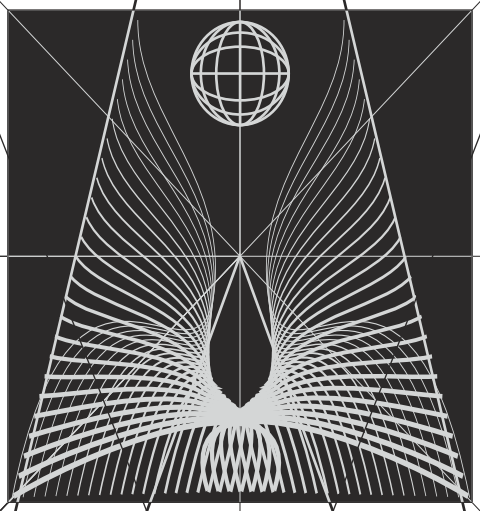
СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

МОДЕЛИРОВАНИЕ



НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

№4(32)
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 №4(32), 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 получить по e-mail: irgups-journal@yandex.ru.

Главный редактор журнала проф., д. т. н. А. П. Хоменко

Предисловие издателя

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

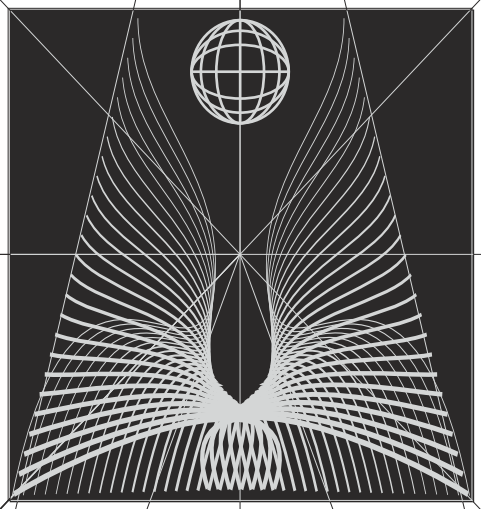
Журнал издается с 2004 г.
Периодичность – 4 номера в год
Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.
Свидетельство ПИ №13-0547 от 24 декабря 2003 г.
Учредитель: Иркутский государственный университет путей сообщения

© 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

№4(32)
2011

Редакционная коллегия

А.П. Хоменко, д. т. н., профессор, главный редактор, ректор ИрГУПС
В.Е. Гозбенко, д. т. н., профессор, зам. главного редактора, ИрГУПС
С.В. Елисеев, д. т. н., 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, профессор, ректор БрГУ
И.В. Бычков, академик РАН, председатель президиума ИФ 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, к. э. н., начальник ВСЖД – филиала ОАО «РЖД»
Ю.Н. Резник, д. т. н., профессор, ректор ЧГУ

Редакционный совет

А.И. Артюнин, д. т. н., профессор
В.Е. Гозбенко, д. т. н., профессор
С.В. Елисеев, д. т. н., профессор, засл. деятель науки РФ
С.К. Каргапольцев, д. т. н., профессор
Ю.М. Краковский, д. т. н., профессор
А.В. Крюков, д. т. н., профессор
А.В. Лукьянов, д. т. н., профессор
Ю.Ф. Мухопад, д. т. н., профессор
В.А. Начигин, к. т. н., начальник службы технической политики ВСЖД – филиала ОАО «РЖД»
С.И. Носков, д. т. н., профессор
В.А. Подвербный, д. т. н., профессор
И.Ю. Сольская, д. э. н., профессор

Журнал издается с 2004 г.

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 I. Современные технологии. Механика и машиностроение

Елисеев С.В., Хоменко А.П. Непланарность в структурных аналогах механических систем с межкоординатными связями 8

Пимштейн П.Г., Еловенко Д.А., Татаринов А.Д. Исследование под давлением оболочки со встроенными в стенку нагревательными элементами и слоем теплоизоляционного материала 17

Каргапольцев С.К., Большаков Р.С. Динамика машин. Математическое обеспечение вычислительного моделирования 23

Груздева Т.В., Климентова К.Б. Метод отсечений для неравенств клик в задаче размещения с предпочтениями клиентов 31

Лапшин В.Л., Глухов А.В. Исследование остаточных деформаций при ударном взаимодействии упруго-вязко-пластичной механореологической модели 39

Зеньков Е.В., Цвик Л.Б., Кулешов А.В. Моделирование мягкого вида напряженного состояния конструктивных узлов на цилиндрических лабораторных образцах с концентраторами напряжений 45

Филиппенко Н.Г., Каргапольцев С.К., Лившиц А.В. Повышение эффективности высокочастотной обработки полимерных материалов 50

Погодин В.К., Вайнберг С.М. Конструкционная прочность бугельных соединений 55

Долотов А.М., Белоголов Ю.И. Напряженно-деформированное состояние тонкостенного клапанного седла пониженной жесткости 62

Чайкин С.В., Банщиков А.В. Условия гироскопической стабилизации одного класса равновесий симметричного гиростата на круговой орбите 65

Ахмадеева А.А., Гозбенко В.Е. Определение главных координат вагона с двухступенчатым рессорным подвешиванием 71

Холодов П.Н. Многокритериальный выбор оптимального решения при проектировании железных дорог 76

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

Коновалов Ю.В. Моделирование электромеханических процессов в синхронном двигателе 84

Мухопад А.Ю., Мухопад Ю.Ф. Конструктивные методы синтеза автоматов управления на больших интегральных схемах 90

Деканова Н.П., Хан В.В. Подходы теории нечетких множеств в задачах диагностики тепловых сетей и объектов теплопотребления 96

Огородников Ю.И. Расчёт допусков на реализацию программного управления в стационарных непрерывных системах 102

Матафонов А.А. Опытно–сравнительные испытания сварочных электродов 107

Куцый Н.Н., Осипова Е.А. Анализаторы чувствительности каскадной системы с двумя интегральными широтно-импульсными регуляторами стабилизации толщины изоляции кабеля 111

Тюпин В.Н., Горковенко Н.А., Алексеев О.Н. Технология очистной выемки маломощных урановых рудных тел с применением узкозахватной погрузочно-доставочной техники 117

Туйгунова А.Г. О необходимости мониторинга состояния изоляции силовых трансформаторов тяговых подстанций с учетом влияния климатических факторов 122

Гозбенко В.Е., Иванков А.Н. Автоматизация расчета внутридорожного плана формирования поездов 127

Деканова Н.П., Могутнов К.С. Разработка системы социальных исследований с учетом методов поисковой оптимизации и статистического анализа 134

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

Закарюкин В.П., Крюков А.В., Шульгин М.С. Параметрическая идентификация силовых трансформаторов в фазных координатах 141

Опарин Г.А., Вартанян Э.К. Алгоритм построения надежных планов решения задачи на объектной модели GRID 148

Титов К.М., Холодов П.Н. Автоматизация расчета определения стоимости шумозащитных мероприятий на стадии вариантного проектирования легкого рельсового транспорта на основе модернизированной методики СНиП II-12-77 «Защита от шума» 154

Крюков А.В., Алексеенко В.А. Повышение эффективности оперативного управления в системах тягового электроснабжения 158

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

Котельников С.С., Иванкова Л.Н., Иванков А.Н. Автоматизированный выбор параметров технико-технологической структуры развития промышленных станций 164

Фрейдман О.А. Исследование рисков в системе логистического менеджмента региона 168

Вавилов Д.В., Ереско С.П., Иптышев А.А., Усаков В.И. Методология компьютерного моделирования зубчатых передач с нормированием показателей точности 173

Новолодская Г.И. Особенности развития национального рынка труда в современных условиях 177

Нехорошков В.П., Дмитренко А.В., Казанцева Л.С., Тукенов Д.Т. Вагонопотоки и грузопотоки на железнодорожном и автомобильном транспорте 182

Жеребцов В.А. Организация учетного процесса на предприятиях, внедряющих систему «Бережливое производство» 189

Викулова Е.Ю. Инвестиционный потенциал региона 193

Лескова Т.М., Черникова Е.С. Кадровая политика ОАО «РЖД» в условиях кризиса с использованием системы менеджмента качества 197

Михеев А.А. Способ комбинированной циркуляции в лесосушильной камере 202

Дегтярева О.С., Козырева Е.В. Планирование общепроизводственных расходов в структурных подразделениях ОАО «РЖД» 205

Зубкова Д.А., Климов Н.Н., Куценко С.М., Дудаков С.В. Автоматизация процессов обработки данных акустической диагностики напряженного состояния бесстыкового железнодорожного пути 209

Бубнов В.А. Влияние бюджетной реформы на региональную экономику 215

Потехина А.М. Новые технологии организации взаимодействия участников перевозочного процесса: маркетинговый подход 220

Зиборева О.Ю. Внутренний аудит расчетов по налогам и сборам 224

Котельников С.С. Алгоритм решения проблемной задачи соответствия технических и технологических параметров работы железнодорожных станций 228

Аршинский Л.В., Жигалов Н.Ю., Мункожаргалов Ц.Б. Неклассические логики в логико-математическом моделировании доказывания по уголовным делам 232

Носков С.И., Протопопов В.А. Оценка уровня уязвимости объектов транспортной инфраструктуры: формализованный подход 241

Новые монографии 245

Список статей, опубликованных в 2011 году 246

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 I. Modern technologies. Mechanics and mechanical engineering

S.V. Eliseev, A.P. Khomenko Nonplane ties in mechanical oscillation systems calculation of intercoordinate connections 8

P.G. Pimshtein, D.A. Elovenko, A.D. Tatarinov The research of enclosure under pressure with heating element installed in wall with heat insulation material layer 17

S.K. Kargapolcev, R.S. Bolshakov Dynamics of machines. Mathematical settlement of digital modelling 23

T.V. Gruzdeva, K.B. Klimentova A cutting plane method for clique inequalies in simple plant location problem with clients' preferences 31

V.L. Lapshin, A.V. Gluhov The research of residual deformations of shock interaction process elastic-viscous-plastic mechanoreological model 39

E.V. Zenkov. L.B. Tsvik, A.V. Kuleshov Modelling the soft kind of mode of deformation of the constructive units on the cylindrical laboratory benchmarks with concentrators of stress 45

N.G. Filippenko, S.K. Kargapolcev, A.V. Livchitc Improving of effective processing by high-frequency currents of polymers 50

V.K. Pogodin, S.M. Vainberg Structural strength clip joints 55

A.M. Dolotov, Yu.I. Belogolov The intense-deformed condition of a thin-walled valved saddle of the downgraded rigidity 62

S.V. Chaikin, A.V. Banshchikov Conditions for gyroscopic stabilization of the certain class of equilibriums of symmetrical gyrostat on a circular orbit 65

A.A. Akhmadeeva, V.E. Gozbenko Definition of the main coordinates of the car with two-level spring suspension 71

P.N. Kholodov Multicriteria trade-off when designing the railways 76

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

Yu.V. Konovalov Modeling of electromechanical processes in the synchronous motors 84

A.Yu. Muckopad, Yu.E. Mukhopad Constructive methods of synthesis automation management on greater integral scheme 90

N.P. Dekanova, V.V. Khan Fuzzy sets theory approaches to heat supply network and heat consumption object diagnostic problem 96

Yu.I. Ogorodnikov Computation of tolerances for implementation of program control in the time-invariant continuous systems 102

A.A. Matafonov Experimental-comparative data of spot welding electrodes 107

N.N. Kucyi, E.A. Osipova The sensitivity analyzers of cascade control system with two integral pulse-duration controllers of cable insulation thickness stabilization 111

V.N. Tyupin, N.A. Gorkovenko, O.N. Alexseyev Sewage cutting technology of low-capacity uranium mineral ores with an application of domestic narrow-clamp load-delivery technique 117

A.G. Tuigunova About necessity of monitoring of the condition of isolation of power transformers of traction substations taking into account influence of climatic factors 122

V.E. Gozbenko, A.N. Ivankov Automation of calculation of the intraroad plan of formation of trains 127

N.P. Dekanova, K.S. Mogutnov Social research system development with search optimization and statistic analysis techniques 134

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

V.P. Zakaryukin, A.V. Kryukov, M.S. Shulgin Parametrical identification of power transformers in phase domain 141

G.A. Oparin, E.K. Vartanyan The algorithm of construction of the reliable plans of problem solving on the object GRID model 148

K.M. Titov, P.N. Holodov Automate the calculation determining the value of noise-reducing activities during the design variant light rail on the basis of a modernized method of SNiP II-12-77 «Protection against noise» 154

A.V. Kryukov, V.A. Alekseenko Raise of efficiency of on-line control in systems of the traction electric-power supply 158

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

S.S. Kotelnikov, L.N. Ivankova, A.N. Ivankov Automated selection of the parameters of technical and technological structure of the industrial railway station 164

O.A. Freidman Risk's study of the regional logistics management system 168

D.V. Vavilov, S.P. Eresko, A.A. Iptyshev, V.I. Usakov Metodology of computer simulation of spur gears with accurency rate normalizing 173

G.I. Novolodskaya Features of development of the national labor market under current conditions 177

V.P. Nekhoroshkov, A.V. Dmitrenko, L.S. Kazantseva, D.T. Tukenov Car traffic and cargo traffic on a railway and automobile transport 182

V.A. Zherebtsov Organization accounting process at the enterprises are adoptinging a system of «Lean production» 189

E.Yu. Vikulova Investive potential of the region 193

T.M. Leskova, E.S. Chernikova Personnel selection of open society «Russian railway» in the conditions of crisis with use of system of a quality management 197

A.A. Mikheev The method of combined circulation in timber drying chamber 202

O.S. Degtyareva, E.V. Kozyreva Planning of the whole production expenses in the structural subdivisions of the public stock company «Russian railways» branches 205

D.A. Zubkova, N.N. Klimov, S.M. Kutsenko, S.V. Dudakov The automation of the processes of the date processing of acoustic diagnostics of the intense condition of the long-welded rails 209

V.A. Bubnov Influence of budgetary reform on regional economy 215

A.M. Potiekhina New production engineering of the organization of interacting participants of transportation process: the marketing approach 220

O.U. Ziboreva The internal tax audit 224

S.S. Kotelnikov The algorithm of solution of a problem of matching of technical and technological parameters of railway stations 228

L.V. Arshinskiy, N.Y. Zhigalov, Z.B. Munkozhargalov Application of non-classical logics in logical-mathematical modeling of judicial proof in criminal cases 232

S.I. Noskov, V.A. Protopopov Assessment of the level of vulnerability of the objects of transport infrastructure: a formalized approach 241

New monography 245

The list of articles published in 2011 246

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 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. С аспирантов плата за публикацию рукописей не взимается.

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

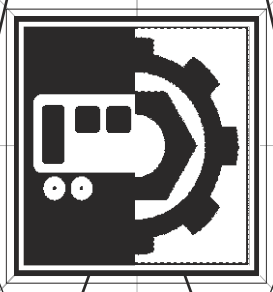
Министерство образования и науки Российской Федерации
Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта

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

Елисеев Сергей Викторович,
профессор, д. т. н., директор НИИ СТСАМ ИрГУПС,
Хоменко Андрей Павлович,
профессор, д. т. н., ректор ИрГУПС

НЕПЛАНАРНОСТЬ В СТРУКТУРНЫХ АНАЛОГАХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С МЕЖКООРДИНАТНЫМИ СВЯЗЯМИ

S.V. Eliseev, A.P. Khomenko

NONPLANE TIES IN MECHANICAL OSCILLATION SYSTEMS CALCULATION OF INTERCOORDINATE CONNECTIONS

Аннотация. *Рассматриваются механические колебательные системы с несколькими степенями свободы и их структурные аналоги в виде механических цепей. Предлагается метод исключения непланарных связей и преобразование системы к обычному виду. Показано, что непланарность формируется особенностями связей между парциальными системами. В частности, такие особенности имеют твердые плоские тела в структуре механических колебательных систем.*

Ключевые слова: *непланарность, механические цепи, дуальные элементы, передаточные функции.*

Abstract. *Mechanical oscillation systems with several degrees of freedom and their structural analogies as mechanical chains are considered. The method of exception of nonplane ties and transformation of system to ordinary form are offered. Nonplane properties are explained as connection between parcial systems. For example such ties are formatting when rigid bodies are using in structures of mechanical oscillation systems.*

Keywords: *nonplane ties mechanical chains, dual elements of chains, transfer functions.*

Введение

Динамические взаимодействия в механических системах, имеющих в структуре замкнутые контуры, обладают особенностями работы. В [1, 2] рассматривается ряд вопросов, однако проблема требует учета взаимодействия в системах элементов, которые по своим параметрам и структуре отличаются от простых элементов. Такими элементами механических систем могут быть звенья в виде твердого тела, совершающего плоское (не элементарное) движение. Динамика такого элемента определяется двумя координатами, что представляет более сложную схему взаимодействий. Теория механических цепей может быть распространена и на системы с твердыми телами. Вместе с тем, при всех возможных совпадениях имеются и некоторые принципиальные отличия. Можно полагать, что характерные особенности проявляются в рычажных связях, точнее в их физических формах реализации. Частично, эти вопросы затрагивались в работах [3, 4, 5].

I. В предлагаемой работе рассматриваются характерные свойства динамических связей в системах различного типа. На рис. 1, *а, б* представлены расчетные схемы цепной (рис. 1, *а*) и смешан-

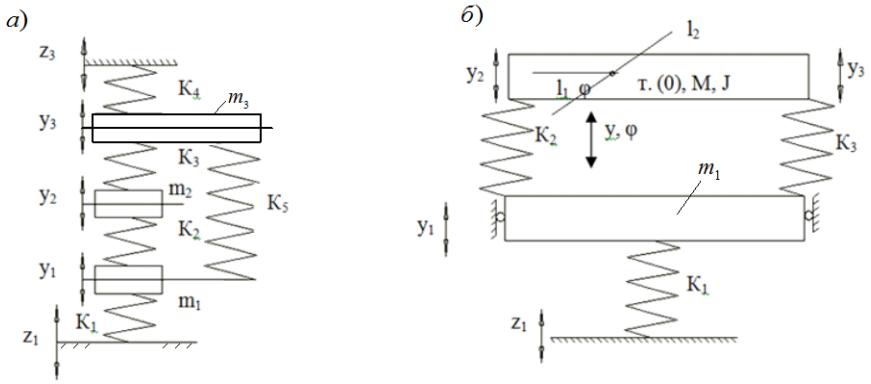


Рис. 1. Расчетные схемы механических систем цепного (а) и смешанного (б) типов

ной (рис. 1, *б*) механических систем. Для описания движения используются координаты y_1, y_2, y_3 и y_1, y_2, φ в неподвижной системе отсчета; точка (0) – центр тяжести твердого тела с массой M и моментом инерции *J*; m_1, m_2, m_3 – массы, а K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 – коэффициенты жесткости отдельных элементов.

На рис. 1, *а* через K_5 обозначена межкоординатная связь между m_1 и m_3. Для твердого тела на рис. 1, *б* межкоординатная связь (между y_2 и y_3) обеспечивается рычажными свойствами твердого тела в плоском движении [5].

