личную ответственность руководителей обеспечить своевременное выполнение намеченных мероприятий по открытию вуза.

5. Обязать Ленинский райком партии обеспечить повседневное оперативное руководство и практическую помощь организации института инженеров транспорта [10].

Чем меньше оставалось времени до открытия вуза, тем больше возникало проблем. Одной их них стал вопрос о наборе студентов создававшегося вуза. Так, 10 февраля 1932 г. секретариат крайкома специально обсуждал вопрос о невыполнении районами края планов разверстки в институт инженеров транспорта. В протоколе отмечалось «как недопустимое» отношение горкомов и райкомов к выполнению данных разверсток отделом кадров крайкома. Секретариат обязал Красноярский, Читинский горкомы, Бурятский обком и Нижнеудинский райком обеспечить выполнение данных им планов. На этом же заседании были утверждены несколько кандидатур на учебу в институт инженеров транспорта.

Практически на каждом заседании отдельным стоял вопрос об утверждении кандидатур для учебы в транспортном вузе. В те годы существовала практика принятия решения путем опроса членов секретариата и бюро крайкома ВКП(б). В протоколах таких решений, например, за время с 17 по 27 апреля 1932 г. было принято несколько решений о направлении кандидатур в транспортный институт. А по некоторым будущим слушателям Иркутского транспортного вуза решения принимались по несколько раз. Так, вопрос о направлении М.Д. Красильникова на учебу в транспортный вуз обсуждался на заседании секретариата 26 декабря 1931 г., в апреле и мае 1932 г.

Наконец, 15 февраля 1932 г. был издан приказ наркома путей сообщения № 105/ц «Об организации Иркутского эксплуатационно-экономического института инженеров железнодорожного транспорта» (Приложение № 1). Нарком указывал, что в связи с окончанием подготовительных работ по открытию Иркутского железнодорожного втуза следует открыть его с 1 марта 1932 г. во временном помещении. Управлению кадров предписывалось включить в контрольные цифры 1933 г. капитальное строительство учебных помещений и общежитий для Иркутского втуза. Даны были указания по укомплектованию этого вуза преподавательскими кадрами. Согласно этому документу, директором Иркутского института железнодорожного транспорта был назначен А.А. Вахмин. Заметим, что несколько позже, в октябре 1932 г., в развитие приказа № 105/ц был издан приказ № 814/ц «О строительстве Восточно-Сибирского института инженеров железнодорожного транспорта», в котором отмечалось, что строительство учебных зданий и общежитий этого вуза относится к литерным стройкам (приложение № 2).

Тем временем в Иркутск для окончательного согласования вопросов по открытию вуза с Восточно-Сибирским крайкомом и представителем Забайкальской железной дороги прибыл заместитель начальника управления кадрами НКПС Машинский. В основном все было улажено в ходе совещаний, и разногласия возники только по одному вопросу: управление кадров НКПС считало необходимым открыть в Иркутске эксплуатационно-экономическую специальность, а крайком требовал открытия эксплуатационно-механической специальности. Дело в том, что НКПС уже имел вузы с механическими специальностями в Свердловске, Омске и Томске.

В конечном итоге **1 марта 1932 г.** в Иркутске впервые был открыт транспортный институт и первым его директором стал Алексей Андреевич Вахмин.

Интересно, что название нового института первоначально не было определено и закрепилось лишь со временем. В первых документах партийных органов вуз называется по-разному. В решении секретариата в декабре 1931 г. он называется «Институт инженеров транспорта Восточно-Сибирского края». Затем его называют «Иркутский институт инженеров транспорта». В конце 1932 г. во всех документах и справках он значится как «Восточно-Сибирский институт инженеров транспорта» (ВСИИТ). А ведь вначале официально по печати и штампу вуз носил название «СССР – НКПС. Восточно-Сибирский эксплуатационно-экономический институт инженеров железнодорожного транспорта ст. Иннокентьевская Забайкальской железной дороги (ВСЭЭИИЖТ)». В августе 1932 г. вуз получил новые печать и штамп и

стал называться «Восточно-Сибирский институт инженеров транспорта (ВСИИТ)».

Вновь образованному транспортному вузу в первую очередь необходимо было разработать учебные программы по всем дисциплинам, конечно же, с учетом требований партийных органов. Вероятно, руководству нового вуза это сделать удалось. Так, в отчете Восточно-Сибирского крайкома «Об итогах работы вузов в 1931-1933 гг. и подготовке к новому 1933-1934 учебному году» говорится, что в крае нет ни одного вуза, выполняющего учебный план на 100 %. Здесь же указывалось, что транспортный институт выполнил учебный план на 95 %, что было выше по сравнению с другими вузами края. Основными причинами невыполнения учебных планов указывались командировки преподавателей на различные кампании и мобилизация студентов на работы.

Заметим, что в начале 1930-х годов в Восточно-Сибирском крае функционировало уже 18 вузов, из них 12 в Иркутске, 3 – в Красноярске и 3 – в Верхнеудинске. Общее количество студентов во всех этих институтах на 1 ноября 1933 г. составляло 5 312 чел.; в среднем на одно высшее учебное заведение приходилось 300 чел. Кроме этого, в крае функционировало 20 рабфаков, в которых обучалось 4 215 чел. (население края в то время составляло 3 млн 30 тыс. чел.) [11].