Для расчетной схемы на рис. 1 выражения для кинетической и потенциальной энергии имеют вид

$$T = \frac{1}{2}m_1\dot{y}_1^2 + \frac{1}{2}m_2\dot{y}_2^2 + \frac{1}{2}m_3\dot{y}_3^2, \quad (1)$$

$$П = \frac{1}{2}K_1(y_1 - z_1)^2 + \frac{1}{2}K_2(y_2 - y_1)^2 + \frac{1}{2}K_3(y_3 - y_2)^2 + \frac{1}{2}K_4(y_3 - z_3)^2 + \frac{1}{2}K_5(y_3 - y_1)^2. \quad (2)$$

Система уравнений для механической системы (рис. 1, *а*) принимает вид

$$m_1\ddot{y}_1 + y_1(K_1 + K_2 + K_3) - K_2y_2 - K_5y_3 = K_1z_1, \quad (3)$$

$$m_2\ddot{y}_2 + y_2(K_2 + K_3) - K_2y_1 - K_3y_3 = 0, \quad (4)$$

$$m_3\ddot{y}_3 + y_3(K_3 + K_4 + K_5) - K_5y_1 = K_4z_3. \quad (5)$$

Для механической системы на рис. 1, *б* выражения для кинетической и потенциальной энергии принимает вид

$$T = \frac{1}{2}m_1\dot{y}_1^2 + \frac{1}{2}M\dot{y}^2 + \frac{1}{2}J\dot{\varphi}^2, \quad (6)$$

$$П = \frac{1}{2}K_1(y_1 - z_1)^2 + \frac{1}{2}K_2(y_2 - y_1) + \frac{1}{2}K_3(y_3 - y_1)^2. \quad (7)$$

Система уравнений движения для системы (рис. 1, *б*) может быть записана:

$$m_1\ddot{y}_1 + y_1(K_1 + K_2 + K_3) - K_2y_2 - K_3y_3 = K_1z_1, \quad (8)$$

$$(Ma^2 + Jc^2)\ddot{y}_2 + y_2K_2 + (Mab - Jc^2)\ddot{y}_3 - K_2y_1 = 0, \quad (9)$$

$$(Mb^2 + Jc^2)\ddot{y}_3 + y_3K_3 + (Mab - Jc^2)\ddot{y}_2 - K_3y_1 = 0, \quad (10)$$

где $a = \frac{l_2}{l_1 + l_2}; b = \frac{l_1}{l_1 + l_2}; c = \frac{1}{l_1 + l_2}$. На рис. 2, *а, б* приведены структурные схемы системы, движение которых описывается уравнениями (3)–(5) – рис. 2, *а*, а также уравнениями (8)–(10) – рис. 2, *б*. В структурных схемах введен ряд соотношений:

$$y = ay_2 + by_3, \varphi = (y_3 - y_2)c,$$

$$y_2 = y - l_1\varphi, \; y_3 = y + l_2\varphi. \quad (11)$$

В табл. 1 приведены для сравнения значения коэффициентов уравнений (3)–(5) и (8)–(10).

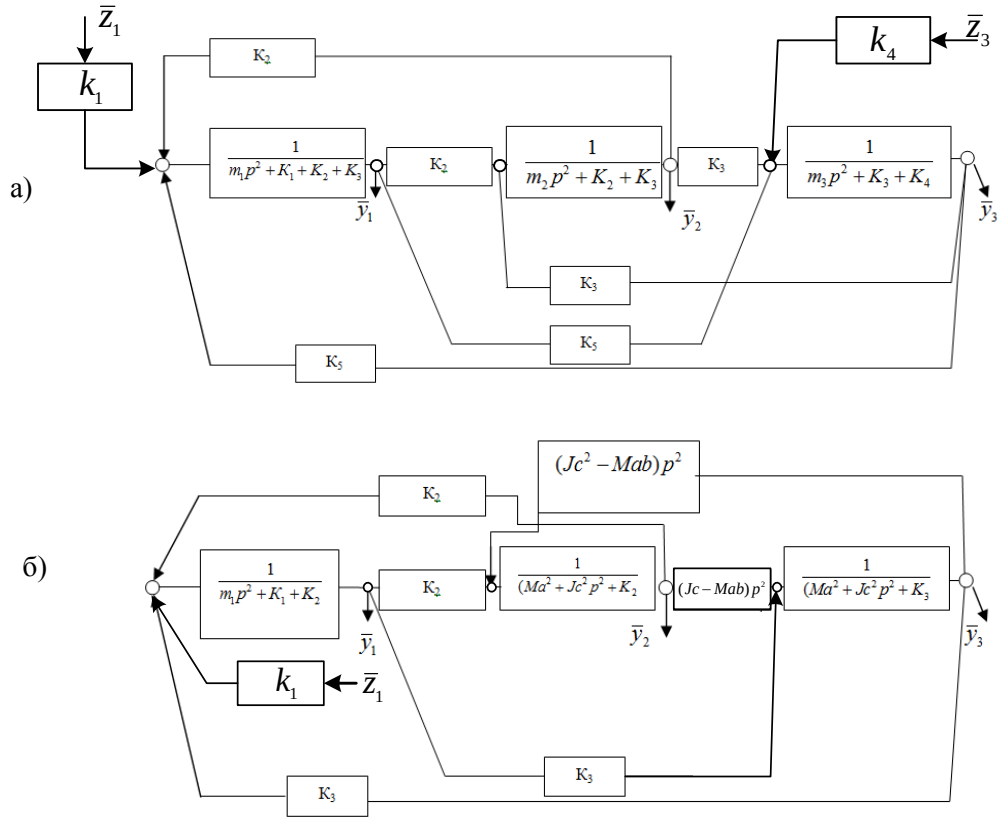


Рис. 2. Структурные схемы для цепной системы (а) и для системы смешанного типа (б)

Сопоставление показывает, что система смешанного типа (рис. 2, *б*) отличается от цепной системы (рис. 2, *а*) тем, что межкоординатная связь между y_2 и y_3 разная. Если в системе цепного типа связь имеет упругий характер, то для системы смешанного типа (рис. 2, *б*) связь носит инерционный характер. Принимая во внимание предложения [4] по расширению системы типовых звеньев механических колебательных систем, можно полагать, что в системах смешанного типа используются обобщенные пружины в виде типовых элементов с передаточной функцией звена дифференцирования второго порядка. Отметим при этом, что демпфер может рассматриваться в такой ситуации как дифференцирующее звено первого порядка.

Схему на рис. 1, *а* можно преобразовать, как показано на рис. 3, *а, б*.

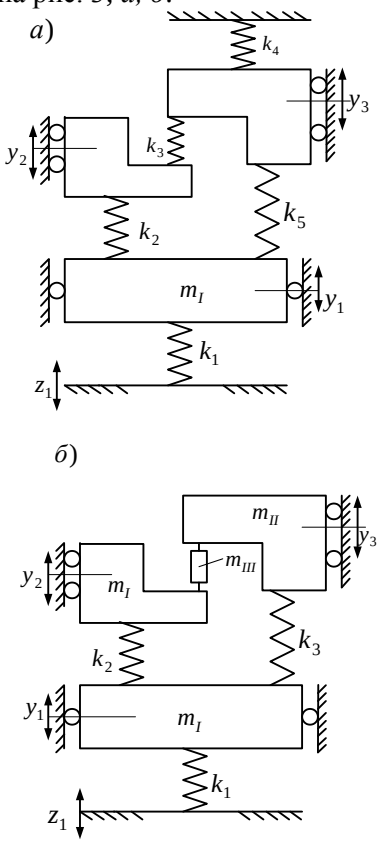


Рис. 3. Расчетные схемы системы цепного (а) и смешанного (б) типов, преобразованные для демонстрации замкнутого контура на элементах m_1

Если на рис. 3, *а* полагать, что $K_4 = 0$, то упругий элемент K_5 по сравнению со схемой на рис. 3, *б* выполняет такую же функцию, как и упругий элемент K_3. Примем, что блок I на рис. 3, *б* соответствует элементу с массой $m_I = Ma^2 + Jc^2$ в уравнении (9), а $m_{II} = Mb^2 + Jc^2$, соответственно, можно отнести к уравнению (10); в свою очередь $m_{III} = Mab - Jc^2$. Отметим, что элемент m_{III} выполняет в системе смешанного типа (рис. 3, *б*) ту же функцию, что и K_3 в схеме на рис. 3, *а*. Однако эти связи имеют различную физическую природу. В схеме на рис. 3, *б* эта связь является инерционной, а на рис. 3, *а* такая связь является упругой. Сравнение дает основание в силу тождества функций (силовое взаимодействие) полагать, что инерционная связь может быть отнесена к классу обобщенных пружин [3].

Таким образом, механические системы, имеющие в своем составе звенья в виде твердых тел, могут рассматриваться как особые элементы, выполняющие те же функции, что и обычные упругие элементы, то есть обеспечивающие соединение. Однако это не совсем так, поскольку эти инерционные элементы привносят определенные особенности через присущие им рычажные связи.

II. Рассмотрим особенности динамических взаимодействий в механической системе, представленной на рис. 1, *б*. Используя (8)–(10), запишем, что

$$\overline{y}_2 = \frac{K_2\overline{y}_1 + \overline{y}_3(Jc^2 - Mab)p^2}{(Ma^2 + Jc^2)p^2 + K_2} = a_1\overline{y}_1 + b_1 y_3, \quad (12)$$

где $p = j\omega$. Тогда

$$a_1 = \frac{K_2}{(Ma^2 + Jc^2)p^2 + K_2}, \quad (13)$$

$$b_1 = \frac{(Jc^2 - Mab)p^2}{(Ma^2 + Jc^2)p^2 + K_2}. \quad (14)$$

Система уравнений (8)–(10) с учетом (12) может быть приведена к виду

$$\overline{y}_1(m_1p^2 + K_1 + K_2 + K_3 - K_2a_1) - \overline{y}_3(K_2b_1 + K_3) = K_1z_1, \quad (15)$$

$$\overline{y}_3[(Mb^2 + Jc^2)p^2 + K_3 - (Jc^2 - Mab)p^2b_1] - \\ -\overline{y}_1[(-Jc^2 + Mab)a_1 + K_3) = 0. \quad (16)$$

Уравнениям (15), (16) соответствует структурная схема, приведенная на рис. 4.

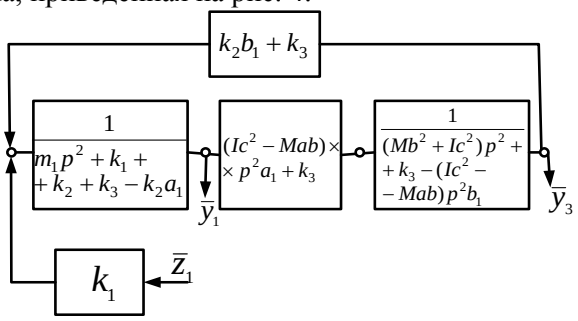


Рис. 4. Структурная схема, соответствующая системе уравнений (15), (16)

Перекрестные связи в системе имеют передаточную функцию

$$W_1(p) = K_2 b_1 + K_3 = \frac{K_2(Jc^2 - Mab)p^2}{(Ma^2 + Jc^2)p^2 + K_2} + K_3. \quad (17)$$

Аналогично получим, что

$$(Jc^2 - Mab)p^2 a_1 + K_3 = \frac{K_2(Jc^2 - Mab)p^2}{(Ma^2 + Jc^2)p^2 + K_2} +$$

$$+K_3 = K_2 b_1 + K_3.$$

Рассмотрим отдельно блоки парциальных подсистем на структурной схеме (рис. 4):

$$\frac{1}{m_1 p^2 + K_1 + K_2 + K_3 - \dfrac{K_2^2}{(Ma^2 + Jc^2)p^2 + K_2}} = \quad (18)$$

$$= \frac{1}{m_1 p^2 + K_1 + \dfrac{(K_2 + K_3)(Ma^2 + Jc^2)p^2 - K_2 K_3}{(Ma^2 + Jc^2)p^2 + K_2}}.$$

Введем в знаменатель (18) выражение

$$-\frac{K_2(Jc^2 - Mab)p^2}{(Ma^2 + Jc^2)p^2 + K_2} + \frac{K_2(Jc^2 - Mab)p^2}{(Ma^2 + Jc^2) + K_2},$$

тогда

$$\frac{1}{m_1 p^2 + K_1 + \dfrac{K_2(Ma^2 + Jc^2)p^2 + K_3(Ma^2 + Jc^2)p^2 + \ldots}{(Ma^2 + Jc^2)p^2 + K_2}} \ldots \quad (19)$$

$$\ldots \frac{1}{\dfrac{+K_2 K_3 - K_2(Jc^2 - Mab)p^2 + K_2(Jc^2 - Mab)p^2}{(Ma^2 + Jc^2)p^2 + K_2}} =$$

$$= \frac{1}{m_1 p^2 + K_1 + K_3 + \dfrac{K_2(Ma^2 + Jc^2)p^2 + K_2 Map^2}{(Ma^2 + Jc^2)p^2 + K_2}}.$$

Знаменатель (19) определяет структуру парциальной системы по координате y_1. Рассмотрим парциальную систему по координате y_3:

$$\frac{1}{(Mb^2 + Jc^2)p^2 + K_3 - \ldots}$$

$$\ldots \frac{}{- \dfrac{(Jc^2 - Mab)^2 p^4 + K_2(Jc^2 - Mab)p^2 - K_2(Jc^2 - Mab)p^2}{(Ma^2 + Jc^2)p^2 + K_2}} = \quad (20)$$

$$\frac{1}{(Mb^2 + Jc^2)p^2 + K_3 + \ldots}$$

$$\ldots \frac{}{+ \dfrac{K_2(Jc^2 - Mab)p^2 - (Mab + Jc^2)p^2[(Jc^2 - Mab)p^2) + K_2]}{(Ma^2 + Jc^2)p^2 + K_2}}.$$

Структурная схема для системы (рис. 4) может быть преобразована, как показано на рис. 5.

Полученная структурная модель исходной системы (рис. 1, *б*) в координатах $y_1 \div y_3$ имеет форму математической модели системы с двумя степенями свободы y_1 и y_3. Внешнее воздействие проводится через массоинерционный элемент m_1 (в данном случае – это кинематическое возмущение z_1), при этом координата y_2 исключается в результате преобразований, как это было показано выше. Исключение y_2 приводит к появлению дополнительных связей, физический смысл которых связан с реализацией функций упругих элементов с параметрами, зависящими от частоты. Такие дополнительные элементы могут быть названы, как и ранее, обобщенными пружинами. Однако эти элементы отличаются между собой по функциональному назначению. Приведем для сравнения структурную модель из простых дуальных элементов [5], отражающую динамические свойства механической системы с двумя степенями свободы и состоящей из двух массоинерционных элементов M_1 и M_2, как показано на рис. 6, *а–д*.

При сравнении математических моделей на рис. 5 и 6, *б* видны детали их совпадений. Это касается элементов K_1 и K_2 на рис. 6, *б* и элементов

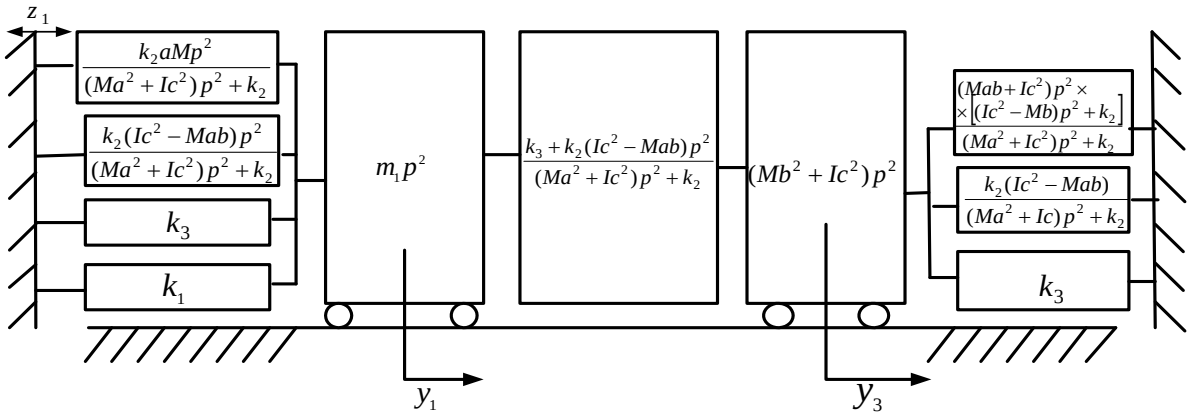


Рис. 5. Структурная схема для системы на рис. 4 с использованием представлений об обобщенных дуальных элементах

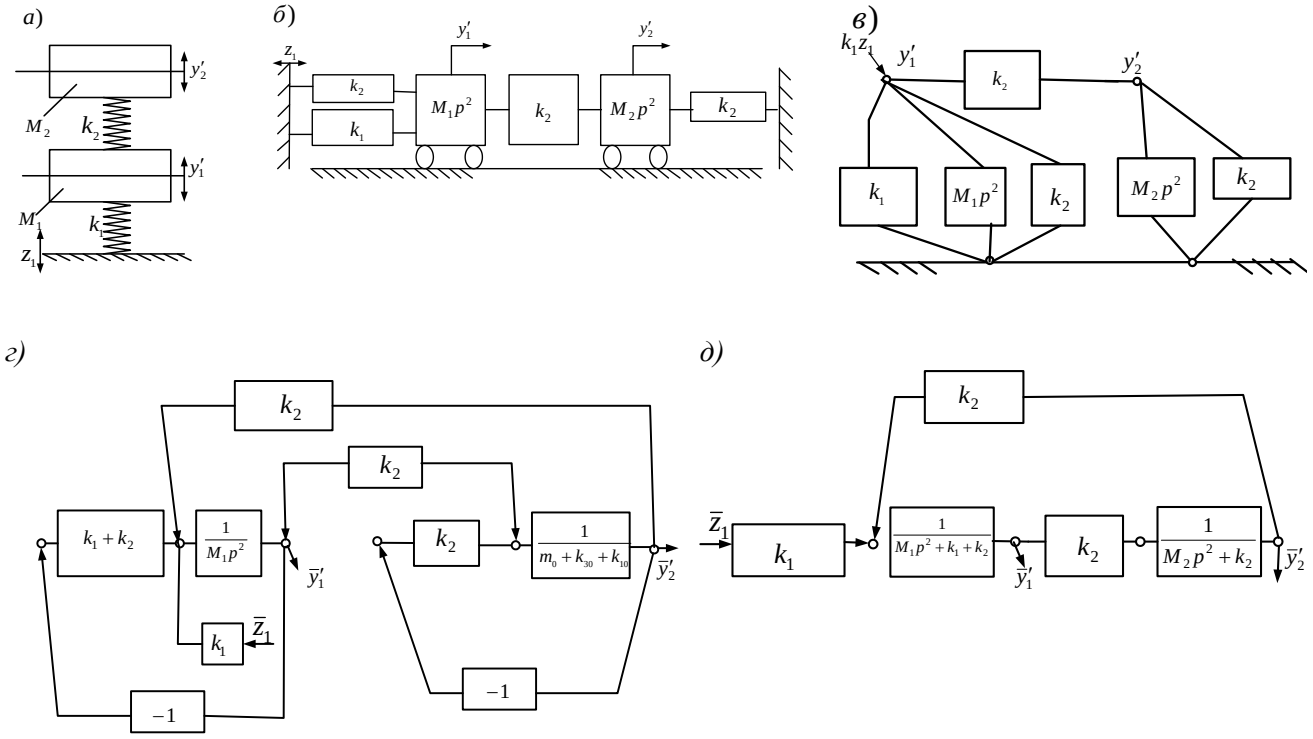


Рис. 6. Варианты структурных представлений системы с двумя степенями свободы

с передаточными функциями K_1, K_3

$$W^*(p)=\frac{K_2(Jc^2-Mab)p^2}{(Ma^2+Jc^2)p^2+K_2}. \qquad (21)$$

Что касается элемента с передаточной функцией $W^*(p)$, то при $p=0-W^*(p)=0$, при $p\to 0-W^*(p)\to\frac{K_2(Jc^2-Mab)}{Ma^2+Jc^2}$, что отражает рычажные взаимодействия между движениями по координатам y_1 и y_3. Если $Mab=Jc^2$, то действие рычажных связей разрушается. Отмеченное обстоятельство является важным в том плане, что наличие твердого тела, как более сложного звена (по сравнению с материальной точкой), изменяет представления о пространстве движения системы, поскольку движение по координатам y_1 и y_3 геометрически разнесены. Связь между движениями носит инерционный характер и отражается через силы, формируемые рычагом. Поэтому в передаточной функции $W^*(p)$ присутствует жесткость пружины K_2 и безразмерный коэффициент $\frac{Jc^2-Mab}{Ma^2+Jc^2}$.

III. Если ограничиться рассмотрением связей только между координатами y_2 и y_3, то связь между парциальными системами отображается, как показано на рис. 7, на примере обычной системы с двумя степенями свободы и координатами y_1' и y_2'.

Отметим, что $(Jc^2-Mab)p^2$ представляет силу, которая действует только между массоинерционными элементами (Ma^2-Jc^2) и (Mb^2+Jc^2), что соответствует взаимодействиям в равноплечем рычаге. Такой рычаг обеспечивает разнесение сил в пространстве, однако сама сила инерционной связи зависит от частоты. Расчетная схема на рис. 7 может быть приведена к виду, показанному на рис. 8.

Рассмотрим структуру инерционной силы $(Jc^2-Mab)p^2$. Так как $a=\frac{l_2}{l_1+l_2};b=\frac{l_1}{l_1+l_2};c=\frac{1}{l_1+l_2}$, то $(Jc^2-Mab)p^2=p^2\left(J\frac{1}{(l_1+l_2)^2}-\frac{Ml_1l_2}{(l_1+l_2)^2}\right)$.

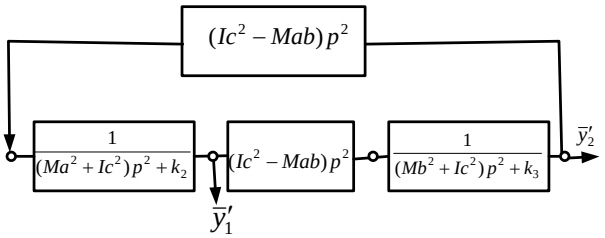


Рис. 7. Структурная схема блока системы (рис. 1, *б*) в координатах y_2, y_3

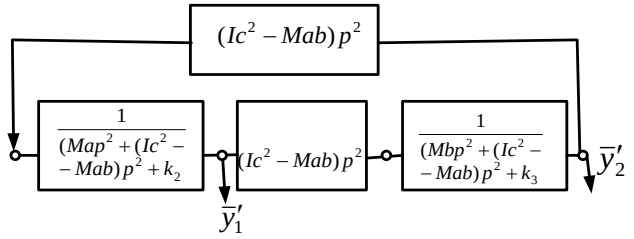


Рис. 8. Приведенная структурная схема по отношению к инерционной силе взаимодействия между массоинерционными элементами

Если параметр $l_1 + l_2$ рассматривать по отношению к стержню (или рычагу), то параметр $\frac{J}{(l_1 + l_2)}$ в физическом смысле можно соотносить с вращательным движением относительно центра тяжести (J) и, в конечном итоге, перейти к рассмотрению инерционных свойств материальной точки с массой $\frac{J}{(l_1 + l_2)}$, отнесенной на конец рычага длиной $l_1 + l_2$. В этом случае вращательное движение формирует динамическое взаимодействие, возникающее при вращательном движении стержня с двумя материальными точками по концам (возникает часть динамической реакции равная $Jc^2 p^2$). Поступательная компонента движения твердого тела обеспечивается силой инерции, которая приложена в центре тяжести. Часть инерционной силы, приходящейся на координату y_1', в частности, определяется из условия $Ml_2 = M_1(l_1 + l_2)$, откуда $M_1 = M\frac{l_2}{l_1 + l_2}$. Здесь M_1 означает приведенную массу к координате y_2, в частности, $M_1 = Ma$ (рис. 8). Для того, чтобы определить реакцию на приведенную к координате y_3 массу, $M_2 = M\frac{l_1}{l_1 + l_2} = Mb$, необходимо из компоненты силы инерции, определяемой массой M_1, перенести параллельно самим себе в центр тяжести и определить возникающий момент от пары сил. Если этот момент пары сил отнести к длине $l_1 + l_2$, то реакция на силу инерции по координате y_2' (рис. 8) будет равен $\frac{Ml_1l_2}{(l_1 + l_2)^2}$ или Mab. То есть существующий в твердом теле рычаг, что связано с представлениями о пространственных или геометрических формах твердого тела, обеспечивает связь в силовых взаимодействиях элементов. Аналогично обеспечивается динамическое взаимодействие по координате y_1' (рис. 8). Приведенный пример на системе с двумя степенями свободы дает представление о том, как формируются динамические взаимодействия в соответствии с законами механики.

IV. Более сложными формами взаимодействия отличаются (рис. 5) те элементы, которые представлены в парциальных системах. Если с элементами K_1, K_3 и $W^*(p)$ не возникает особых сложностей и их наличие имеет аналогии с обычными системами (рис. 7, 8), то другие элементы, имеющие передаточные функции

$$W_1^*(p) = \frac{K_2 aMp^2}{(Ma^2 + Jc^2)p^2 + K_2}, \quad (22)$$

$$W_2^*(p) = -\frac{p^2(Ma^2 + Jc^2)[(Jc^2 - Mab)p^2 + K_2]}{(Ma^2 + Jc^2)p^2 + K_2}, \quad (23)$$

представляют собой обобщенные пружины, которые, также как пружина K_1, взаимно действуют с массоинерционными элементами парциальной системы. Обобщенная пружина с жесткостью $\left|W_1^*(p)\right|$ в физическом плане отражает динамическое воздействие приведенной массы Ma, относящейся к координате y_2, на элемент массой m_1. Последнее связано со свойством массоинерционных элементов формировать взаимодействия не только между собой, но и с основанием. Что касается элемента $W_2^*(p)$ в структуре, то парциальной системы по y_3 это также обобщенная пружина, которая формирует реакцию от массоинерционного элемента по координате y_2. Его особенностью является то обстоятельство, что при $p = 0$ это пружина, жесткость которой зависит от частоты, имеет нулевое значение. В этом отношении (22) и (23) совпадают, однако при $p \to \infty$ их свойства будут различны. При частоте

$$\omega^2 = \frac{K_2}{Jc^2 - Mab} \quad (24)$$

обобщенная пружина будет иметь нулевую жесткость. Если разложить (24) на составные части, то можно получить:

$$W_2^{*\prime}(p) = -\frac{p^4(-Mab + Jc^2)(Jc^2 - Mab)}{(Ma^2 + Jc^2)p^2 + K_2} = \frac{p^4(Jc^2 - Mab)^2}{(Ma^2 + Jc^2)p^2 + K_2}, \quad (25)$$

$$W_2^{*\prime\prime}(p) = -\frac{K_2(-Mab + Jc^2)p^2}{(Ma^2 + Jc^2)p^2 + K_2}, \quad (26)$$

Что касается элемента, жесткость которого определяется (26), то его появление определяется теми же причинами, что и (22). Обобщенная пружина (22) формирует то же влияние со стороны

массоинерционного элемента по координате y_2 на элемент по координате y_3, как и на элемент m_1 по координате y_1.

Пружина (25) отражает влияние на массоинерционный элемент по координате y_3 с учетом инерционных связей. Поскольку координата y_2 исключена при преобразовании из прямого контакта с элементом m_1, то влияние на парциальную систему по координате y_3 носит несимметричный характер. Отметим, что такая несимметричность характерна для непланарных систем.

V. Рассмотрим исходную систему (рис. 1 б), но вместо координат y_2 и y_3 используем координаты y и φ. Введем ряд соотношений:

$$y_2 = y - l_1\varphi,\ \ y_3 = y + l_2\varphi,\ \ \varphi = \frac{y_3 - y_2}{l_1 + l_2} = c\varphi,$$

$$c = \frac{1}{l_1 + l_2},\ \ y = a_2 y_2 + b_2 y_3, \qquad (27)$$

$$a_2 = \frac{l_2}{l_1 + l_2},\ \ b_2 = \frac{l_1}{l_1 + l_2}.$$

Выражение для кинетической и потенциальной энергии в этом случае принимает вид

$$T = \frac{1}{2}m_1\dot{y}_1^2 + \frac{1}{2}M\dot{y}^2 + \frac{1}{2}J\dot{\varphi}^2, \qquad (28)$$

$$П = \frac{1}{2}K_1(y_1 - z_1)^2 + \frac{1}{2}K_2(y - l_1\varphi - y_1)^2 + \frac{1}{2}K_3(y + l_2\varphi - y_1)^2. \qquad (29)$$

После некоторых вспомогательных преобразований система уравнений примет вид

$$m_1\ddot{y}_1 + y_1(K_1 + K_2 + K_3) - y(K_2 + K_3) + \varphi(K_2l_1 - K_3l_2) = K_1z_1, \qquad (30)$$

$$M\ddot{y} + y(K_2 + K_3) - y_1(K_2 + K_3) + \varphi(K_3l_2 - K_2l_1) = 0, \qquad (31)$$

$$J\ddot{\varphi} + \varphi(K_2l_1^2 + K_2l_2^2) + y_1(K_2l_1 - K_3l_2) + y(K_3l_2 - K_2l_1) = 0. \qquad (32)$$

Полагая, что $\bar{\varphi} = a_3y_1 + b_3y_3$,

где

$$a_3 = \frac{K_3l_2 - K_2l_1}{Jp^2 + K_2l_1^2 + K_3l_2^2}, \qquad (33)$$

$$b_3 = \frac{K_2l_1 - K_3l_2}{Jp^2 + K_2l_1^2 + K_3l_2^2}. \qquad (34)$$

Преобразуем (30)–(32) к виду

$$\bar{y}_1\left[m_1p^2 + K_1 + K_2 + K_3 - \frac{(K_3l_2 - K_2l_1)^2}{Jp^2 + K_2l_1^2 + K_3l_2^2}\right] - y\left[K_2 + K_3 - \frac{(K_2l_1 - K_3l_2)^2}{Jp^2 + K_2l_1^2 + K_3l_2^2}\right] = K_1z, \qquad (35)$$

$$y\left(Mp^2 + K_2 + K_3 - \frac{(K_3l_2 - K_2l_1)^2}{Jp^2 + K_2l_1^2 + K_3l_2^2}\right) - y_1\left[K_2 + K_3 - \frac{(K_3l_2 - K_2l_1)^2}{Jp^2 + K_2l_1^2 + K_3l_2^2}\right] = 0. \qquad (36)$$

Структурная схема системы в соответствии с (35), (36) примет вид, показанной на рис. 9.

При выбранных координатах структурная модель с дуальными элементами принимает вид (рис. 10), позволяющий оценить жесткости вводимых связей.

При выборе координат $\bar{y}_1$ и $\bar{y}$ схема имеет более простой вид. Взаимодействие между парциальными системами осуществляется через упругие элементы K_2 и K_3, что определяет динамические свойства поступательного движения. Что касается обобщенной пружины с передаточной функцией:

$$W^{**}(p) = -\frac{(K_3l_2 - K_2l_1)^2}{Jp^2 + K_2l_1^2 + K_3l_2^2}, \qquad (37)$$

то этот элемент отражает динамическое взаимодействие элементов системы при вращательном движении твердого тела. Произведем преобразование с использованием (37); запишем

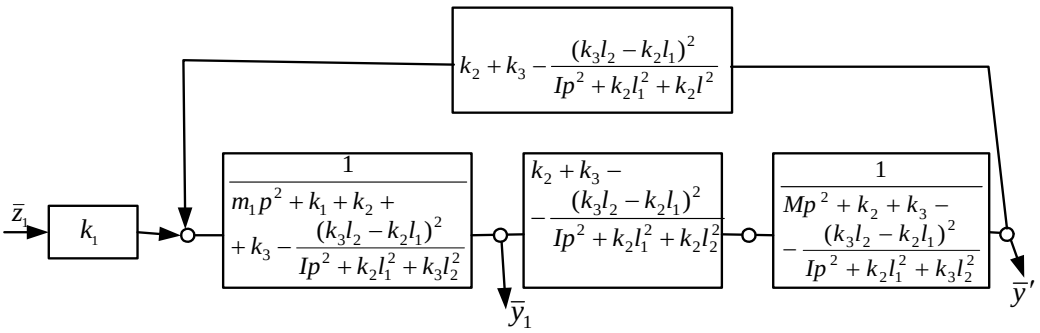


Рис. 9. Структурная схема системы в координатах $\bar{y}_1, \bar{y}$

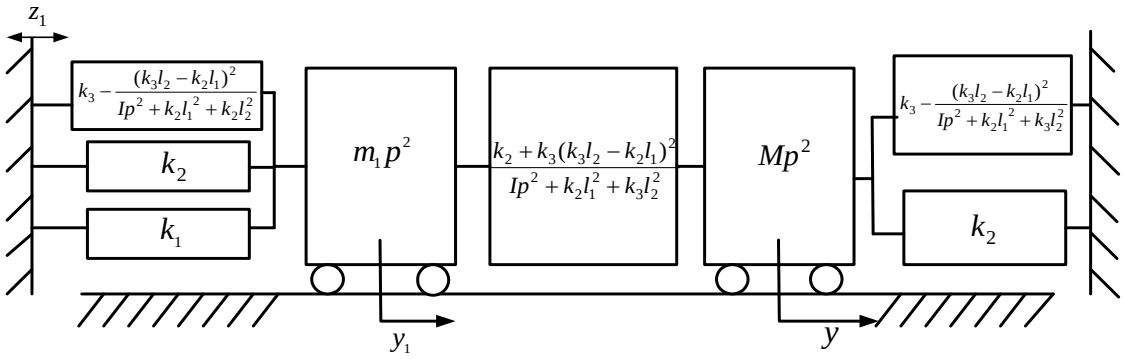


Рис. 10 Структурная модель системы в координатах $\overline{y}_1$ и $\overline{y}$ с использованием дуальных элементов

$$\frac{(K_2 + K_3)(Jp^2 + K_2 l_1^2 + K_3 l_2^2) - (K_3 l_2 - K_2 l_1)}{Jp^2 + K_2 l_1^2 + K_3 l_2^2},$$

что приводит к выражению

$$W^{**}(p) = \frac{Jp^2(K_2 + K_3) + K_3 K_2 (l_1 + l_2)^2}{Jp^2 + K_2 l_1^2 + K_3 l_2^2} =$$

$$= \frac{Jp^2(K_2 + K_3)}{Jp^2 + K_2 l_1^2 + K_3 l_2^2} + \frac{K_3 K_2 (l_1 + l_2)^2}{Jp^2 + K_2 l_1^2 + K_3 l_2^2} =$$

$$= \frac{Jp^2 \frac{1}{l_1^2}(K_2 + K_3)}{Jp^2 \frac{1}{l_1^2} + K_2 + K_3 i} + \frac{K_3 K_2 (l_1 + l_2)(l_1 + l_2)}{\frac{J}{l_1^2} p^2 + K_2 + K_3 i^2} =$$

$$= \frac{m_1^* p^2 (K_2 + K_3)}{m_1^* p^2 + K_2 + K_3 i^2} + \frac{K_3 K_2 (1+i)(1+i)}{m_1^* p^2 + K_2 + K_3 i^2}, \qquad (38)$$

где

$$m^* = \frac{J}{(l_1 + l_2)^2}. \qquad (39)$$

Из (38) достаточно очевидным в формировании динамической связи является наличие рычага с плечами l_1 и l_2 и точкой опоры в точке, совпадающей с центром тяжести. При этом $i = \frac{l_2}{l_1}$ является передаточным отношением рычага. Вопрос заключается в том, каким образом можно было бы определиться со статусом рычага по отношению к набору типовых элементарных звеньев механических колебательных систем и виброзащитных систем в частности. В окончательном виде после преобразований структурная схема на рис. 10 может быть представлена, как показано на рис. 11.

Обобщенная пружина с передаточной функцией

$$W_{II}'(p) = \frac{Jp^2(K_2 + K_3)}{Jp^2 + K_2 l_1^2 + K_3 l_2^2} \qquad (40)$$

является в физическом плане динамической реакцией элемента с массой m^*, определяемой из (40). В этом случае используется расчетная схема с одной степенью свободы (рис. 12) с помощью которой определяется динамическая реакция на основание. В свою очередь основанием является элемент с массой m_1, а также элемент массой M, но при определении динамической реакции учитываются особенности схемы внешнего возмущения.

Обобщенная пружина с передаточной функцией

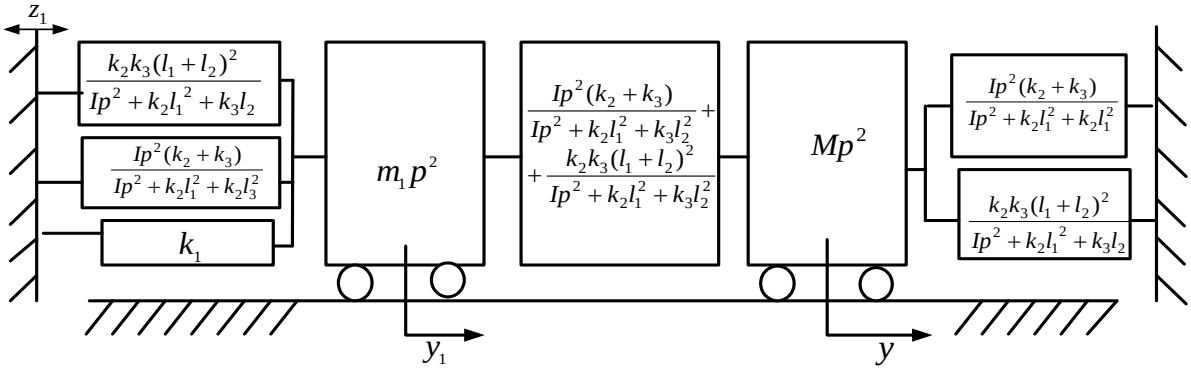


Рис. 11. Упрощенная структурная схема, соответствующая схеме на рис. 10

$$W_{II}'(p) = \frac{K_2 K_3}{m^* p^2 + K_2 b_1^2 + K_3 c^2} \qquad (41)$$

обеспечивает взаимодействие между элементами с массами m^* и m_1 и M в соответствии с аналогичной схемой, как на рис. 12, но с внешним воздействием кинематического вида, в отличие от случая с обобщенной пружиной (41), где определялась динамическая реакция. Детали, затронутых в выше приведенных преобразованиях, более детально рассматриваются в работе [2].