Практически во всех вузах на учебном процессе болезненно сказывались постоянные привлечения студентов на вневузовские работы. Так, крайком, горком, райком партии постоянно производили внеплановые отрывы студентов-железнодорожников на различные работы. Нередко комсомольские органы проводили мобилизацию студентов, не согласуя это с дирекцией института. Были случаи, когда студенческие группы отрывались от занятий более чем на месячный срок. Кроме командировок в районы, большая часть студентов постоянно отрывалась на работы в городе. Также мобилизовывались и преподаватели – члены ВКП(б) и ВЛКСМ. Причем эта мобилизация коммунистов и комсомольцев зачастую проводилась без учета интересов вуза и студентов. Все это вносило дезорганизацию в работу вузов [12].

Тем не менее по успеваемости транспортный вуз был одним из первых среди вузов города. По отчетам руководства края, неуспеваемость в транспортном институте составляла 1,8 %, в то время как в институте советского строительства – 14,3 %, в горном – 9,3 %, в госуниверситете – 9,3 %, в пединституте – 3,1 % [13].

Все вузы края в те годы находились в ведении культпропотдела, и его руководитель Алыпов в начале августа 1932 г. запросил у директора транспортного вуза сведения о ходе осеннего набора и подготовке к началу занятий. В подготовленном отчете отмечалось, что вуз начал работу с 1 марта 1932 г. и на 1 июля этого года в вузе обучалось 100 чел. Осенний набор предусматривался планом на дневное отделение 150 чел. и на вечернее 150 чел. По состоянию на 7 июля 1932 г. на дневное отделение было принято 136 чел., из них 75 % из рабочих, 12 % членов партии, 29 % комсомольцев и 30 % женщин. Кроме этого, имелось еще нерассмотренных 20 заявлений и около 40 заявлений ожидалось от слушателей подготовительных курсов. На рабфак в 1932 г. для учебы в Иркутском транспортном вузе непосредственно в Иркутске было принято 69 чел. и 72 чел. в Чите. На вечернее отделение на указанную дату было принято 25 чел. В качестве основной причины невыполнения плана набора на вечернее отделение директор вуза выделил удаленность от Иркутска ст. Иннокентьевской: желающих учиться на вечернем отделении было немало, но у них возникала проблема с проездом. А на самой ст. Иннокентьевская нужного количества желающих, естественно, не было.

Для выполнения плана набора 1932 г. руководством вуза было сделано несколько объявлений в печати, по радио. Была даже снята рекламная кинолента. Развешивались объявления на видных местах на улицах города и около зрелищных учреждений. Руководители депо и института постоянно объявляли о наборе в вуз на различных собраниях в коллективах железнодорожников [14]. В табл. 1 представлены итоги набора в вузы края в 1932 – 1933 учебном году.

Преподавательскими кадрами вуз был почти обеспечен. Из общеполитических дисциплин на I курсе преподавалась политэкономия. Занятия по этому предмету вели два преподавателя: Жданов и Елкин, оба бывшие работники крайкома партии. Правда, к середине августа 1932 г. все же не хватало одного преподавателя по эксплуатации железных дорог, но эту дисциплину могли читать все руководители института. Поэтому срыва занятий здесь не было. Все учебные планы и программы согласовывались с родственными транспортными вузами, обсуждались и утверждались на специальных конференциях.

На 1 сентября 1932 г. во ВСИИТе работало всего 42 чел., из них 15 были непосредственно причастны к учебному процессу. Это профессор Иван Васильевич Ширинский и два доцента: Георгий Кириллович Крипачев (физик) и Иосиф Арсентьевич Жданов (политэконом). Директором института, как уже было сказано, был Алексей

Таблица 1 [15]

Характеристика студентов вузов Восточно-Сибирского края в 1932 – 1933 учебном году

Вуз	Кол-во студентов в октябре 1932 г.	Кол-во студентов в феврале 1933 г.	Отсев		Процент студентов, обеспеченных стипендией	Процент студентов, обеспеченных общежитием	Процент жителей г. Иркутска	Процент студентов, живущих на частной квартире
			кол-во	%				
Горный институт	950	831	119	12,5	81,2			
Транспортный институт	249	200	49	19,6	87	70	24	6
Педагогический институт	534	439	104	19,5	81	51	42	7
Медицинский институт	1036	838	146	14,1	56	–	–	–
Институт снабжения	401	337	64	15,9	84	65	22	13
Финансовый институт	308	258	50	16,2	90	66	30	4
Государственный университет	368	307	61	16,6	75	61,5	33	4,5
Институт советского права	193	176	17	8,8	100	62,5	11,5	–
Строительный институт	172	159	13	7,5	100	60	7	33

Андреевич Вахмин. Остальные преподаватели и сотрудники были приняты на работу в 1932 г. Среди руководителей и преподавателей было четыре члена ВКП(б). Заместителем директора по учебной части был Александр Иванович Костюк. Александр Иванович был 1901 года рождения, член ВКП(б) с 1928 г., инженер путей сообщения. По социальному положению – служащий, по происхождению – из рабочих. Заведующим специальной подготовкой был Евгений Владимирович Тесельский, заведующим НПП – Владимир Михайлович Степанов, заведующей рабфаком была Анна Ивановна Скрый [16].