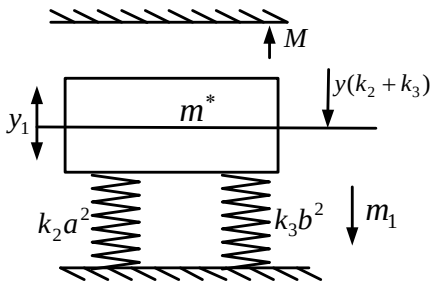


Рис. 12. Вспомогательная схема для расчета динамических взаимодействий между элементами с массами m_1 и M

VI. Таким образом, твердое тело, включенной в механическую колебательную систему, как особый элемент системы, отличается от дуальных типовых элементов, используемых в теории механических систем. Однако может быть предложена некоторая методологическая основа, связанная с исключением одной из переменных, что упрощает структуру системы и делает достаточно прозрачными процедуры оценки динамических свойств. Отметим, что твердое тело как звено привносит в системы непланарные связи, что требует для «развязки» определенных усилий, в частности, исключения одной из переменных. Вместе с тем твердое тело привносит в динамические взаимодействия рычажные связи. Параметры рычага зависят от соотношения массы M и момента инерции J твердого тела и положения центра тяжести. Опора рычага предопределяет свойства рычага, зависящие от характера расположения опоры на твердом теле.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гарднер М.Ф., Бэрнс Дж.Л. Переходные процессы в линейных системах. – М. : Физматгиз. 1961. – 442 с.
2. Дружинский И.А. Механические цепи. – Ленинград : Машиностроение. 1977. – 242 с.
3. Елисеев С.В. Обобщенная пружина в задачах машин и оборудования / С.В. Елисеев, С.В. Белокобыльский, Р.Ю. Упырь // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво): Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. Т.1 – Полтава : ПолтНТУ, 2009. – Вып. 3 (25). – С. 79–89.
4. Елисеев С.В., Резник Ю.Н., Хоменко А.П., Засядко А.А. Динамический синтез в обобщенных задачах виброзащиты и виброизоляции технических объектов. – Иркутск : ИГУ. 2008. – 523 с.
5. Елисеев С.В., Резник Ю.Н., Хоменко А.П. Мехатронные подходы в динамике механических колебательных систем. – Новосибирск : Наука. 2011. – 394 с.

УДК 539.319.001.24

Пимштейн Павел Гдальевич,
д. т. н., профессор кафедры «Прикладная механика», ИрГУПС,
тел.: (8-392)-41-08-04, e-mail: pim1937@mail.ru
Еловенко Денис Александрович,
аспирант кафедры «Информатика и кибернетика» – БГУЭП,
тел.: 8-904-115-90-90, e-mail: bear-paw3@yandex.ru
Татаринов Алексей Дмитриевич,
аспирант кафедры «Прикладная механика» – ИрГУПС,
тел.: 8-950-061-53-55, e-mail: unbreakable_86@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ОБОЛОЧКИ СО ВСТРОЕННЫМИ В СТЕНКУ НАГРЕВАТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ И СЛОЕМ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

P.G. Pimshtein, D.A. Elovenko, A.D. Tatarinov

THE RESEARCH OF ENCLOSURE UNDER PRESSURE WITH HEATING ELEMENT INSTALLED IN WALL WITH HEAT INSULATION MATERIAL LAYER

Аннотация. *В статье описаны экспериментальные исследования оболочки под давлением со встроенными в стенку нагревательными элементами и слоем теплоизоляционного материала. Определены коэффициенты теплопроводности материалов теплоизоляции. Доказана возможность эффективной защиты от перегрева несущей стенки автоклава.*

Ключевые слова: *оболочка, нагревательные элементы, теплоизоляционный материал, давление, теплопроводность.*

Abstract. *This paper describes the experimental researches of the enclosure under pressure with heating element installed in wall and with heat insulation material layer. Heat transfer coefficients have been calculated for the heat insulation material. Here the possibility of efficient protection from thermal overload of autoclave load-bearing wall is proved.*

Keywords: *enclosure, heating element, heat insulation material, pressure, heat transfer.*

Современные конструкции автоклавов высокого давления со встроенными в корпус несущей стенки нагревательными элементами, например [4], могут быть усовершенствованы путем размещения между нагревательными элементами и основной несущей стенкой слоя теплоизолирующего материала [2]. Эта конструкция корпуса автоклава, состоящая из сваренных кольцевыми швами многослойных цилиндрических оболочек, является недостаточно исследованной ввиду сложности конструкции цилиндрической стенки отдельной оболочки. Каждая из этих оболочек в сосуде испытывает одинаковую радиальную нагрузку и может быть рассмотрена экспериментально отдельно. Исследование отдельной оболочки позволяет исследовать эффективность использования встроенной теплоизоляции, сохранив при этом основные условия работы автоклавов высокого давления, и потребует минимальных экономических затрат на эксперимент. Сделав конструкцию оболочки сборной, включая и несущую стенку, можно минимизировать время демонтажа и проводить исследования разных теплоизоляционных материалов и их теплофизических параметров на одной и той же конструкции.

Для определения коэффициента теплопроводности встроенного в стенку теплоизоляционного слоя нужно знать тепловой поток через стенку. Тепловой поток через цилиндрическую стальную стенку при стационарном режиме, если известен перепад температуры по толщине стенки, определяют по формуле [3]

$$q = \frac{2\pi\Delta T}{\ln\left(\frac{r_н}{r_в}\right) / \lambda_{ст}}, \qquad (1)$$

где $\lambda_{ст}$ – коэффициент теплопроводности стали, Вт/м °С;

$r_в$, $r_н$ – наружный и внутренний радиусы стального цилиндра, мм.

Стационарный тепловой потока через составную цилиндрическую стенку определяют по формуле [3]:

$$q_l = \frac{2\pi\Delta T}{\frac{1}{\lambda_{ст}}\sum_{i=1}^{n}\ln\left(\frac{r_н^i}{r_в^i}\right)+\frac{1}{\lambda_{из}}\ln\left(\frac{r_{из}^н}{r_{из}^в}\right)}. \quad (2)$$

Отсюда определяем коэффициент теплопроводности теплоизоляционного слоя:

$$\lambda_{из} = \frac{\ln\left(\frac{r_{из}^н}{r_{из}^в}\right)}{\frac{2\pi\Delta T}{q_l}-\sum_{i=1}^{n}\ln\left(\frac{r_н^i}{r_в^i}\right)/\lambda_{ст}}. \quad (3)$$

Температуры на внутренних поверхностях цилиндрических слоев оболочки (рис. 1) с наружной теплоизоляцией (не показана) определяют по формуле

$$T_{вп}^k = T_{вп} - \frac{q_l\sum_{i=1}^{k-1}\frac{1}{\lambda_i}\ln\left(\frac{r_{i+1}}{r_i}\right)}{2\pi}. \quad (4)$$

В случае отсутствия теплоизоляции, когда наружная поверхность оболочки имеет конвективный теплообмен с окружающей средой, температуру внутренней поверхности слоев оболочки определяют по формуле

$$T_{вп}^k = T_{ср} + \frac{q_l\left(\sum_{i=k}^{n}\frac{1}{\lambda_i}\ln\left(\frac{r_{i+1}}{r_i}\right)+\frac{1}{\alpha r_n}\right)}{2\pi}. \quad (5)$$

Характеристика объекта исследований

Первый вариант конструкции оболочки выполнен со встроенной теплоизоляцией из асбеста (рис. 1) и состоит из центральной обечайки (1), на которую наварены дистанционные планки (2), на планках помещается кожух (3) толщиной 4 мм. На кожух навит листовой асбест (4), скрепленный стеклотканью. Общая толщина теплоизолирующего слоя 9,2 мм. Несущая часть корпуса состоит из разрезных конических колец (5) с углом 15° и монолитных колец (6). Между дистанционными планками установлены теплоэлектронагреватели (7) (ТЭНы). Навивку асбеста и стеклоткани производили на трехвалковых вальцах с прижатием валков и многократной обкаткой. Толщина теплоизоляционного слоя после этой операции уменьшилась с 12 мм в исходном состоянии до 9,4 мм. На внутренней поверхности центральной обечайки и на наружной поверхности теплоизоляционного слоя были размещены термопары (хромель – копель) согласно схеме (рис. 1). Такие же термопары были установлены на внутренней поверхности разрезного кольца и наружной поверхности оболочки.

Для определения остаточных деформаций центральной обечайки при нагружении модели внутренним давлением производили измерения внутренних диаметров в двух взаимно перпендикулярных плоскостях согласно схеме, представленной на виде сверху (рис. 1). Распределение остаточных деформаций по длине окружности внутренней поверхности центральной обечайки определяли с помощью координатной сетки (рис. 1). Напряженно-деформированное состояние (НДС) центральной обечайки оболочки исследовали тензометрией, для чего на внутренней поверхности располагали тензорезисторы 2ПКБ-10-100А (рис. 2).

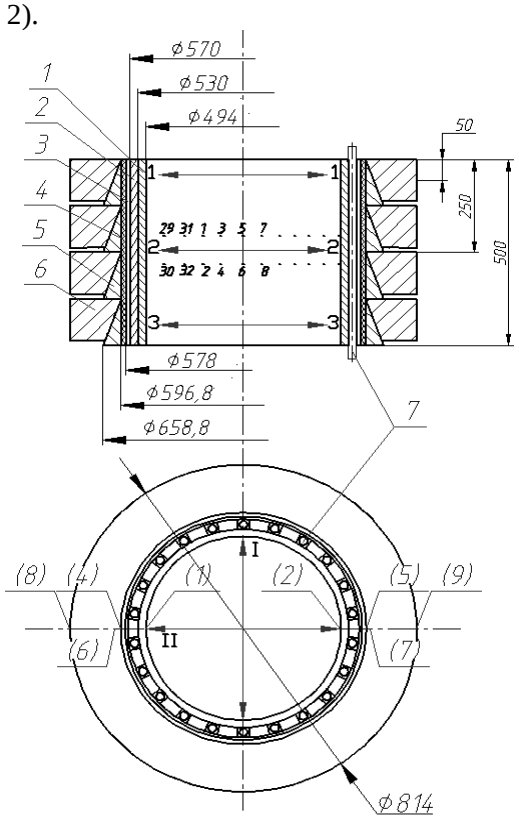


Рис. 1. Схема экспериментальной царги диаметром 500 мм
На виде сверху показана схема расположения термопар:
(1), (2) – термопары, расположенные на внутренней поверхности центральной обечайки;
(4), (5) – термопары, расположенные на тепловой изоляции;
(6), (7) – термопары, заключенные в разрезные кольца и расположенные рядом с термопарами (4), (5);
(8), (9) – термопары, расположенные на наружной поверхности оболочки

Исследование НДС экспериментальной оболочки

Перед началом экспериментов было рассчитано давление технологической опрессовки по формуле

$$P_{тех} = \frac{\sigma_T^{ср} S_0}{R}, \quad (6)$$

где

S_0 – общая толщина несущей стенки экспериментальной оболочки, мм;

R – радиус наружной поверхности экспериментальной оболочки, мм;

$\sigma_T^{ср}$ – средний предел текучести по толщине стенки оболочки, МПа.

Средний предел текучести по толщине стенки оболочки определяется по формуле

$$\sigma_T^{ср} = \frac{\sigma_T^{ц} S_{ц} + \sigma_T^{к} S_{к} + \sigma_T^{рк} S_{рк} + \sigma_T^{нк} S_{нк}}{S_{ц} + S_{к} + S_{рк} + S_{нк}}, \quad (7)$$

где $\sigma_T^{ц}$ – предел текучести материала центральной обечайки, МПа;

$\sigma_T^{к}$ – предел текучести материала внутреннего кожуха теплоизоляции, МПа;

$\sigma_T^{рк}$ – предел текучести материала разрезных колец, МПа;

$\sigma_T^{нк}$ – предел текучести материала монолитных накладных колец, МПа;

$S_ц$ – толщина центральной обечайки, мм;

$S_к$ – толщина внутреннего кожуха теплоизоляции, мм;

$S_{рк}$ – толщина разрезных колец, мм;

$S_{нк}$ – толщина монолитных накладных колец, мм.

Давление технологической опрессовки составило 81 МПа и рассчитано из условия, что внутренний слой переходит в пластическую зону.

На основании результатов расчётов принята следующая схема нагружения с тензометрией на каждой ступени давления.

При опрессовке:

0 – 50 – 64 – 80 МПа – 15-минутная выдержка – 0 МПа.

При упругих нагружениях:

1 цикл – 0 – 10 – 20 – 40 – 64 – 0 МПа,
2 цикл – 0 – 10 – 20 – 40 – 64 – 0 МПа,
3 цикл – 0 – 10 – 20 – 40 – 64 – 0 МПа,

с тензометрией на каждой ступени давления.

Внутреннее давление в многослойной оболочке создавали на специальной установке. После опрессовки оболочки давлением 80 МПа производили замеры внутренних диаметров и координатной сетки (рис. 1).

Результаты замеров внутренних диаметров до и после опрессовки показали, что средняя остаточная деформация внутренней поверхности центральной обечайки составила 1,56 %. Эти данные согласуются с результатами замеров координатной сетки, по которым минимальная деформация составляет 1,3 %, максимальная 2,1 %, средняя деформация равна 1,7 %. Внутренний диаметр увеличился на 7,8 мм за счет утонения слоя теплоизоляции соответственно на 3,9 мм. Толщина слоя теплоизоляции стала 5,5 мм.

После опрессовки на внутренней поверхности оболочки были приварены тензорезисторы, предварительно наклеенные на нержавеющую фольгу, согласно схеме, приведенной на рис. 2. Результаты тензометрии показывают, что при повторных нагружениях давлением ниже давления опрессовки внутренняя поверхность оболочки деформируется в упругой зоне. После тензометрии демонтировали тензосистему и провели тепловые испытания оболочки со встроенной теплоизоляцией из асбеста, анализ результатов которых приведен ниже (табл. 1).

Таблица 1

Результаты измерения внутренних диаметров (мм)

Этапы измерений	Пояса замеров	Плоскости замеров		
		1	2	3
До испытаний	Сечение I	*494,35*	*494,27*	*494,09*
	Сечение II	*494,90*	*494,72*	*494,59*
	Среднее значение	*494,62*	*494,46*	*494,34*
После испытаний	Сечение 1	*501,90*	*502,52*	*502,48*
	Сечение 2	*501,90*	*502,15*	*502,88*
	Среднее значение	*501,90*	*502,33*	*502,68*
	Увеличение	*7,28*	*7,87*	*8,34*
	Деформация ,%	*1,45*	*1,57*	*1,66*

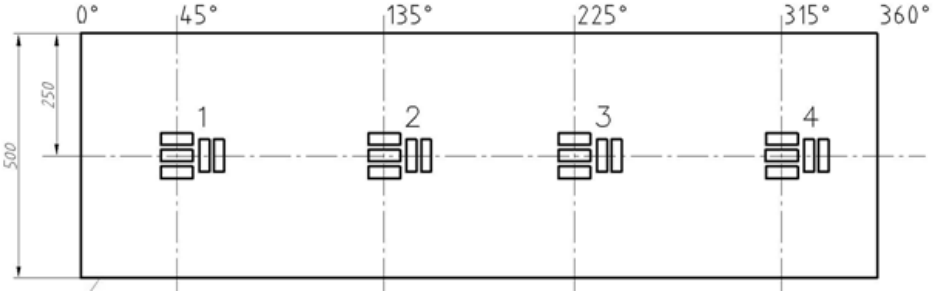


Рис. 2. Схема расположения тензорезисторов на внутренней поверхности центральной обечайки (развернутая поверхность)

Второй вариант экспериментальной оболочки с теплоизоляционным слоем из шамотного порошка выполнен на той же установке.

После проведения испытаний с асбестом экспериментальную оболочку разобрали. Узел, состоящий из центральной обечайки, дистанционных планок и расположенного на них внутреннего кожуха теплоизоляционного слоя, был проточен по наружному диаметру в размер 584 мм (рис. 3). Наружный кожух теплоизоляции 7 надели, зафиксировали дистанционным кольцом 8, зазор 7 мм между кожухами 3 и 7 заполнили шамотным порошком. Плотность заполнения обеспечивали вибратором.

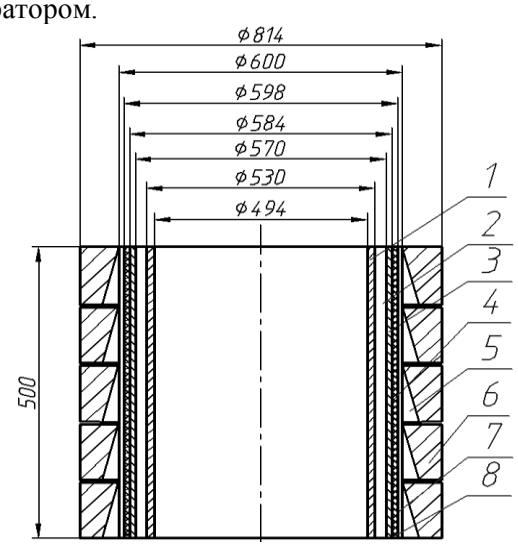


Рис. 3. Конструктивная схема царги с теплоизоляционным слоем из шамотного порошка
1 – центральная обечайка; 2 – дистанционные планки; 3 – внутренний кожух теплоизоляционного слоя; 4 – шамотный порошок; 5 – разрезные кольца; 6 – неразрезные кольца; 7 – наружный кожух теплоизоляционного слоя; 8 – дистанционное кольцо

Полученную оболочку с теплоизоляционным слоем из шамотного порошка опрессовали давлением 80 МПа. В результате внутренний диаметр центральной обечайки увеличился в среднем на 5,7 мм, то есть на 1,12 %, за счет уменьшения толщины теплоизоляционного слоя. Толщина теплоизоляционного слоя стала равной в среднем 4,15 мм.

Анализ данных полученных, после опрессовки царги с теплоизоляционными слоями из асбеста и шамотного порошка, показывает, что уплотнение этих материалов в процессе изготовления достаточно эффективны.

Остаточная деформация внутренней поверхности центральной обечайки в результате опрессовки составляет не больше 2 % в том и другом случаях, и при последующих упругих нагружениях меньшим давлением внутренняя поверхность царги деформируется без остаточных деформаций. Если теплоизоляционный слой спрессовывать до монтажа автоклава высокого давления подобной конструкции с многослойной или монолитной ее несущей частью, то напряженно-деформированное состояние внутренней поверхности будет более благоприятно.