Одной из сложных проблем в работе института был недостаток в учебниках и учебных пособиях по специальным дисциплинам. Заказы на эту литературу делались заблаговременно и рассылались во все необходимые инстанции. Работники института командировались в центральные вузы с целью изучения опыта преподавания спецпредметов. Тем не менее, конспект лекций оставался главным материалом при подготовке студентов к экзаменам.

Другая сложная проблема – обеспеченность учащихся и преподавателей жильем. Руководству вуза удавалось обеспечить жилплощадью всех студентов. Но имелся ряд вопросов по оборудованию учебного корпуса и общежития. Не хватало лесоматериала, топчанов, матрацев, одеял, столов, стульев, тумбочек. Дирекция вуза делала все возможное, чтобы к началу учебного года все подготовительные работы были завершены.

4 июля 1932 г. бюро крайкома обсудило вопрос «Об открытии в 1933 г. новых втузов, вузов и техникумов». В разделе по транспорту предусматривалось открытие железнодорожного института в Красноярске на базе существующего вечернего института для подготовки инженеров-техников по ремонту паровозов и вагонов, по тяговому хозяйству, теплотехников по строительству железнодорожных зданий и пути. Была запланирована и общая численность контингента обучающихся в 1 200 чел.; на 1934 г. был запланирован набор студентов численностью в 450 чел. На этом же заседании было предложено Бурятскому обкому партии приступить к подготовке открытия такого же института в Верхнеудинске на базе строящегося паровозоремонтного завода [17].

Иркутск очень быстро стал студенческим городом, в связи с этим партийные и советские органы всячески опекали вузы, вели активную политическую работу. Во всех учебных заведениях края под нажимом партийных органов было организовано социалистическое соревнование и ударническое движение. Параллельно шла борьба с

недостатками в организации и развитии этих движений. Практически непрерывно бюро крайкома, его секретариат занимались анализом работы вузов и решением их проблем. В те годы учебные заведения края находились в ведении краевого культпропотдела. Этот отдел постоянно информировал крайком о достижениях и недостатках в деятельности вузов. Справки подготавливались по всем вузам и отражали многие позиции: ход набора, итоги сессии, партийно-политическую работу, методику преподавания, следование учебным планам и программам, изучение общественных дисциплин, самостоятельную работу студентов, проведение лекций, организацию соревнований, ударнического движения, обеспечение общежитиями и жилплощадью, культурное обслуживание студентов и т. д. Нужно заметить, что во всех имеющихся справках транспортный институт подвергался критике меньше других вузов.

В конце 1932 г. новым директором вуза стал И.П. Ветров. Иван Петрович Ветров родился в 1898 г. на ст. Иланская, член партии с 1917 г. Иван Петрович был специалистом по кадрам и социально-экономическим дисциплинам. По социальному положению – из рабочих, по происхождению – из крестьян. В 1912 –1917 гг. работал в депо ст. Иланская. В 1917–1918 гг. служил в Красной армии и в ЧОН. В 1918–1919 гг. по мобилизации служил в белой армии адмирала Колчака в Иркутске, ст. Иннокентьевской, Александровском Централе, участвовал в подпольной партийной работе против белой армии. В 1919–1925 гг. работал в качестве секретаря райкома, укома в Иланской, Канске и Усть-Абакане. После окончания коммунистического университета им. Я.М. Свердлова (Москва) был направлен на работу в Ленинский райком Омска на должность заведующим орготделом, затем секретарем парткома ст. Иланская. В 1932 г. был назначен директором Иркутского эксплуатационного института транспорта и проработал до закрытия этого вуза в 1934 г. [18].

Иркутский транспортный вуз быстро накапливал свой опыт работы со студентами. Учебная часть серьезно готовилась к каждой сессии, определяла порядок сдачи зачетов. Эти вопросы обсуждались на кафедрах и доводились до сведения всех студентов. От преподавателя требовали характеристики на каждого студента, в которой указывались его политическая позиция, активность, текущая посещаемость и успеваемость. Преподаватели перед сессией составляли предметные и тематические планы, методические рекомендации с перечнем необходимой литературы. На зачетную сессию отводилось не более 15 дней, количество сдаваемых предметов не превышало 4–5 дисциплин. Как и во всех вузах страны, во ВСИИТе вначале использовался бригадно-лабораторный метод обучения. Но с 1933 г. этот метод был отменен, и в вузе перешли к обычным лекционным и практическим занятиям и сдаче зачетов и сессий [19].

Выступая на одном из совещаний директоров вузов Иркутска в 1933 г., директор ВСИИТа И.П. Ветров докладывал, что транспортный институт вскоре переедет со ст. Иннокентьевской в центр города, правда, пока вся производственная, лабораторно-испытательная база останется на старом месте. Вступительные экзамены также должны были проводиться на Иннокентьевской. И.П. Ветров докладывал, что строительство нового корпуса шло очень медленно, за месяц осваивалось всего около 30 % от запланированных работ. Главной причиной такого невыполнения было отвлечение рабочих и студентов на работу в депо. В целом темпы набора в вузы края к августу 1933 г. были неудовлетворительными, в некоторые институты было принято лишь 5–10 % студентов от заданных норм. В трудовых коллективах края была развернута широкая организационно-массовая работа по набору студентов. Все городские и районные комитеты партии обязывались оказывать всевозможное содействие в проведении вербовки в вузы, а директорам вузов было запрещено уходить в отпуск до октября, т. е. пока не начнутся занятия. Правда, транспортный институт в этом вопросе несколько выделялся, поскольку показатели набора студентов здесь были сравнительно высокими.

В справке руководства института отмечалось, что на 1 октября 1933 г. в эксплуатационном транспортном институте занималось на I курсе 112 чел., на II – 140 чел. Кроме этого, на базовом рабфаке обучалось на I курсе 33, на II – 36, на III – 40 и на IV – вечернем – 28 чел. Руководство вуза докладывало в вышестоящие инстанции, что студенты-первокурсники на занятия явились все. Но после летних каникул к 1 сентября не явились 23 студента, двое из которых женатые, четверо – члены партии. После начала занятий все студенты были мобилизованы политотделом 1-го района Забайкальской железной дороги на уборку урожая и заготовку дров. Тем не менее, вуз был готов к учебному году: преподавательским составом институт был обеспечен полностью, учебные программы имелись по всем дисциплинам, кроме немецкого языка. Учебный год на всех курсах в основном начался с 1 сентября.

В другой справке руководства вуза указывается, что на 1 ноября 1933 г. во ВСИИТе обучалось 260 студентов на первых двух курсах, из них: 26 чел. были членами ВКП(б), 78 чел. – членами ВЛКСМ, 158 чел. – из рабочих, 11 – из колхозников, 91 – их служащих; обучались 55 женщин; из числа студентов было 230 русских и 30 представителей других национальностей. В ноябре 1933 г. на рабфаке обучалось 179 чел. в Иркутске на дневном отделении, 30 чел. – на вечернем и 97 чел. – в Чите. Были подведены итоги успеваемости по результатам летней сессии 1932–1933 учебного года. На «отлично» сдали сессию 6,2 % студентов, на «хорошо» – 41,5 %, на «удовлетворительно» – 50,5 % и «неудовлетворительно» – 1,8 % студентов. Следует заметить, что неуспевающих студентов во ВСИИТе было меньше, чем в других вузах края [22].

В ноябре 1933 г. культпропотдел подготовил сводку о наборе на рабфак и подготовительные курсы на 1933–1934 учебный год. В этом документе ВСИИТ расположился на третьем месте после горного института и партийного. Тогда при транспортном вузе имелись четыре рабфака: базовый, Аларский дневной, Иркутский вечерний и Читинский. На ноябрь 1933 г. были представлены следующие цифры набора на рабфак (табл. 2). Между тем, для завершения строительных работ к учебному году были мобилизованы все студенты. Институт старался обеспечить всех студентов жильем по установленным крайкомам нормам. Директор просил оказать помощь транспортному вузу в приобретении стекла и электрооборудования. Он проинформировал, что по плану вуз должен был набрать 100 чел. К экзаменам было допущено 125 чел., однако 50 чел. не явились: все они были работниками Забайкальской и Уссурийской дорог и их просто не отпустили политотделы из-за объемов работ на разных объектах магистрали [20].

Таблица 2 [23]

План набора на рабфак Иркутского транспортного вуза

Рабфак	план, чел.	фактически, чел.
Иркутский базовый	90	50
Аларский дневной	90	110
Иркутский вечерний	60	13
Читинский	100	95

Одним из серьезных достижений дирекции института на тот период стало то, что удалось полностью решить кадровую и жилищную проблемы, все студенты получали стипендию. Учебными планами и программами вуз был обеспечен полностью. Однако весьма острой проблемой для института являлась организация питания студентов. Дело в том, что централизованное снабжение обеспечивало калорийность в питании всего на 30 %, поэтому необходимо было искать дополнительные пути улучшения питания будущих специалистов.

В августе 1933 г. бюро Восточно-Сибирского крайкома обсудило вопрос «О контингенте и ходе набора в вузы на 1933–1934 гг.». При определении контингента каждому вузу бюро крайкома исходило из того, какой жилой площадью для студентов располагает вуз. Было решено, что на одного студента должно приходиться около 4 м^2 жилплощади. В связи с этим были утверждены следующие нормы приема на дневное отделение вузов края:

- институт советского права – 90 чел.;
- транспортный институт – 100 чел.;
- институт снабжения – 120 чел.;
- финансовый институт – 250 чел.;
- медицинский институт – 190 чел.;
- пушной институт – 60 чел. (ранее планировалось 175 чел., но в связи с отсутствием жилья норма была пересмотрена);
- институт строительства – 85 чел. (вместо ранее планируемых 135 чел.).

При наборе директорам вузов рекомендовалось проводить тщательный отбор студентов как по знаниям, так и по обеспечению норм партийно-комсомольской, рабоче-крестьянской и национальной прослойки. Секретариат крайкома установил следующие нормы этих прослоек (табл. 3).