Тепловые испытания оболочек со встроенными теплоизоляциями

После опрессовки оболочки подготовили к тепловым испытаниям: установили термопары по схеме, приведенной на рис. 1, смонтировали теплоэлектронагреватели. Нагрев производили с помощью расположенных между планками теплоэлектронагревателей. Температуры измеряли термопарами хромель – копель. Оболочки нагревали до установления постоянных температур во всех точках измерения, то есть до получения стационарного режима нагрева с постоянным тепловым потоком q по толщине стенки. Полученные результаты приведены в табл. 2.

Расчет коэффициентов теплопроводности материалов теплоизоляции

На основании результатов тепловых испытаний, проведенных на экспериментальной оболочке, можно произвести расчет коэффициентов теплопроводности теплоизоляционных слоев по опи-

Таблица 2

№ п/п	Материал встроенного теплоизоляционного слоя	Значения температур, °С				Перепад температур по металлу
		Номера термопар				
1	Асбест + наружная теплоизоляция	**2**	**5**	**7**	**9**	**5–9**
		590	468	466	463	5
		1	**4**	**6**	**8**	**4-8**
		588	459	457	450	9
2	Шамотный порошок + наружная теплоизоляция	**2**	**5**	**7**	**9**	**5–9**
		517	435	-	432	3
3	Шамотный порошок без наружной теплоизоляции	358	253	-	247	6

санной выше методике. Для этого выбраны значения перепадов температур при стационарном режиме (табл. 1).

По результатам измерения температур на внутренней и наружной поверхности несущего слоя оболочки при известном коэффициенте теплопроводности стали рассчитывается стационарный тепловой поток по формуле (1). Поскольку нагреватели расположены над центральной обечайкой, то в расчет не входят ее толщина и толщина слоя с нагревателями.

Для случая, когда слой встроенной теплоизоляции выполнен из асбеста и имеется наружная теплоизоляция:

$$q = \frac{2\pi\Delta T}{\ln\left(\frac{r_н}{r_в}\right)/\lambda_{ст}}, \quad q = \frac{6{,}28\Delta T}{\ln\left(\frac{407}{298{,}4}\right)/34{,}4} = 696{,}028\Delta T$$

по среднему перепаду температуры по несущему слою металла

$$T = \frac{5+9}{2} = 7\ ^0\text{C},$$

получаем $q = 696{,}028 \cdot 7 = 4872{,}2$ Вт/м.

При теплоизоляционном слое из шамотного порошка при наличии наружной теплоизоляции перепад температур по несущему металлическому слою равен ΔT = 3 °С. Тогда тепловой поток равен:

$$q = \frac{6{,}28\Delta T}{\left(\ln\left(\frac{300}{299}\right)+\ln\left(\frac{407}{300}\right)\right)/34{,}4} = 700{,}56\Delta T =$$

$$= 700{,}56 \cdot 3 = 2101{,}7 \text{ Вт/м}.$$

Без наружной теплоизоляции перепад температур по несущему металлическому слою равен ΔT = 6 °С. Тогда тепловой поток равен:

$$Q = 700{,}56 \cdot 6 = 4203{,}4 \text{ Вт/м}.$$

Теперь по формуле (3) определяем коэффициент теплопроводности теплоизоляционного слоя.

Для стенки с теплоизоляционным слоем из асбеста:

$$\lambda_{из} = \frac{\ln\left(\frac{r^н_{из}}{r^в_{из}}\right)}{\frac{2\pi\Delta T}{q} - \sum_{i=1}^{n}\ln\left(\frac{r^i_н}{r^i_в}\right)/\lambda_{ст}};$$

$$\ln\left(\frac{r^н_{из}}{r^в_{из}}\right) = \ln\left(\frac{298{,}4}{292{,}92}\right) = 0{,}01853;$$

$$\ln\left(\frac{r^i_н}{r^i_в}\right) = \ln\left(\frac{292{,}92}{288{,}92}\right) = 0{,}01375;$$

$$\lambda_{асб} = \frac{0{,}01853}{6{,}28\frac{125}{4888{,}02} - \frac{0{,}01375}{34{,}4}} = 0{,}1153 \text{ Вт/м °С}.$$

Аналогично определяем коэффициент теплопроводности шамотного порошка:

$$\ln\left(\frac{r^н_{из}}{r^в_{из}}\right) = \ln\left(\frac{299}{294{,}8}\right) = 0{,}01415;$$

$$\sum_{i=1}^{2}\ln\left(\frac{r^i_н}{r^i_в}\right) = \ln\left(\frac{294{,}8}{287{,}8}\right) + \ln\left(\frac{300}{299}\right) = 0{,}02737;$$

при наличии наружной теплоизоляции:

$$\lambda_{шам} = \frac{0{,}014146}{6{,}28\frac{82}{2101{,}69} - \frac{0{,}02737}{34{,}4}} = 0{,}05792 \text{ Вт/м °С};$$

без слоя наружной теплоизоляции:

$$\lambda_{шам} = \frac{0{,}014146}{6{,}28\frac{105}{4203{,}37} - \frac{0{,}02737}{34{,}4}} = 0{,}09064 \text{ Вт/м °С}.$$

Среднее значение коэффициент теплопроводности шамотного порошка

$$\lambda^{ср}_{шам} = \frac{0{,}05792 + 0{,}09064}{2} = 0{,}07428 \text{ Вт/м °С}.$$

Зная коэффициент теплопроводности теплоизоляционного слоя и разность температур на внутренней и наружной поверхности экспериментальной царги, находим общий тепловой поток через стенку царги с помощью выражения (2).

Для стенки с теплоизоляционным слоем из асбеста:

$$q = \frac{6{,}28 \cdot 132{,}5}{\frac{1}{34{,}4}\left(\ln\left(\frac{0{,}289}{0{,}285}\right)+\ln\left(\frac{0{,}407}{0{,}2962}\right)\right)+\frac{1}{0{,}115328}\ln\left(\frac{0{,}2962}{0{,}289}\right)} = 4890{,}65 \text{ Вт/м}.$$

Аналогично определяем для стенки с теплоизоляционным слоем из шамотного порошка при наличии наружной теплоизоляции:

$$q = \frac{6{,}28 \cdot 85}{\frac{1}{34{,}4}\left(\ln\left(\frac{0{,}292}{0{,}285}\right)+\ln\left(\frac{0{,}3}{0{,}299}\right)+\ln\left(\frac{0{,}407}{0{,}3}\right)\right)+\frac{1}{0{,}057923}\ln\left(\frac{0{,}299}{0{,}292}\right)} =$$

$$= 2102{,}49 \text{ Вт/м};$$

без слоя наружной теплоизоляции:

$$q = \frac{6{,}28 \cdot 111}{\frac{1}{34{,}4}\left(\ln\left(\frac{0{,}292}{0{,}285}\right)+\ln\left(\frac{0{,}3}{0{,}299}\right)+\ln\left(\frac{0{,}407}{0{,}3}\right)\right)+\frac{1}{0{,}09064}\ln\left(\frac{0{,}299}{0{,}292}\right)} =$$

$$= 4205{,}83 \text{ Вт/м}.$$

Полученные результаты позволяют провести расчет температур по всем слоям оболочек аналитическим методом и сравнить эти значения с экспериментальными данными. Для расчета температур на каждом слое, когда оболочка имеет наружную теплоизоляцию, воспользуемся формулой (4), а когда ее нет, то для расчета так же будет использована формула (5). На рис. 4 приведен график распределения температур в стенке экспериментальной оболочки с теплоизолирующим слоем из асбеста. Наружная поверхность оболочки теплоизолирована.

На рис. 5 приведен аналогичный график распределения температур для оболочки с теплоизолирующим слоем из шамотного порошка. На рис. 6 показан график, когда оболочка не имеет наружной теплоизоляции.

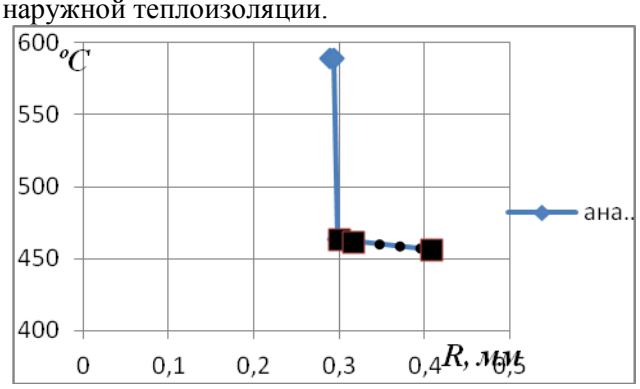


Рис. 4. График распределения температуры по стенке оболочки с теплоизолирующим слоем из асбеста

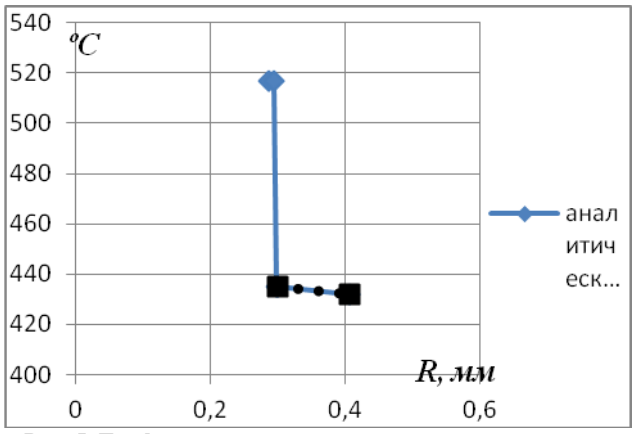


Рис. 5. График распределения температуры по стенке оболочки с теплоизолирующим слоем из шамотного порошка

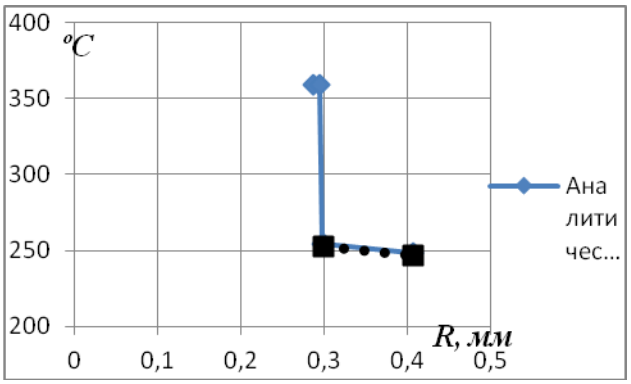


Рис. 6. График распределения температуры по стенке оболочки с теплоизолирующим слоем из шамотного порошка без наружной теплоизоляции

Выводы

В ходе проведенной работы испытана натурная модель оболочки со встроенными в стенку нагревателями и встроенным тепловым экраном (теплоизоляционным слоем) между нагревателем и несущей частью корпуса. В качестве теплоизоляционных материалов были использованы асбест и шамотный порошок. В результате экспериментальных исследований и расчетов были определены коэффициенты теплопроводности теплоизоляционных материалов.

Экспериментально доказано, что применение теплоизоляционного слоя позволяет значительно снизить нежелательный нагрев несущей стенки в автоклавах высокого давления новой конструкции. Этот факт позволит увеличить рабочую температуру и давление без изменения размеров несущей стенки в сравнении с подобными существующими конструкциями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 14249.1 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования. М; Стандартинформ, 2008.
2. Патент № 2093481 «Автоклав для синтеза и выращивания кристаллов в гидротермальных условиях». / Пимштейн П. Г, Мурашев Б. Г, Борсук Е. Г, Погодин В. К, Древин А. К, Тришкин С. В, Олейник В. Н. // Заявл. 24.04.1991; Опубл. 20.10.1997.
3. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи – М: Энергия, 1973 – 320 с.
4. Экспериментальное исследование модели автоклава для гидротермального синтеза минералов / Д.А. Еловенко, П.Г. Пимштейн, О.В. Репецкий, Д.В. Татаринов // Вестник байкальского союза стипендиатов DAAD. № 1 (7), 2010 г., С. 11–19.

УДК 531.1

Каргапольцев Сергей Константинович,
д. т. н., профессор, проректор по научной работе ИрГУПС
e-mail: kck@irgups.ru
Большаков Роман Сергеевич,
аспирант НИИ современных технологий, системного анализа и моделирования ИрГУПС,
e-mail: hunterr1@mail.ru

ДИНАМИКА МАШИН. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

S.K. Kargapolcev, R.S. Bolshakov

DYNAMICS OF MACHINES. MATHEMATICAL SETTLEMENT OF DIGITAL MODELLING

Аннотация. *Рассматривается метод построения математических моделей виброзащитных систем с динамическими гасителями колебаний. Основой подхода является технология преобразований исходной расчетной схемы, которая приводится к математической модели. Предлагается методика выбора обобщенных координат и построения передаточных функций. Приведены примеры.*

Ключевые слова: *динамическое гашение колебаний, структурные модели, эквивалентные преобразования.*

Abstract. *The method of creature of mathematical models of vibroprotection systems with dynamical absorbers are considered. The approach is based on transformation of initial mechanical system into mathematical model. The method of search of generalized coordinates and building of transfer functions is offered. Examples are shown.*

Keywords: *dynamical absorbtion of oscillation, structural models, equivivalent transformations.*

Введение

Сочленения в механических колебательных системах чаще всего создаются преднамеренно, путем формирования в системе подвижных соединений, которые называются кинематическим парами, или шарнирами. Каждое такое сочленение, в зависимости от его конструктивных особенностей, уменьшает соответствующим образом общее число степеней свободы, что находит свое отражение в изменениях динамических свойств системы [1]. Математические модели систем с сочленениями могут быть построены с использованием определенных обобщенных координат, отражающих возможности относительных движений. Последующий формализм «обнуления» таких обобщенных координат позволяет получить математическую модель системы с сочленениями. В целом это представляет собой некоторую технологию построения математических моделей [2]. Вместе с тем, не всегда имеется возможность конструктивного оформления шарниров. В некоторых случаях, например при соединении двух твердых тел упругими или диссипативными элементами, значения жесткости или демпфирования могут достигать больших значений и на порядок (или порядки) отличаться от значений параметров других элементов. В таких ситуациях можно предполагать, что соединяемые точки находятся в состоянии формировании сочленения или условного шарнирного соединения. Поэтому динамические свойства системы с такими сочленениями будут приближаться в своих проявлениях к системам, которые имеют не виртуальные, а реальные сочленения или шарниры. В задачах управления динамическим состоянием колебательных систем, в частности в задачах виброзащиты и виброизоляции, изменение параметров отдельных звеньев, например пружины, соединяющей две точки разных тел, или диссипативного элемента, выполняющего такие же функции, рассматриваются как способы построения активных или полуактивных виброзащитных систем [3, 4].

I. На рис. 1 приводится расчетная схема лабораторной модели подвески, использованной для изучения и оценки влияния сочленений. Особенностью системы на рис. 1 является то, что объект защиты (m) совершает только вертикальное движение (y); в структуре системы имеется рычаг второго рода с центром колебаний в точке *O*, где расположен центр тяжести; l_1, l_2 – длины плеч рычага; m_1, m_2 – приведенные массы рычага; k, k_1, k_2 – жесткости упругих элементов; точки *A* и *B* соответствуют местам присоединения упругих элементов рычажной системы. Учет сил сопротивления производится тем, что демпфирующее звено вводится параллельно упругому элементу в общих

точках крепления, что упрощает выкладки при построении математической модели. Отметим, что силы сопротивления, вводимые параллельно любому из упругих элементов как дополнительные связи с передаточными функциями дифференцирующего звена (демпферы) могут быть учтены в структуре передаточных функций путем «параллельного» их присоединения к соответствующему упругому элементу [5]. В начале рассматривается модель с упругими элементами. Кинетическая и потенциальная энергия определяются выражениями

$$T = \frac{1}{2}m\dot{y}^2 + \frac{1}{2}m_1\dot{y}_1^2 + \frac{1}{2}m_2\dot{y}_2^2, \qquad (1)$$

$$\Pi = \frac{1}{2}k\left(y-z\right)^2 + \frac{1}{2}k_1\left(y-y_1\right)^2 + \frac{1}{2}k_2\left(y-y_2\right)^2. \quad (2)$$

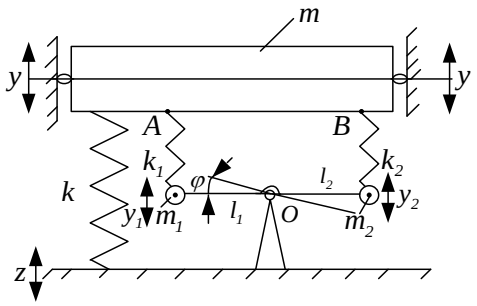


Рис. 1. Расчетная схема транспортной подвески

Отметим, что y_1 и y_2 являются зависимыми координатами, поскольку между ними имеется рычажная связь. На рис. 1 приняты обозначения y_1, y_2, y_3 – координаты движения в неподвижной системе отсчета. Определим некоторые параметры движения элементов виброзащитной системы (ВЗС): $y_1 = -\varphi l_1 + z, y_2 = \varphi l_2 + z$. Перепишем (1) и (2) в виде

$$T = \frac{1}{2}m\dot{y}^2 + \frac{1}{2}m_1(\dot{z}-\dot{\varphi}l_1)^2 + \frac{1}{2}m_2(\dot{z}+\dot{\varphi}l_2)^2, \qquad (3)$$

$$\Pi = \frac{1}{2}k\left(y-z\right)^2 + \frac{1}{2}k_1\left(y+\varphi l_1-z\right)^2 + \frac{1}{2}k_2\left(y-\varphi l_2-z\right)^2. \quad (4)$$

Пусть $T = T_1 + T_2 + T_3$, где $T_1 = \frac{1}{2}m\dot{y}^2$;

$T_2 = \frac{1}{2}m_1\left(\dot{z}-\dot{\varphi}l_1\right)^2$; $T_3 = \frac{1}{2}m_2\left(\dot{z}+\dot{\varphi}l_2\right)^2$.

В свою очередь, потенциальная энергия может быть записана

$$\Pi = \Pi_1 + \Pi_2 + \Pi_3,$$

где $\Pi_1 = \frac{1}{2}k\left(y-z\right)^2$; $\Pi_2 = \frac{1}{2}k_1\left(y+\varphi l_1-z\right)^2$;

$\Pi_3 = \frac{1}{2}k_2\left(y-\varphi l_2-z\right)^2$.

Проведем ряд выкладок и получим систему дифференциальных уравнений движения

$$\ddot{y}m + y(k+k_1+k_2) + \varphi\left(k_1l_1-k_2l_2\right) - k_1z - k_2z - kz = 0, \quad (5)$$

$$y\left(k_1l_1-k_2l_2\right) + \ddot{\varphi}\left(m_1l_1^2+m_2l_2^2\right) + \varphi\left(k_1l_1^2+k_2l_2^2\right) - \ddot{z}\left(-m_1l_1+m_2l_2\right) - z(k_1l_1-k_2l_2) = 0. \quad (6)$$

В табл. 1 приведены коэффициенты уравнений (5), (6) в координатах y, φ. В рассматриваемой системе на рис. 1 могут быть сформированы сочленения в точках *A* и *B* путем введения шарниров или увеличения жесткости соответствующих пружин k_1 и k_2.

Для реализации представлений о формировании возможных динамических свойств подвески (рис. 1) используем расчетную схему с большим числом степеней свободы, как это показано на рис. 2.