Итак, в целом в 1933 г. ни один вуз края не выполнил план набора. Стало ясно, что вузов в крае гораздо больше, чем требовалось: не хватало главного – студентов. В 1933 г. в Восточной Сибири функционировало 19 высших учебных заведений, из них 7 было образовано до формирования Восточно-Сибирского края; 6 из этих вузов образовались на базе выделения факультетов госуниверситета в самостоятельные вузы (институт советского строительства, советского права, медицинский, педагогический, финансово-экономический и товароведно-экономический). Остальные 12 вузов возникли уже в период работы краевой администрации. План набора в институты к сентябрю 1933 г. даже под жестким давлением партийных, советских и комсомольских органов был выполнен лишь на 55,5 %. В справке

Таблица 3 [21]

План набора вузом Восточно-Сибирского края по социальному статусу

Вузы	%					
	Рабочие	Колхозники	Члены ВКП(б)	Члены ВЛКСМ	Национальные меньшинства	Женщины
Горный институт	80	10	35	40	25	25
Транспортный институт	80	10	35	40	25	25
Финансовый институт	65	10	25	30	20	35
Институт снабжения	65	15	30	30	30	35
Институт советского права	65	20	70	20	35	35
Педагогический институт	65	25	25	40	35	35
Государственный университет	65	25	25	40	30	35
Медицинский институт	65	20	20	40	30	–

культпропотдела отмечалось, что лишь два вуза выполнили план осеннего набора: горный и транспортный [24]. Ища выход из сложившейся ситуации, бюро Восточно-Сибирского крайкома в апреле 1934 г. обсудило вопрос о создании нормальных условий для работы основных вузов края. К таковым были отнесены педагогический, медицинский, сельскохозяйственный институты и госуниверситет. В целях улучшения их работы бюро крайкома постановило:

1. Просить наркомат снабжения перевести из края институт советской торговли, а в случае невозможности этого сделать его закрыть, при этом все помещения этого вуза передать медицинскому институту.
2. Просить ЦК ВКП(б) санкционировать закрытие института советского права.
3. Согласиться с предложением наркомата Союзпушнины о переводе в Москву пушно-сырьевого института [25].

А несколько позже бюро обсудило и основной вопрос – о пересмотре сети вузов края. В материалах бюро констатировалось, что имеющаяся сеть вузов края была организована без учета его возможностей и потребностей. Большинство вузов не имели квалифицированных преподавателей и обладали весьма слабой учебно-лабораторной и материальной базой. Интересно, что в материалах бюро небольшие вузы были названы «карликовыми», к ним относились институт советского строительства, советского права, финансово-экономический и товароведческий. Поэтому было признано необходимым вывести из края институты товароведения, финансово-экономический, советского строительства и советского права, а до решения вопроса о судьбе этих вузов запретить им проводить набор студентов как в вузы, так и на рабфаки. Правда, при этом краевые власти обращались в СНК с просьбой обязать Госплан и Наркомзем организовать уже в 1933 г. в Иркутске сельскохозяйственный институт. Согласно планам руководства, все здания, освобождаемые этими вузами, а также служебные квартиры, занимаемые работниками этих вузов, должны были быть переданы другим институтам [26].

Вообще, когда стало ясно, что созданную сеть высшей школы край не сможет обеспечить нормальной работой, появлялись самые различные предложения. Например, на одном из бюро крайкома было обсуждено предложение о пересмотре сети вузов в Иркутске следующим образом: некоторые родственные вузы предлагалось слить (госуниверситет и пединститут, институт советского строительства и советского права), а ряд вузов перевести в другие области и края (товароведно-экономический институт и др.).

Однако во всех проектах решений краевых властей по этому вопросу ничего не говорилось о транспортном вузе. Напротив, во всех сводках по рейтингу он, как правило, значился вторым после горного института. А в 1934 г. в Иркутске создается Управление Восточно-Сибирской железной дороги. И, тем не менее, 8 апреля 1934 г. вышел приказ Наркома путей сообщения № 87/ц «Об объединении Иркутского и Новосибирского институтов инженеров транспорта и о мероприятиях по

укреплению работы ТомИИТа и НИИТа». Этим приказом предусматривалось, что месторасположением объединенного вуза станет Новосибирск. Краевые власти не имели оснований для постановки вопроса о закрытии транспортного вуза в Иркутске, но они и не боролись за ВСИИТ, вероятно, будучи занятыми более широкими проблемами. Поэтому главной причиной объединения Западно-Сибирского института инженеров транспорта (ЗСИИТа) и ВСИИТа, видимо, стало то, что наркоматом путей сообщения было образовано отраслевых вузов больше, чем требовалось.

29 августа 1934 г. бюро Восточно-Сибирского крайкома ВКП(б) обсудило вопрос «О ходе подготовки к учебному готу в индустриальных втузах и техникумах». Бюро отметило неудовлетворительную вербовку молодежи в вузы края. При перечислении всех втузов края транспортного вуза уже не значилось [27].