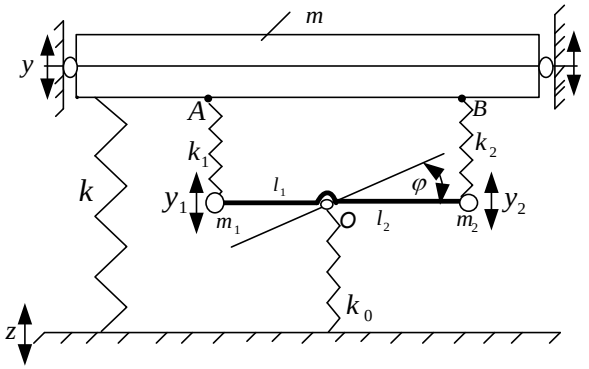


Таблица 1

Значения коэффициентов уравнений (5), (6) в координатах y, φ

a_{11}	a_{12}
$mp^2 + k + k_1 + k_2$	$k_1l_1 - k_2l_2$
a_{21}	a_{22}
$k_1l_1 - k_2l_2$	$(m_1l_1^2 + m_2l_2^2)p^2 + k_1l_1^2 + k_2l_2^2$
$Q_y = z(k + k_1 + k_2)$	$Q_\phi = z\left[(m_2l_2 - m_1l_1)p^2 + k_1l_1 - k_2l_2\right]$

Примечания: Q_y, Q_φ *– обобщенные силы.*

Рис. 2. Расчетная схема с увеличенным числом степеней свободы

II. Увеличение числа степеней свободы связано с введением координаты y_0. При этом рычажное устройство превращается в твердое тело на трех упругих опорах и сохраняет возможность поворота вокруг центра тяжести *O* на угол φ.

В этом случае выражения для кинетической и потенциальной энергии (3) и (4) преобразуются к виду

$$T = \frac{1}{2}m\dot{y}^2 + \frac{1}{2}m_1\dot{y}_1^2 + \frac{1}{2}m_2\dot{y}_2^2\,, \qquad (7)$$

$$\Pi = \frac{1}{2}k\left(y-z\right)^2 + \frac{1}{2}k_2\left(y-y_1\right)^2 + \\ + \frac{1}{2}k_2\left(y-y_2\right)^2 + \frac{1}{2}k_0\left(y_0-z\right)^2. \qquad (8)$$

Введем ряд обозначений:

$$y_0 = ay_1 + by_2; \qquad \varphi = c\left(y_2-y_1\right)^2; \qquad a = \frac{l_2}{l_1+l_2};$$

$b = \dfrac{l_1}{l_1+l_2}$; $c = \dfrac{1}{l_1+l_2}$; рассмотрим систему координат y, φ и y_0; запишем, что $y_1 = y_0 - l_1\varphi$, $y_2 = y_0 + l_2\varphi$,

Уравнения движения системы в координатах y, y_{01} и φ можно представить в виде

$$\ddot{y}(m) + y\left(k_1+k+k_2\right) + \ddot{\varphi}(0) + \varphi\left(k_1l_1-k_2l_2\right) + \\ + \ddot{y}_{01}(0) + y_{01}\left(-k_1-k_2\right) = z\left(k_1+k_2\right) + kz, \qquad (9)$$

$$\ddot{y}(0) + y\left(k_1l_1-k_2l_2\right) + \ddot{\varphi}\left(m_1l_1^2+m_2l_2^2\right) + \\ + \varphi\left(k_1l_1^2+k_2l_2^2\right) + \ddot{y}_{01}\left(-m_1l_1+m_2l_2\right) + \\ + y_{01}\left(-k_1l_1+k_2l_2+k_0\right) = -m_2l_2\ddot{z} + \\ + m_1l_1\ddot{z} + k_1l_1z - k_2l_2z, \qquad (10)$$

$$\ddot{y}(0) + y\left(-k_1-k_2\right) + \ddot{\phi}\left(-m_1l_1+m_2l_2\right) + \\ + \phi\left(-k_1l_1+k_2l_2\right) + \ddot{y}_{01}\left(m_1+m_2\right) + \\ + y_{01}\left(k_1+k_2+k_0\right) = \ddot{z}\left(-m_1-m_2\right) - \\ - z\left(k_1+k_2\right). \qquad (11)$$

В табл. 2 приведены значения коэффициентов уравнений в координатах y, φ и y_{01}. Обобщенные силы по координатам y_0, y_2 и y_1 имеют вид

$$Q_y = z\left(k+k_1+k_2\right);$$

$$Q_\phi = \ddot{z}\left(-m_2l_2+m_1l_1\right) + k_1l_1z - k_2l_2z\,; \qquad (12)$$

$$Q_{y_{01}} = \ddot{z}\left(-m_1-m_2\right) - z\left(k_1+k_2\right).$$

Сравнения коэффициентов в табл. 1 и 2 показывает, что, исключая третий столбец и третью строку в табл. 2 (это соответствует $k_0 \to \infty$ и появлению сочленения рычага с основанием при соединении точек *O* и O_1), можно получить систему уравнений для расчетной схемы на рис. 1. Система уравнений для расчетной схемы на рис. 2 может быть получена и другими путями, при этом результаты совпадают между собой.

III. Расчетная схема на рис. 2 может быть использована для получения дифференциального уравнения движения при сочленениях, которые условно можно обозначить как процессы $k_1 \to \infty$, $k_2 \to \infty$, для чего необходимо ввести систему координат *y*, y_{01} и y''_1. Будем полагать, что $y_{01} = y_0 - z$, $y''_1 = y - y_1$.

$$T = \frac{1}{2}m\dot{y}^2 + \frac{1}{2}m_1\left(\dot{y}-\dot{y}_1''\right)^2 + \\ + \frac{1}{2}m_2[\dot{y}_{01}(i+1) + \dot{z}(1+i) - \\ - \dot{y}i(1+a) + \dot{y}_1''i(1+a)]^2, \qquad (13)$$

$$\Pi = \frac{1}{2}k\left(y-z\right)^2 + \frac{1}{2}k_2\left(y_1''\right)^2 + \\ + \frac{1}{2}k_2\begin{pmatrix} ya_0 - y_{01}(1+i) - \\ -z(1+i) - y_1''i(1+a)\end{pmatrix}^2 + \frac{1}{2}k_0y_{01}^2, \qquad (14)$$

где $a = \dfrac{l_2}{l_1+l_2}$, $a_0 = 1+i(1+a)$, $i = \dfrac{l_2}{l_1}$.

Произведем аналогичным образом, как было показано выше, ряд вспомогательных выкладок и получим систему дифференциальных уравнений движения в координатах *y*, y_{01} и y''_1. Коэффициенты этой системы приводятся в табл. 3. Для получения уравнения движения системы (рис. 2) при двух сочленениях в матрице коэффициентов (табл. 3) надо исключить столбцы и строки свя-

Таблица 2

Значения коэффициентов уравнений (9)–(11) в координатах y,φ и y_{01}

a_{11}	a_{12}	a_{13}
$(m)\,p^2 + k_1 + k + k_2$	$k_1l_1 - k_2l_2$	$-k_1 - k_2$
a_{21}	a_{22}	a_{23}
$k_1l_1 - k_2l_2$	$\left(m_1l_1^2 + m_2l_2^2\right)p^2 + k_1l_1^2 + k_2^2l_2^2$	$(-m_1l_1 + m_2l_2)\,p^2 - k_1l_1 + k_2l_2$
a_{31}	a_{32}	a_{33}
$-k_1 - k_2$	$(-m_1l_1 + m_2l_2)\,p^2 - k_1l_1 + k_2l_2$	$\left(m_1+m_2\right)p^2 + k_1 + k_0 + k_2$

Таблица 3

Коэффициенты уравнений движения системы, приведенной на рис. 2, с обобщенными координатам y, y_{01} и y_1''

a_{11}	a_{12}	a_{13}
$[m+m_1+m_2i^2(1+a)^2]p^2+k+k_2a_0^2$	$[-m_2i(1+i)(1+a)]p^2-k_2a_0(1+i)$	$[-m_2i^2(1+a)^2+m_1]p^2-$ $-k_2a_0i(1+a)$
a_{21}	a_{22}	a_{23}
$[-m_2i(1+i)(1+a)]p^2-k_2a_0(1+i)$	$[-m_2i(1+i)^2]p^2+k_0+k_2(1+i)^2$	$[m_2(1+i)(1+a)i]p^2+$ $+k_2(1+i)(1+a)i$
a_{31}	a_{32}	a_{33}
$[-m_1-m_2i^2(1+a)^2]p^2-k_2a_0i(1+a)$	$[m_2i(1+i)(1+a)]p^2+$ $+k_2i(1+i)(1+a)$	$[m_2i^2(1+a^2)]p^2+k_1$ $+k_2i^2(1+a)^2$
Q_1	Q_2	Q_3
$m_2\ddot{z}i(1+i)(1+a)+kz+k_2a_0(1+i)z$	$[-m_2\ddot{z}i(1+i)^2-k_2(1+i)^2]p^2$	$-m_2\ddot{z}i(1+i)(1+a)-$ $-k_2i(1+i)(1+a)z$

занные с координатами $y_{01} \to 0$ и $y''_1 \to 0$ (одновременно устраняются обобщенные силы Q_3 и Q_2). В конечном итоге дифференциальное уравнение движения принимает вид

$$\overline{y}[m+m_1+m_2i^2(1+a)^2]p^2+(k+k_2a_0^2)\overline{y}= \\ =\overline{z}[m_2i(1+i)(1+a)]p^2+\overline{z}(k+k_2a_0(1+i)), \quad (15)$$

откуда может быть найдена передаточная функция системы подвески с двумя сочленениями

$$W(p)=\frac{m_2i(1+i)(1+a)p^2+k+}{[m+m_1+m_2i^2(1+a)^2]p^2+}\cdots \\ \cdots\frac{+k_2a_0(1+i)}{+k+k_2a_0^2}. \quad (16)$$

Из (16) можно найти частоту собственных колебаний

$$\omega_{соб}^2=\frac{k+k_2a_0^2}{m+m_1+m_2i^2(1+a)^2}, \quad (17)$$

а также частоту динамического гашения.

$$\omega_{дин}^2=\frac{k+k_2a_0(1+i)}{m_2i(1+i)(1+a)}. \quad (18)$$

При $p \to 0$ найдем, что

$$\left|W(p)\right|_{p\to 0}=\frac{k_2a_0(1+i)}{k+k_2a_0^2}, \quad (19)$$

$$\left|W(p)\right|_{p\to\infty}=\frac{m_2i(1+i)(a+1)}{m+m_1+m_2i^2(1+a)^2}. \quad (20)$$

На рис. 3 представлено в качестве примера семейство амплитудно-частотных характеристик при изменении передаточного отношения i. Для модельной задачи выбраны следующие параметры: $m = 100$ кг, $m_1 = m_2 = 10$ кг, $L_2 = L_3 = 10$ см, $k_2 = 200$ Н/м, $I = 0{,}5 \div 3$(шаг 0,5).

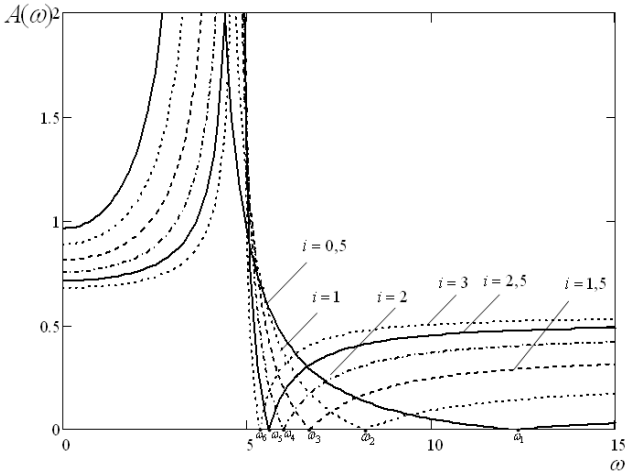


Рис. 3. Семейство амплитудно-частотных характеристик системы с передаточной функцией (17)

Таким образом, при двух сочленениях подвеска работает как система с одной степенью свободы: при этом на частоте (17) объект защиты проявляет резонансные свойства, а на частоте (18) – совершает малые движения в режиме динамического гашения. На практике эти движения редко бывают нулевыми, так как в системах практически всегда присутствуют силы сопротивления, в частности эти силы ограничивают амплитуду колебаний объекта при резонансе. При повышении частоты – система «зануляется» – (20).

IV. Используем систему уравнений (5) и (6) и запишем выражения для передаточной функции, характеризующей расчетную схему на рис. 1:

$$W(p)=\frac{\bar{y}(p)}{\bar{z}}=\frac{(k+k_1+k_2)\times}{\left(mp^2+k+k_1+k_2\right)\times-}\cdots$$
$$\cdots\frac{\times\left[\left(m_1l_1^2+m_2l_2^2\right)p^2+k_1l_1^2+k_2l_2^2\right]-}{\times\left[(m_1l_1^2+m_2l_2^2)p^2+k_1l_1^2+k_2l_2^2\right]-}\cdots \quad (21)$$
$$\cdots\frac{-(k_1l_1-k_2l_2)(\left[(m_1l_1-m_2l_2)p^2++k_1l_1-k_2l_2)\right]}{-\left(-k_1l_1+k_2l_2\right)^2}.$$

Если принять

$$a_1=k+k_1+k_2,b_1=m_1l_1^2+m_2l_2^2,$$
$$a_2=k_1l_1^2+k_2l_2^2,b_2=(k_1l_1-k_2l_2), \quad (21')$$
$$a_3=(m_1l_1-m_2l_2),$$

то (21) преобразуется к виду

$$W(p)=\frac{\bar{y}(p)}{z}=\frac{p^2\left(a_1b_1-b_2a_3\right)+}{p^4mb_1+p^2\left(a_1b_1+a_2m\right)+}\cdots$$
$$\cdots\frac{+b_2+a_1a_2}{+a_1a_2-b_2^2}. \quad (22)$$

Из (22) следует, что в системе возможен режим динамического гашения на частоте

$$\omega_{дин}^2=\frac{b_2^2+a_1a_2}{b_2b_3-a_1b_1}. \quad (23)$$

Решая частотное уравнение знаменателя передаточной функции (23), можно найти частоты собственных колебаний $\omega_{1соб}$, $\omega_{2соб}$, для которых выполняется условие

$$\omega_{1соб}<\omega_{дин}^2<\omega_{2соб}. \quad (24)$$

В целом свойства системы по выражению (21) соответствуют представлениям о традиционных системах с двумя степенями свободы: два резонанса, динамическое гашение между резонансами и снижение амплитуды колебаний в зарезонансной области.

V. Для оценки возможностей варианта подвески по расчетной схеме на рис. 2 в (20) было принято $k_1 = 0$, а вместо пружины k_1 вводился диссипативный элемент b_0p, где b_0 – коэффициент демпфирования. Замена b_0p на k_1 соответствует представлениям о том, что элементы k_1 и b_0p являются типовыми элементами виброзащитных систем и соединены между собой параллельно [6]. В этом случае

$$a_1=k+k_2+b_0p,b_1=m_1l_1^2+m_1l_2^2,$$
$$a_2=b_0pl_1+k_2l_2^2,a_3=m_1l_1-m_2l_2. \quad (25)$$

После подстановки (25) в (22) можно получить всё необходимое для расчета амплитудно-частотных характеристик при изменении параметров системы. Введем ряд вспомогательных обозначений и соотношений: $i=\frac{l_2}{l_1}$ – передаточное отношение рычага второго рода (знак минус учтен при выводе уравнений; $\varepsilon=\frac{b_0}{2mk}$ – безразмерный коэффициент демпфирования; $r=\sqrt{\frac{k}{m}}$ – частота базовой системы; $\mu=\frac{m_1+m_2}{m}$ – отношение массы рычага к массе объекта; $n=\frac{k_2}{k}$ – отношение жесткости пружин (рис. 2); $\eta=\frac{\omega}{r}$ – отношение частоты возмущения к базовой частоте (эти соотношения используются в последующих расчетах).

Тогда исходное выражение (19) можно привести к виду

$$W_1(p)=\frac{\bar{y}(p)}{\hat{z}}=\frac{a_{11}p^2+a_{12}p^2+}{b_{11}p^2+b_{12}p^2+b_{13}p^2+}\cdots$$
$$\cdots\frac{+a_{13}p^2+a_{14}}{+b_{14}p+b_{15}}, \quad (26)$$

где

$$a_{11}=ca_0+cl_1b_0,a_{12}=\left(k_1+k_2\right)a_0-k_2l_2b_0,$$
$$a_{13}=\left(k_1+k_2\right)cl_1^2+ck_2l_2^2,a_{14}=-kk_2l_2^2,$$
$$b_0=m_1l_1-m_2l_2,b_{11}=a_0m_1,b_{12}=a_0c+cl_1^2m,$$
$$b_{13}=a_0\left(k+k_2+mk_2l_2^2\right),b_{14}=cl_1^2\left(k+k_2\right)+k_2l_1l_2c,$$
$$b_{15}=kk_2l_2^2.$$

Выражение для передаточной функции (21) использовано для получения выражений амплитудо-частотных характеристик (АЧХ) виброзащитной системы (подвески). В безразмерной форме с учетом обозначений (21′) передаточная функция (26) с учетом представления действительных и мнимых частей частотных уравнений числителя и знаменателя примет вид

$$W(j\eta)=\frac{ni^2-\mu\eta^2(1+n)+}{\mu\eta^4-\mu\eta^2(1+n)+ni^2\left(1-\eta^2\right)+}\cdots$$
$$\cdots\frac{+j2\varepsilon\eta\left(1+n(i+i)^2-\mu\eta^2\right)}{+j2\varepsilon\eta\left(1+n(i+1)^2-\eta^2(\mu+1)\right)}. \quad (27)$$

При введении сочленения, реализуемого демпфером b_0 (параметр ε), подвеска работает как система с одной степенью свободы при наличии устройства с преобразованием движения (или дифференцирующего звена второго порядка).

VI. Для вычислительного моделирования использовалось выражение (27). Примеры АЧХ, построенные с помощью средств пакета прикладных программ Mathcad 11, приведены на рис. 4–7. Значения параметров и констант показаны непосредственно на рисунках. Из анализа частотных характеристик следует, что в величины безразмерного коэффициента демпфирования ε может иметь одну или две существенно различных резонансных частоты (рис. 2) при постоянной массе рычажного механизма. Такие изменения вполне объяснимы способностью механической системы к образованию сочленений при увеличении жесткости упругого элемента или сил сопротивления. В данном случае (рис. 2) это осуществляется демпфером, коэффициент демпфирования которого увеличивается, что приводит к формированию шарнира в точке A, а система в целом приобретает свойства системы с одной степенью свободы (рис. 4). Возможные значения параметров рычажного механизма, как правило, могут изменяться в сравнительно узком диапазоне, что связано с конструктивными соображениями, однако их влияние может быть весьма существенно и проявляться соответствующим образом при определенном выборе параметров. Увеличение массы рычажного механизма влияет на свойства системы, изменяя ее возможности перераспределения энергии между парциальными системами (рис. 5). Уменьшение жесткости k_2 при одновременном увеличении демпфирования с ростом частоты внешнего воздействия по существу определяет превращение АЧХ двухмассовой системы в одномассовую (рис. 6). Таким образом, характер изменения АЧХ системы при выборе пределов изменения параметров сопровождается проявлением некоторых присущих механическим колебательным системам свойств самоорганизации движения. Последнее связано с формированием сочленений, которые по существу меняют структуру системы, а это влечет за собой соответствующие изменения ее динамических свойств.

Рациональное сочетание параметров в вибрационной системе связано, как правило, с оценкой поведения системы в области резонансных частот. Исследования свойств систем за счет изменения того или иного параметра встречаются в многочисленных вариантах конструктивно-технического оформления и изменения жесткости или сил демпфирования.

Алгоритмы, определяющие необходимые изменения свойств, также могут быть различными, в том числе обеспечивать случайный поиск, подстройку или адаптацию, в том числе и самообучение. Вопрос эффективности таких устройств, часто демонстрирующих положительные результаты, заключается в том, каким образом учитываются такие особенности процесса введения допол-

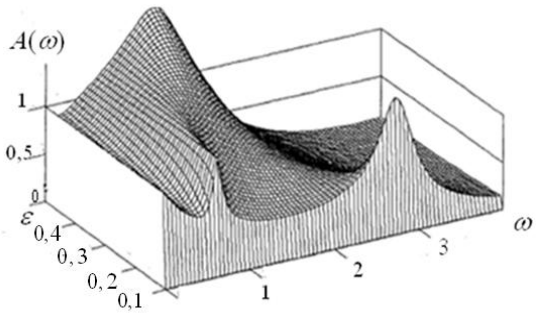


Рис. 4. Влияние коэффициента демпфирования (ε) на амплитуду установившихся колебаний в зависимости от частоты возмущения

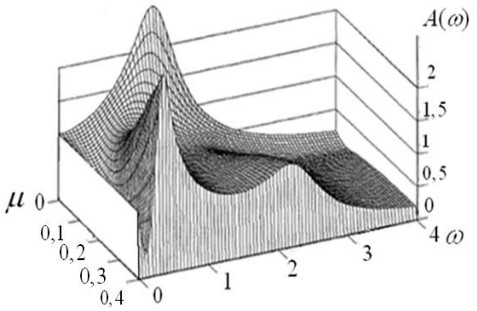


Рис. 5. Влияние отношения расчетной массы рычага к массе объекта защиты μ на амплитуду установившихся колебаний в зависимости от частоты возмущения

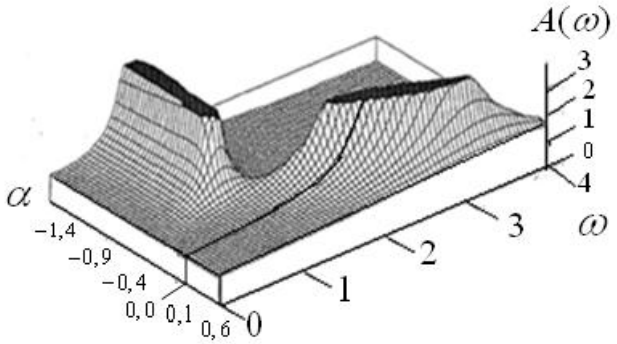


Рис. 6. Влияние отношения плеч рычага (α) на амплитуду установившихся колебаний в зависимости от частоты возмущения

нительной связи, как место присоединения элемента.

VII. Известно, в частности, что управляемые элементы, генерирующие дополнительную силу через изменение параметра или путем ее прямого формирования, обладают таким свойством, как внутренние конструктивные (или паразитные) связи, физическая суть которых заключается в том, что упругости и демпфирования при введении дополнительной связи присутствуют в системе и при нулевом значении управляющего сигнала. В полуактивных виброзащитных системах используется скачкообразное изменение жесткости или демпфирования. Можно предположить, что в результате «активного» вмешательства в процесс движения создаются предпосылки к формированию различных сочленений. Степень близости сочленения к его «идеальному» образу, например, в виде вращательного шарнира, может быть разной. Однако, в любом случае можно принимать во внимание факты изменения структуры, что предопределяет многие последствия «активного» вмешательства, например проявление особенностей динамических свойств изменения структуры механических систем, в рамках которых рассматриваются процессы. Если введение дополнительной связи в виде демпфера приводит к скачку сопротивления, то начатый процесс в системе с двумя степенями свободы может трансформироваться в процесс движения уже в системе с одной степенью свободы. В этом случае переходные явления, связанные с изменением структуры, оказывают влияние и могут проявляться в локальных деформациях фазовых портретов движения (годографах). Влияние сил сопротивления, зависящих от частоты внешнего воздействия, можно объяснить на примере амортизатора [7] с передаточной функцией

$$W = bp + k, \qquad (28)$$

где b – коэффициент вязкого демпфирования; k – жесткость пружины.

Приведенная жесткость устройства определяется выражением

$$k_{np} = |W(p)| = \sqrt{b^2\omega^2 + k_2}\,, \qquad (29)$$

откуда следует, что на частоте $\omega = \dfrac{k}{c}$ упругая сила по величине соответствует силе сопротивления; затем с увеличением частоты сила сопротивления будет значительно превосходить упругую силу. Можно предполагать существование трех форм возможных особенностей в действии вязкого сопротивления: до первого резонанса; в резонансе; в зарезонансной области. Можно полагать, что в зарезонансной области, сила воздействия формирует сочленение со скоростью, зависящей от нарастания величины силы сопротивления. Условия закрепления вводимого демпфера имеют существенное значение, поскольку демпфер имеет поршень (шток) и цилиндр и, соответственно, шток прикрепляется к объекту, защиты или к рычагу, что при существенных изменениях в структуре будет формировать соответствующие фазовые взаимодействия. При появлении сочленения, формируемого введением сопротивления, исходная система трансформируется в систему с одной степенью свободы, для которой характерны режимы динамического гашения и «запирания» системы на высоких частотах. Уровень запирания определяет величину коэффициента передачи амплитуды колебаний при увеличении частоты внешнего воздействия и зависит от соотношения массы рычажного механизма к массе объекта. На рис. 7 приведены фазовые портреты движения, полученные при вычислительном моделировании процессов движении, с включением демпфера c при $k_1 = 0$ по алгоритмам

$$b = \begin{cases} b_1 \ \text{ïðè} \ \dot{y}(\dot{y} - \dot{x}) > 0, \\ b_0 \ \text{ïðè} \ \dot{y}(\dot{y} - \dot{x}) < 0, \end{cases} \qquad (30)$$

где b_0 – коэффициент демпфирования включенного демпфера; b_1 – демпфер выключен; $x = y_1'$ – координата относительного положения массы m_1. На рис. 7 характерным являются точки локальных изменений фазовых портретов, особенно для зарезонансной области движения объекта, где в более сильной форме проявляются условия близости к формированию сочленения. Для всех зависимостей характерным является то обстоятельство, что при увеличении частоты внешних воздействий наблюдается установление некоторого предела, что является проявлением запирания рычажной системы.

Таким образом, использование средств направленного изменения свойств отдельных элементов, в частности демпферов, в определенном диапазоне частот хотя и может проявиться как положительный эффект, однако динамика этих процессов в физическом смысле является более сложной. Работа управляемых устройств в прерывистом режиме создает условия перехода системы к формированию сочленения. Последнее связано с переходом исходной системы в одномассовую рычажную систему, которая обладает специфичными свойствами «запирания». Уровень запирания при этом не зависит от величины сил демпфирования и упругих сил, а определяется только отношением масс объекта и рычажной системы.

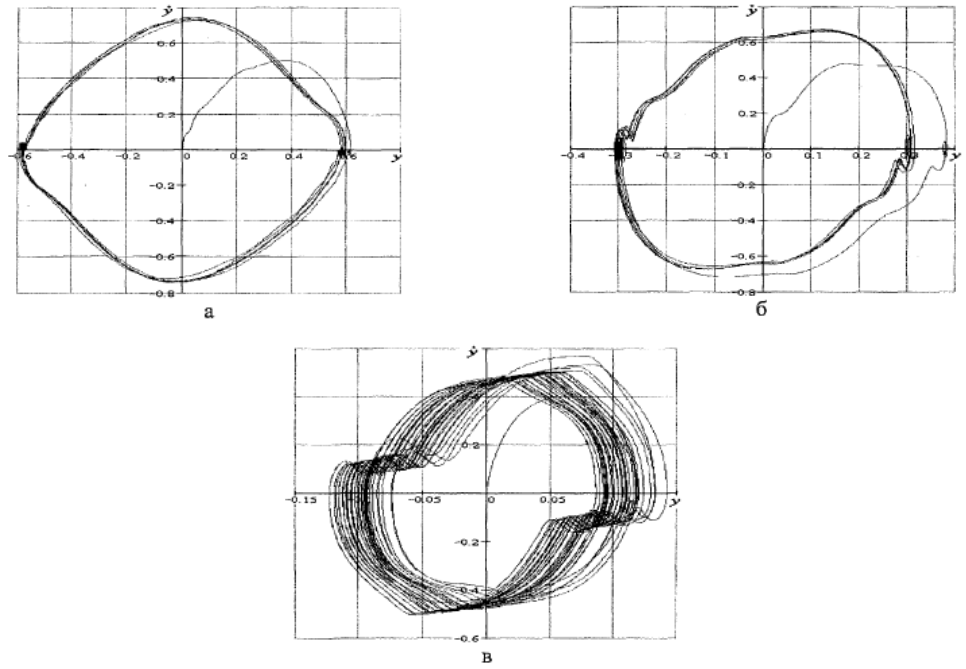


Рис. 7. Фазовые портреты колебаний объекта защиты для алгоритма(30) на частотах: а) дорезонансной η = 0,7; б) переходный η = 1,5; в) зарезонансный η = 3,5

VIII. В заключение можно отметить, что авторами предлагается научно обоснованная методика построения математических моделей для транспортных средств, расчетные схемы которых содержат рычажные связи, реализуемые через сочленения твердых тел. Математические модели отражают характерные особенности подвесок транспортных средств, для которых особую роль играют также особенности конструктивных решений, таких как расположение мест крепления элементов виброзащитных систем, разница в значениях параметров, влияние структуры соединений элементов. Сочленения в физическом плане обеспечиваются не только конструктивными формами соединения через шарниры или кинематические пары, но и соответствующим выбором параметров элементов, достигающих предельных значений. В частности, такие функции может выполнять упругий элемент или демпфирующие звенья. При этом увеличение сил демпфирования, вводимых в механическую систему, проявляется внешне таким же образом, как и появление сочленений, то есть может проявляться через свойства «запирания» в относительных движениях на высоких частотах, когда силы сопротивления становятся очень значительными.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Елисеев С.В., Хоменко А.П. Сочленения в виброзащитных системах как проыесс уменьшения числа степеней свободы // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – ИрГУПС. Вып. № 4(28). Иркутск, 2010. – С. 8 – 14.
2. Елисеев С.В., Хоменко А.П. Виброзащитные системы с сочленениями. Технология построения математических моделей // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – ИрГУПС. Вып. № 3(27). Иркутск, 2010. – С. 8 – 17.
3. Климов А.В. Динамика рычажной релаксационной подвески с прерывистым демпфированием: дис. … канд. техн. наук / А.В. Климов; ОрелГТУ. – Орел, 2001. – 186 с.
4. Хоменко А.П., Каргапольцев С.К. Новые формы организации научной деятельности в вузе // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – ИрГУПС. Вып. № 4(8). Иркутск, 2005. – С. 88 – 91.
5. Ивович В.А. Виброизоляция горно-обогатительных машин и оборудования / В.А. Ивович. – М.: Недра, 1978. – 252 с.
6. Елисеев С.В., Резник Ю.Н., Хоменко А.П., Засядко А.А. Динамический синтез в обобщенных задачах виброзащиты и виброизоляции технических объектов. – Иркутск : Изд-во Иркутского государственного университета, 2008. – 523 с.
7. Елисеев С.В. Мехатроника виброзащитных систем. Элементы теории / И.В. Фомина [и др.]. – Иркутск: ИрГУПС, 2009. – 128 с. – Деп. в ВИНИТИ 27.11.09, №738-В 2009.

УДК 518.517

Груздева Татьяна Владимировна,
к. ф.-м. н., доцент, с. н. с., ИДСТУ СО РАН,
т. 941-232, e-mail: gruzdeva@icc.ru
Климентова Ксения Борисовна,
к. ф.-м. н., м. н. с., ИДСТУ СО РАН,
т. 453-106, e-mail: Xenia.Klimentova@icc.ru

МЕТОД ОТСЕЧЕНИЙ ДЛЯ НЕРАВЕНСТВ КЛИК В ЗАДАЧЕ РАЗМЕЩЕНИЯ С ПРЕДПОЧТЕНИЯМИ КЛИЕНТОВ*

T.V. Gruzdeva, K.B. Klimentova

A CUTTING PLANE METHOD FOR CLIQUE INEQUALIES IN SIMPLE PLANT LOCATION PROBLEM WITH CLIENTS' PREFERENCES

Аннотация. *Разработан метод отсечений на базе неравенств клик для поиска нижних оценок оптимального значения задачи размещения с предпочтениями клиентов. В основе метода отсечений лежит поиск максимальной взвешенной клики в графе, базирующийся на теории глобального поиска для задач с d. c.-ограничением. Проведенный вычислительный эксперимент на известных тестовых примерах подтвердил эффективность разработанного подхода с точки зрения улучшения нижней оценки.*

Ключевые слова: *задача размещения с предпочтениями клиентов; метод отсечений; неравенства клик; d. c.-ограничение; локальный поиск.*

Abstract. *A cutting plane method based on clique inequalities is developed for finding a lower bound of the optimal value for the Facility Location Problem with Clients' Preferences. The basic of the method is a method for fining maximal weighted clique in graph, which is grounded on a Global search theory for a problem with d. c. constraint. The carried out computational experiment with the known text instances approved the effectiveness for the proposed method in the view of lower bound improvement.*

Keywords: *the Facility Location problem with Clients' Preferences; a cutting plane method; clique inequalities; d. c. constraint; local search.*

Введение

Задачу размещения, в которой предполагается, что клиенты выбирают предприятия обслуживания самостоятельно, руководствуясь своими целями, называют задачей размещения с предпочтениями клиентов (ЗРПК). В такой задаче, помимо стандартных затрат на обслуживание клиентов, заданы предпочтения клиентов. Предполагается, что из каждой пары предприятий клиент может выбрать наиболее предпочтительное. Предпочтения клиентов обычно заданы в виде матрицы [1, 5] или отношений порядка на множестве предприятий для каждого клиента [12, 15].

Впервые такая задача размещения рассматривалась в [15]. Позже эти модели исследовались в работах [1, 2, 5, 6]. В частности, в [2, 5] установлена взаимосвязь ЗРПК с псевдобулевыми функциями.

Особый интерес представляют работы, посвященные вопросам численного решения ЗРПК. В [1] для поиска приближенного решения в задаче с фиксированным числом открываемых предприятий разработан генетический алгоритм. Для поиска точного решения в ЗРПК используются постановки в виде задач целочисленного линейного программирования (ЦЛП). Напомним, что оценки оптимального значения играют важную роль при разработке точных методов решения задач ЦЛП на базе схем ветвей и отсечений. Нижним оценкам оптимального значения в ЗРПК посвящены работы [1, 3, 4, 12, 16]. Так, в [12] рассмотрены известные и предложен ряд новых правильных неравенств для многогранника исследуемой задачи. С их помощью авторам удалось улучшить нижние оценки оптимального значения и повысить эффективность метода ветвей и границ. В [1, 16] предложена расширенная формулировка в терминах ЦЛП, основанная на взаимосвязи исследуемой ЗРПК с задачей о паре матриц. В работе [4] на основе анализа формулировки из [1, 16] построено новое семейство правильных неравенств, и доказано, что с его помощью можно

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ, проект 11-01-00270-а.

получить оценку, которая оказывается не хуже оценки, соответствующей целочисленной постановке задачи о паре матриц из [1, 16]. В [3] для семейства неравенств из [4] был разработан метод отсечений, который затем использовался в составе точного метода ветвей и отсечений. Проведенные вычислительные эксперименты показали, что с помощью предложенного семейства неравенств удалось уточнить не только оценку из [1, 16], но и нижнюю оценку, представленную в работе [12].

Кроме упомянутого выше семейства правильных неравенств в [4] была предложена нижняя оценка, которая строится на основании взаимосвязи ЗРПК с задачей упаковки множества, и доказано, что известные нижние оценки оптимального значения исследуемой задачи [1, 5, 6, 12, 16] оказываются по крайней мере не лучше этой нижней оценки. Однако вопрос численного поиска такой нижней оценки исследован не был.

Целью данной работы является разработка метода отсечений для поиска нижней оценки, связанной с неравенствами клик, возникающими из взаимосвязи ЗРПК с задачей упаковки множества. При разработке метода отсечений используется разработанный в [7] алгоритм поиска максимальной взвешенной клики, который хорошо зарекомендовал себя при решении тестовых задач из известной библиотеки DIMACS [14]. В основе этого алгоритма лежит сведение задачи о максимальной взвешенной клике (ЗМВК) к задаче минимизации выпуклой квадратичной функции на каноническом симплексе с дополнительным невыпуклым ограничением [7]. Проведен вычислительный эксперимент на тестовых задачах из [12], подтвердивший эффективность разработанного метода отсечений с точки зрения улучшения нижней оценки.

1. Постановка задачи

Пусть заданы следующие множества и величины.

$I = \{1,\ldots,m\}$ – множество предприятий;

$J = \{1,\ldots,n\}$ – множество клиентов;

$f = \{f_i\},\ f_i \ge 0, i \in I$ – затраты на открытие предприятия i;

$C = \{c_{ij}\},\ c_{ij} \ge 0, i \in I, j \in J$ – матрица производственно-транспортных затрат на обслуживание клиентов;

$G = \{g_{ij}\},\ g_{ij} \ge 0, i \in I, j \in J$ – матрица предпочтений клиентов: если $g_{i_1 j} < g_{i_2 j}$, то j-й клиент из открытых предприятий i_1, i_2 выберет предприятие i_1.

В задаче размещения с предпочтениями клиентов необходимо открыть некоторое подмножество предприятий, минимизируя суммарные затраты на обслуживание клиентов и открытие предприятий, учитывая при этом предпочтения клиентов.

Математическая модель ЗРПК может быть записана в виде задачи ЦЛП [1, 5, 15]. С этой целью введем бинарные переменные:

$$y_i = \begin{cases} 1, \text{ если открывается } i\text{-е предприятие}, \\ 0 \text{ в противном случае}; \end{cases}$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ если } j\text{-й клиент обслуживается из } i\text{-го предприятия}, \\ 0 \text{ в противном случае}; \end{cases}$$

Кроме того, определим следующие множества: $B_{ij} \stackrel{\Delta}{=} \{k \in I \mid g_{kj} < g_{ij}\}$ – множество предприятий, которые лучше для клиента j, чем предприятие i; $W_{ij} \stackrel{\Delta}{=} \{k \in I \mid g_{kj} > g_{ij}\}$ – это предприятия, которые хуже для клиента j, чем предприятие i, $i \in I, j \in J$.