Итак, в 1934 г. в Иркутске перестал функционировать транспортный институт, и подготовка специалистов-железнодорожников для нашей магистрали вновь была возложена на вузы страны. Конечно, такая ситуация не могла бы, вероятно, продолжаться долго, потребность в инженерных кадрах на Восточно-Сибирской дороге постоянно возрастала. Но процессы воссоздания транспортного института в Иркутске были сдержаны начавшейся войной и последующими годами восстановления экономики страны. Они получили свое продолжение лишь в 1950-е гг., когда особенно обострилась проблема нехватки инженерных кадров на железных дорогах страны, в том числе и на ВСЖД.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ЦХДНИИО. Ф. 16, оп. 1, д. 1324, л. 20–26.
2. Там же, Ф. 123, оп. 4, д. 76, л. 17.
3. Там же, Оп. 1, д. 470, л. 4.
4. Там же, Ф. 16, оп. 1, д. 1323, л. 42.
5. Там же, Л. 44.
6. Там же, Д. 1324, л. 129.
7. Там же, Ф. 123, оп. 1, д. 59, л. 149.
8. Там же, Оп. 4, д. 70, л. 11.
9. Там же, Ф. 123, оп. 1, д. 59, л. 93.
10. Там же, Л. 188–189.
11. Там же, Оп. 4, д. 166, л. 6–8.
12. Там же, Д. 70, л. 24.
13. Там же, Д. 116, л. 7.
14. Там же, Оп. 4, д. 116, л. 44–47.
15. Таблица составлена на основе архивных материалов. ЦХДНИИО. Ф. 123, оп. 1, д. 473, л. 121.
16. Там же, Оп. 3, д. 65, л. 86; оп. 4, д. 122, л. 40.
17. Там же, Оп. 3, д. 121, л. 33.
18. Там же, Д. 135, л. 73–74.
19. Там же, Оп. 4, д. 116, л. 8–10.
20. Там же, Л. 197.
21. Таблица составлена на основе архивных материалов. ЦХДНИИО. Ф. 123, оп. 1, д. 488, л. 125–127.
22. Там же, Оп. 3, д. 65, л. 19, 86.
23. Таблица составлена на основе архивных материалов. ЦХДНИИО. Ф. 123, оп. 4, д. 165, л. 7–8.
24. Там же, Оп. 4, д. 170, л. 1–2.
25. Там же, Л. 64.
26. Там же, Оп. 1, д. 83, л. 70.
27. Там же, Оп. 4, д. 170, л. 66.

Приложение 1

21

ПРИКАЗ

НАРОДНОГО КОМИССАРА ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ СОЮЗА СССР

15 февраля 1932 г.

№ 105/Ц

Об организации Иркутского Эксплоатационно-Экономического Института инженеров железнодорожного транспорта.

В связи с окончанием подготовительных работ по открытию Иркутского железнодорожного ВТУЗ"а ПРИКАЗЫВАЮ:

1. Открыть с 1/Ш-32 года во временном помещении находящиеся на ст. Иннокентьевской Иркутский Эксплоатационно-Экономический Институт Инженеров железнодорожного транспорта.

2. ЦУПКАДР"у включить в контрольные цифры 1933 года капитальное строительство учебных помещений и общежитий Иркутского ВТУЗ"а.

3. ЦУПКАДР"у укомплектовать ВТУЗ необходимыми преподавательскими кадрами.

4. Директором Иркутского Института назначить тов. ВАХМИНА А.А.

ЗАМ. НАРОДНОГО КОМИССАРА ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ /Благонравов/

НАЧАЛЬНИК ЦУПКАДР"а /Павлов/

это не печатать

№ 1
8/П-32 года.

100 экз.

Приказ рассылается:
В ИКТС по особому списку, Цупкадру для вузов 19 экз ЧУ дирекции т.о.

Приложение 2

П Р И К А З

НАРОДНОГО КОМИССАРА ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ СССР

«13» ~~сентября~~ октября 1932 г.

№ 814/4

по ПН; УОВ

" О строительстве Восточно-Сибирского Института Инженеров ж.д. транспорта".

(В развитие приказа №105/ц 1932 г. Г[redacted]ий ~~15 февраля с.г. № 105/Ц~~ ПРИКАЗЫВАЮ:

1. Внести в титульные списки капитального строительства 1933 года строительство учебного здания и общежитий Восточно-Сибирского транспортного Втуза, отнеся данное строительство к литерным стройкам.

2. Об"ем строительства определить исходя из обеспечения контингента Втуза в 1500 чел. студентов с отрывом и 750 ч. без отрыва от производства.

3. Строительство института провести в две очереди с тем чтобы общий комплекс всех зданий закончить стройкой к 1935 году, обеспечив нормальную работу Втуза путем сдачи в эксплоатацию законченных по секциям об"ектов.

4. Устансвить об"ем строительства первой очереди работ по учебному зданию 30.000 м^3, по общежитию 10.000 м^3 со сдачей в эксплоатацию 1-11-1933 г.

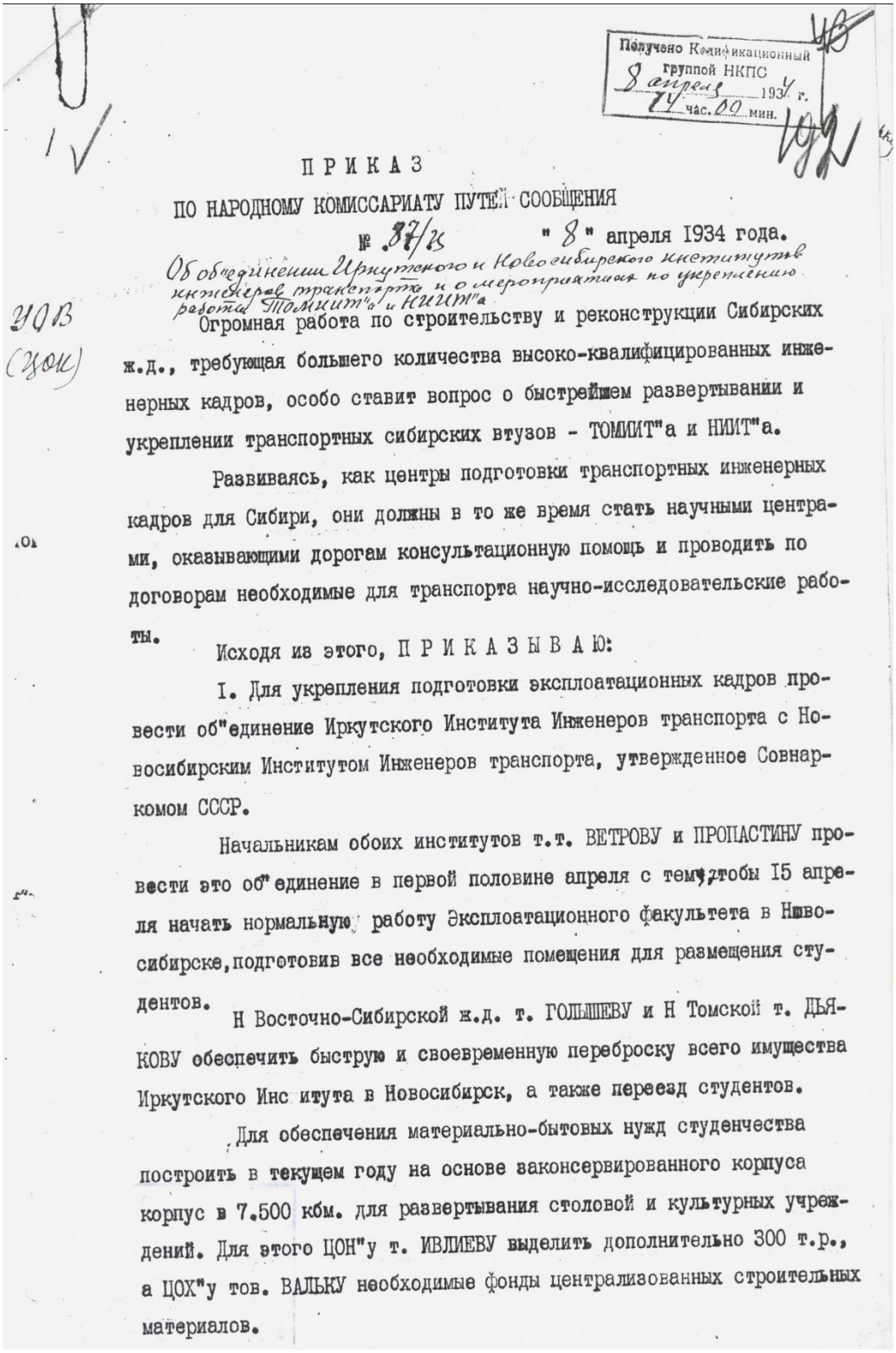
5. Цупкадру персонально ЦОФО т. Стражникову обеспечить окончание проектирования учебных и жилых зданий не позже I/XII-32 г.

6. Цупкадру и Главвелдорстрою к I/XI оформить договором строительство Восточно-Сибирского Института.

Зам. Наркомпути: [подпись] Демосов

№ 29

Приложение 3



Получено Кодификационный группой НКПС 8 апреля 1934 г. 11 час. 00 мин.

ПРИКАЗ

ПО НАРОДНОМУ КОМИССАРИАТУ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ

№ 87/к "8" апреля 1934 года.

Об объединении Иркутского и Новосибирского институтов инженеров транспорта и о мероприятиях по укреплению работы Томмит"а и Ниит"а

Огромная работа по строительству и реконструкции Сибирских ж.д., требующая большего количества высоко-квалифицированных инженерных кадров, особо ставит вопрос о быстрейшем развертывании и укреплении транспортных сибирских втузов - ТОМИИТ"а и НИИТ"а.

Развиваясь, как центры подготовки транспортных инженерных кадров для Сибири, они должны в то же время стать научными центрами, оказывающими дорогам консультационную помощь и проводить по договорам необходимые для транспорта научно-исследовательские работы.

Исходя из этого, П Р И К А З Ы В А Ю:

I. Для укрепления подготовки эксплоатационных кадров провести об"единение Иркутского Института Инженеров транспорта с Новосибирским Институтом Инженеров транспорта, утвержденное Совнаркомом СССР.

Начальникам обоих институтов т.т. ВЕТРОВУ и ПРОПАСТИНУ провести это об"единение в первой половине апреля с тем, чтобы I5 апреля начать нормальную работу Эксплоатационного факультета в Новосибирске, подготовив все необходимые помещения для размещения студентов.

Н Восточно-Сибирской ж.д. т. ГОЛЬШЕВУ и Н Томской т. ДЬЯКОВУ обеспечить быструю и своевременную переброску всего имущества Иркутского Инс итута в Новосибирск, а также переезд студентов.

Для обеспечения материально-бытовых нужд студенчества построить в текущем году на основе законсервированного корпуса корпус в 7.500 кбм. для развертывания столовой и культурных учреждений. Для этого ЦОН"у т. ИВЛИЕВУ выделить дополнительно 300 т.р., а ЦОХ"у тов. ВАЛЬКУ необходимые фонды централизованных строительных материалов.

ЦОПКАДРУ НЕМЕДЛЕННО организовать разработку проектов и смет и Сибстройпути развернуть строительство, с окончанием его в текущем строительном сезоне. Сибстройпути закончить к I5.УП строительство учебного корпуса и сдать в эксплоатацию.

Для укрепления лабораторной базы Новосибирского Втуза ЦД,ЦТ и ЦУС"у совместно с Цопкадром разработать план оборудования и выделить необходимые средства и аппаратуру к I.УП-34г.

Н Томской т. ДЬЯКОВУ и НОСТР Сибстройпути т. ТУЗУКУ предусмотреть выделение из помещений Сибстройпути площади для размещения 200 чел. нового набора /900 кв.метров/.

2. В связи с переездом Управления Томской ж.д. в Новосибирск передать ТОМИИТ"у под учебный корпус здание, занимаемое управлением Томской дороги и ДорГПУ, а для размещения общежитий - помещение занимаемое ныне железнодорожным полком ОГПУ и здание Дорсанотдела. Для размещения руководящего и преподавательского состава передать 35-40 квартир в районе Управления дороги. Все эти помещения передавать по мере освобождения их при переезде Управления в Новосибирск. Для нужд Сибстройпути передать помещение, занимаемое ныне ТОМИИТ"ом.

Цопкадру выделить необходимые средства для приведения в порядок освобождающихся помещений. Цопкадру совместно с ЦВ,ЦТ и ЦОЭ разработать план лабораторного оборудования ТОМИИТ"а, выделив уже в текущем году средства и аппаратуру из своих фондов. Цопкадру представить мне список преподавателей для укрепления преподавтельского состава обоих втузов. Цопкадру выделить из книжных фондов своих старейших библиотек научно-техническую литературу для укрепления библиотек обоих сибирских втузов.

НАРКОМПУТИ /Андреев/

НОВЫЕ МОНОГРАФИИ

В 2010 г. сотрудниками ИрГУПСа Крюковым А.В., Закарюкиным В.П., Абрамовым Н.А., Соколовым В.Ю. опубликованы 2 монографии, в которых изложены результаты многолетней работы в направлении электроснабжения железных дорог.

1. **Крюков А.В., Закарюкин В.П., Абрамов Н.А.** Ситуационное управление режимами систем тягового электроснабжения : монография / под ред. А.В. Крюкова. – Иркутск : ИрГУПС, 2010. – 123 с.

В монографии рассмотрены вопросы управления режимами систем тягового электроснабжения (СТЭ). На основе системного анализа предложена структурно-топологическая классификация систем управления режимами, разработана методика выявления сенсорных элементов в системе тягового электроснабжения, проведен системный анализ особенностей систем тягового электроснабжения и показана необходимость их учета при решении задач управления режимами. В монографии предложена концепция ситуационного управления, основанная на выявлении проблемных ситуаций и преобразовании имеющейся информации в управляющие воздействия, направленные на их разрешение. Разработана методика нечеткой кластеризации мгновенных режимов СТЭ, учитывающая размытость формируемых кластеров и применимая для реализации алгоритмов ситуационного управления СТЭ.

Монография предназначена для инженерно-технических работников, занимающихся эксплуатацией систем тягового и общего электроснабжения, а также для аспирантов и студентов электроэнергетических специальностей.

2. **Крюков А.В., Закарюкин В.П., Соколов В.Ю.** Моделирование систем электроснабжения с мощными токопроводами : монография / под ред. А.В. Крюкова. – Иркутск : ИрГУПС, 2010. – 80 с.

Основное внимание уделено компьютерным технологиям моделирования режимов систем электроснабжения, построенных с использованием симметричных токопроводов напряжением 6 и 10 кВ и многоамперных шинопроводов 0,4 кВ. Моделирование осуществляется на основе фазных координат и решетчатых схем замещения.

Кроме того, рассмотрены вопросы построения математических моделей линий электропередачи, выполненных на основе самонесущих изолированных проводов, а также одножильных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена.

Монография предназначена для инженерно-технических работников, занимающихся эксплуатацией систем электроснабжения, а также для аспирантов и студентов электроэнергетических специальностей.

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

№1(29)

2011

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Ответственный за выпуск **В.Е. Гозбенко**

Подписано в печать 01.03.2011. Формат 60x84/8.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 25.
Уч.-изд. л. 25,7. Тираж 500 экз. Заказ № 5011
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 ООО ПО «Ангарская городская типография»,
г. Ангарск, ул Мира, 18.

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)

© Иркутский государственный университет путей сообщения