Рассмотрим следующую задачу ЦЛП:

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} x_{ij} + \sum_{i \in I} f_i y_i, \qquad (1)$$

$$y_i + \sum_{k \in W_{ij}} x_{kj} \le 1, \quad i \in I, j \in J, \qquad (2)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} = 1, \quad j \in J, \qquad (3)$$

$$0 \le x_{ij} \le y_i \le 1, \quad i \in I, j \in J, \qquad (4)$$

$$x_{ij}, y_i \in \{0,1\}, \quad i \in I, j \in J. \qquad (5)$$

Целевая функция (1) задает суммарные затраты поставщиков на обслуживание клиентов и открытие предприятий. Ограничения (3) и (4) являются стандартными для задач размещения. Равенства (3) обеспечивают обслуживание каждого клиента в точности одним предприятием. Неравенства (4) позволяют обслуживать клиентов только из открытых предприятий. Ключевым моментом здесь является появление ограничений (2). Эти ограничения гарантируют обслуживание клиентов из наиболее предпочтительных для них предприятий. Будем обозначать далее задачу (1)–(5) через (P).

2. Правильные неравенства и нижние оценки

Важную роль при решении задач ЦЛП играет релаксация к задачам линейного программирования (ЛП). Отметим, что оптимальное значение линейной релаксации

определяет нижнюю оценку оптимального значения исходной целочисленной задачи (на минимум).

Известно [19], что во многих случаях для задачи ЦЛП можно предложить несколько эквивалентных формулировок. Качество формулировки принято оценивать разрывом целочисленности: $gap = (Opt - LP)/Opt$, где Opt – оптимальное значение исследуемой задачи ЦЛП, LP – значение линейной релаксации. Чем меньше величина gap, тем сильнее формулировка. Идеальным случаем является формулировка, в точности описывающая выпуклую оболочку допустимых целочисленных точек задачи. Однако ее построение с точки зрения сложности оказывается, как правило, эквивалентно решению исходной задачи. Во многих случаях получение такой формулировки на практике невыполнимо.

Существуют различные способы построения новых формулировок задачи ЦЛП. Одним из таких способов является конструирование правильных неравенств. Пусть U – множество точек в R^n. Неравенство $a^T x \le b$ называют правильным для U, если $a^T x \le b$ для всех $x \in U$. Рассмотрим линейную релаксацию (1)–(4) задачи (P) и обозначим ее оптимальное значение через LB_1. Через P обозначим многогранник задачи (1)–(5), т. е. выпуклую оболочку целочисленных точек, удовлетворяющих ограничениям (2)–(5).

Для многогранника P известен ряд правильных неравенств. Они порождают различные формулировки, отличающиеся числом ограничений и, как следствие, разрывом целочисленности. В частности, в работе [12] были предложены следующие семейства правильных неравенств.

1) Пусть $j_1,...,j_s \in J$ и $i \in I$. Неравенства

$$Cs(i, j_1,..., j_s): \sum_{k \in W_{ij_1}} x_{kj_1} + \sum_{t=2}^{s} \sum_{k \in W_{ij_t} \cap (\bigcap_{q=1}^{t-1} B_{ij_q})} x_{kj_t} + y_i \le 1 \quad (6)$$

являются правильными для многогранника P. Данные неравенства порождают экспоненциальное число дополнительных ограничений. Некоторые из них могут доминировать другие. Потому целесообразно использовать только часть этих неравенств, в частности, предлагается [12] выбирать такие элементы $j_1,...j_s \in J$, $i \in I$, для которых множества W_{ij_t}, $t = 1,\ldots,s$, попарно не пересекаются.

2) Неравенства, доминирующие (4). Пусть $r, p \in J$ и $i \in I$. Если $B_{ip} \subseteq B_{ir}$, то неравенство

$$x_{ir} \le x_{ip} \quad (7)$$

является правильными для многогранника P, кроме того, оно доминирует неравенство $x_{ir} \le y_i$. В случае, когда $B_{ir} = B_{ip}$, неравенство (7) выполняется как равенство:

$$x_{ir} = x_{ip}. \quad (8)$$

Обозначим через LB_2 нижнюю оценку, представленную в работе [12], т.е. оптимальное значение в задаче ЛП (1), (3), (4), (7), (8) с предложенным в [12] подмножеством неравенств (6). Известно, что $LB_1 \le LB_2$.

В работе [4] было предложено еще одно семейство правильных неравенств для многогранника P:

$$\sum_{i \in W_{i_l} r} x_{ir} + \sum_{i \notin W_{i_l} r} x_{ip} \le 1, \quad l \in L_j, i \in I, r, p \in J, \ r \ne p, \quad (9)$$

где $L_j \overset{\Delta}{=} \{l \in \{1,\ldots,m-1\} \mid \Delta_l^j < 0\}$, а

$\Delta_l^j \overset{\Delta}{=} \min\{0; c_{i_{l+1} j} - c_{i_l j}\}$, $l = 1,\ldots,m-1$, $(i_1,...,i_m)$: $g_{i_1 j} < g_{i_2 j} < \ldots < g_{i_m j}$, $j \in J$.

Построение этого семейства основано на анализе целочисленной формулировки, предложенной в [1, 16]. Такая целочисленная формулировка возникает из взаимосвязи ЗРПК и задачи о паре матриц.

Обозначим через LB_3 нижнюю оценку, получаемую при решении линейной релаксации улучшенной формулировки из [12] с добавленными в нее неравенствами (9), т. е. оптимальное значение задачи ЛП (1), (3), (4), (7), (8), (9) с предложенным в [12] подмножеством неравенств (6).

3. Взаимосвязь с задачей упаковки множества и неравенства клик

Нетрудно заметить, что часть неравенств в исходной формулировке (P) исследуемой ЗРПК, а также некоторые известные из работы [12] правильные неравенства и новое семейство правильных неравенств (9) из работы [4] имеют сходную структуру с ограничениями задачи упаковки множества, а именно $\langle \bar{d}, z \rangle \le 1$ [8, 19].

Рассмотрим многогранное множество, определяемое следующей группой правильных неравенств для многогранника P:

$$y_i + \sum_{k \in W_{ij}} x_{kj} \le 1, \ i \in I, \ j \in J, \quad (10)$$

$$\sum_{i\in I} x_{ij} \le 1,\ \ j \in J, \qquad (11)$$

$$\sum_{k\in W_{ir}} x_{kr} + \sum_{k\in W_{ip}\cap B_{ir}} x_{kp} + y_i \le 1,\ \ i \in I, r, p \in J, \qquad (12)$$

$$\sum_{i\in W_{i_l}r} x_{ir} + \sum_{i\notin W_{i_l}r} x_{ip} \le 1, l \in L_r, i \in I, r, p \in J, r \ne p. \qquad (13)$$

Напомним, что ограничения (10) участвуют в исходной формулировке (P), правильные неравенства (12) предложены в [12], а ограничения (13) – семейство правильных неравенств из [4]. Неравенства (11) представляют собой ослабленные ограничения (3) ($\sum_{i\in I} x_{ij} = 1,\ \ j \in J$) исходной задачи (P).

Далее будем обозначать многогранник, описанный системой неравенств (10)–(13), через D_{SS}, а матрицу ограничений левой части системы (10)–(13) через D. Нетрудно видеть, что все неравенства этой системы имеют структуру ограничений задачи упаковки множества: $\langle \bar{d}, z\rangle \le 1$. Следовательно, можно рассмотреть задачу упаковки множества специального вида, непрерывная область которой описывается неравенствами D_{SS}. Обозначим через P_{SS} многогранник этой задачи упаковки множества:

$$P_{SS} \stackrel{\Delta}{=} conv(D_{SS} \cap \{0,1\}^{mn+m}).$$

Важно заметить, что в многограннике D_{SS} ограничения-равенства $\sum_{i\in I} x_{ij} = 1,\ \ j \in J$ задачи (P) имеют форму неравенств, а неравенства $x_{ij} \le y_i, i \in I, j \in J$ не рассматриваются. Следовательно, множество бинарных векторов $(x, y) \in D_{SS} \cap \{0,1\}^{mn+m}$ будет содержать в себе все допустимые точки задачи (P), т. е. точки, удовлетворяющие ограничениям (2)–(5).

С учетом этой информации несложно показать следующее важное включение, связывающее многогранник ЗРПК и многогранник построенной задачи упаковки множества специального вида:

$$P \subseteq P_{SS}. \qquad (14)$$

Другими словами, построенная задача упаковки множества с многогранником P_{SS} является *специальной релаксацией* для ЗРПК. Этот факт позволяет использовать известные результаты о правильных неравенствах для многогранника задачи упаковки множества при построении новых нижних оценок оптимального значения ЗРПК (см., например, [10, 11, 13, 17, 21]). Действительно, в силу включения (14) любые правильные неравенства для многогранника P_{SS} будут также правильным для многогранника P.

В частности, в работе [4] было предложено рассмотреть неравенства клик, которые конструируются для многогранника P_{SS} на основании взаимосвязи задачи упаковки множества и задачи поиска независимого множества на графе, который строится по следующему правилу.

Каждой переменной (x, y) ставится в соответствие вершина графа. Обозначим через $V \stackrel{\Delta}{=} \{1,\ldots,mn+m\}$, $|V| \stackrel{\Delta}{=} N$ множество таких вершин. Вершины u и v соединяются ребром в том и только в том случае, если столбцы d^u и d^v матрицы D не ортогональны:

$$(u,v) \in E \Leftrightarrow \langle d^u, d^v\rangle \ne 0, u, v \in V.$$

Известно (см., например, [19]), что задача упаковки множества эквивалентна задаче поиска независимого множества вершин максимального веса в графе $G(V,E)$. Для многогранника последней известно большое количество семейств правильных неравенств [8, 10, 11, 17, 19, 21]. Одними из самых эффективных на практике являются неравенства клик. Напомним, что подмножество вершин графа называется кликой, если каждая пара вершин из этого подмножества является смежной, т.е. соединена ребром в графе. Клика называется локально максимальной, если она не содержится в клике большей размерности.

Пусть $K \subset V$ – это подмножество вершин графа $G(V,E)$, образующих клику, z_u, $u \in V$ – переменные, поставленные в соответствие вершинам графа в задаче поиска независимого множества. *Неравенство клики*

$$\sum_{k\in K} z_k \le 1$$

является правильным для многогранника такой задачи, а следовательно, и для многогранника задачи упаковки множества [8, 19].

Обозначим через K множество всех клик в графе G, построенном выше для специальной релаксации ЗРПК к задаче упаковки множества. Рассмотрим семейство правильных неравенств для многогранника P_{SS}, определяемых этими кликами:

$$\sum_{k\in K_s} (x,y)_k \le 1,\ \ K_s \in K, \qquad (15)$$

которые, согласно включению (14), будут правильными и для многогранника ЗРПК.

Построим новую постановку ЗРПК с целевой функцией (1), ограничениями (3)–(5), (7), (8), а также неравенствами клик (15). Обозначим через LB_4 нижнюю оценку, получаемую при решении линейной релаксации такой задачи ЦЛП.

В работе [4] была изучена взаимосвязь неравенств клик и неравенств (6), предложенных в [12]. В результате проведенных исследований в том числе было установлено, что

$$LB_3 \le LB_4.$$

Однако вопрос о численном поиске нижней оценки LB_4 ранее не исследовался. Разработке метода отсечений для семейства неравенств клик, а также его численному тестированию посвящены следующие разделы.

4. Метод отсечений для неравенств клик

На практике неравенств клик в семействе (15) может оказаться чрезвычайно много (в общем случае экспоненциальное число), причем некоторые из них могут быть неактивны на оптимальном решении соответствующей непрерывной задачи и, следовательно, бесполезны для получения нижней оценки. Это приводит к неоправданному увеличению количества ограничений в формулировке. Для преодоления чрезмерного разрастания формулировки задачи используется метод отсечений. Опишем кратко основную идею этого метода [19, 20]. Пусть задано некоторое семейство C правильных для X неравенств, где X – это множество допустимых точек некоторой задачи ЦЛП. Идея метода отсечений заключается в том, чтобы не добавлять сразу все правильные неравенства семейства C в формулировку, а включать их последовательно по мере необходимости. С этой целью сначала рассматривается линейная релаксация на исходном множестве X и находится ее решение. Затем в задачу добавляются только те неравенства из семейства C, которые нарушаются полученным решением линейной релаксации. И далее вновь находится решение непрерывной задачи уже на новом допустимом множестве. Этот процесс продолжается, пока решение релаксированной задачи не будет удовлетворять всем неравенствам рассматриваемого семейства.

При реализации метода отсечений для неравенств клик на каждом шаге этого метода возникает необходимость поиска невыполненных неравенств клик. Для решения такой задачи целесообразно использовать эффективный метод поиска взвешенных клик в графе.

Напомним, что через $G(V,E)$ в п. 4 был обозначен специальный граф, построенный на основе взаимосвязи ЗРПК с задачей упаковки множества с множеством вершин $V=\{1,\dots N\}$, где $N \stackrel{\Delta}{=} m+mn$, и множеством ребер $E=\{(u,v)\,|\,u<v,\quad u,v\in V\}$. Пусть на каждой итерации метода отсечений вершинам $u\in V$ графа G сопоставлены веса $w_u \ge 0$, определяемые соответствующими компонентами $z_u \stackrel{\Delta}{=} (x,y)_u$ текущего решения линейной релаксации.

Таким образом, на каждой итерации метода отсечений необходимо найти взвешенные клики $K_s \in K$ в графе G с весами $W(K_s)=\sum\limits_{k\in K_s} w_k > 1$, (поскольку интерес представляют только неравенства, невыполненные на текущем решении линейной релаксации). Нетрудно видеть, что если клика $\hat{K}$ содержится в клике K бóльшей размерности, то неравенство, соответствующее клике K, будет доминировать неравенство, порожденное кликой $\hat{K}$ [18]. Следовательно, на практике целесообразно на шагах метода отсечений поставить задачу поиска локально максимальных взвешенных клик таких, что $W(K)>1$.

Для решения этой задачи в настоящей работе применен подход, который использует сведение задачи о максимальной взвешенной клике (ЗМВК) к непрерывной невыпуклой задаче оптимизации [7].

Для описания предлагаемого подхода введем характеристический вектор $q(K,w)$ взвешенной клики с компонентами

$$q(K,w)_u=\begin{cases}\dfrac{w_u}{W(K)}, & \text{åñëè } u\in K,\\ 0 & \text{â ïðîòèâíîì ñëó÷àå}\end{cases} \qquad (16)$$

и рассмотрим следующую непрерывную задачу:

$$\left.\begin{aligned} h(z)=\sum_{u=1}^{N}\frac{1}{w_u}z_u^2 \downarrow \min,\ z\in S,\\ F(z)=\langle z,Bz\rangle \le 0,\end{aligned}\right\} \qquad (MC(W))$$

где $S=\left\{z\ge 0 \,|\, \sum\limits_{u=1}^{N} z_u = 1\right\}$, а матрица $B(\overline{G},w)=\{b_{uv}\}_{(N\times N)}$ задана следующим образом:

$$b_{uv}=\begin{cases}\dfrac{1}{2w_u}+\dfrac{1}{2w_v}, & \text{åñëè } u\ne v,\ (u,v)\notin E;\\ 0 & \text{â ïðîòèâíîì ñëó÷àå.}\end{cases} \qquad (17)$$

Доказано [7], что любое глобальное решение z^* задачи $(MC(W))$ позволяет определить соответствующую максимальную взвешенную клику K_* по правилу: $K_* = \{u \in V : z_u^* > 0\}$.

Нетрудно видеть, что задача $(MC(W))$ не может быть отнесена к выпуклым задачам, поскольку матрица B не является знакоопределенной. Однако хорошо известно, что любая матрица может быть представлена в виде разности двух положительно определенных матриц, например следующим образом:

$$B_1 = \Lambda,\ B_2 = \Lambda - B,\ \text{ãäå}\ \Lambda = diag\{\hat{d}_1,...,\hat{d}_N\},$$

$$\hat{d}_u = \sum_{v=1}^{N} b_{uv} + \varepsilon = \frac{\alpha_u}{2w_u} + \sum_{v:(u,v)\notin E} \frac{1}{2w_v} + \varepsilon,\ u = 1,\ldots,N,$$

где α_u – степень вершины u в дополнительном графе $\overline{G}$, а $\varepsilon > 0$. Тогда задача $(MC(W))$ оказывается задачей с d. с.-ограничением, где $F(z) = \varphi(z) - \psi(z),\ \varphi(z) = \langle z, B_1 z\rangle,\ \psi(z) = \langle z, B_2 z\rangle$, и для ее решения применима стратегия глобального поиска [9].

На базе этой стратегии в [7] разработан алгоритм глобального поиска для ЗМВК, который был протестирован на задачах из библиотеки DIMACS [14] и показал высокую работоспособность при решении задач большой размерности $(N \geq 800)$ [7]. Поэтому данный подход применен для поиска взвешенных клик на итерациях разрабатываемого метода отсечений.

Одним из основных этапов алгоритма глобального поиска, разработанного в [7], является локальный поиск. Специальный метод локального поиска для задачи $(MC(W))$ [7] принимает во внимание дискретную природу ЗМВК, свойства матрицы B и определенную простоту допустимого множества S и служит для нахождения локально максимальных взвешенных клик.

$\overline{C}$-процедура

Шаг 0. Выбрать $z^0 \in S$, положить $t := 0$.

Шаг 1. Построить множество

$$supp(z^t) = \{u \mid z_u^t > 0\}.$$

Шаг 2. Если $supp(z^t)$ является кликой, т. е. $F(z^t) = 0$, то положить $z := z^t$ и идти на шаг 5.

Шаг 3. Выбрать две вершины r и p из $supp(z^t)$ такие, что

$$(r,p) \notin E,\ F(\bar{z}(r,p)) < F(z^t), \qquad (18)$$

где $\bar{z}(r,p) = z^t + z_p^t(e^r - e^p)$.

Шаг 4. Положить $z^{t+1} := \bar{z}(r,p),\ t := t+1$ и вернуться на шаг 1.

Шаг 5. Найти локально максимальную клику $K \supset supp(z^t)$. Положить $W := \sum_{k\in K} w_k$.

Шаг 6. Построить характеристический вектор $q(K,w)$ по формуле (16). **STOP:** $z = q(K,w)$ – локальный минимум в задаче $(MC(W))$.

Напомним, что при реализации метода отсечений для неравенств клик необходимо найти локально максимальные взвешенные клики, такие что $W(K) > 1$. Для этих целей может быть адаптирован алгоритм глобального поиска из [7], который преобразуется в следующую процедуру.

Пусть Q – множество клик со свойством $W(K) > 1$.

Алгоритм поиска невыполненных неравенств клик

Шаг 0. Положить $Q := \varnothing,\ t := 0$. Начиная из точки $\hat{z}^0$ $\overline{C}$-процедурой получить точку z^0 локального минимума задачи $(MC(W))$.

Шаг 1. Положить $\beta_t := \psi(z^t),\ \rho_t := h(z^t)$. Построить аппроксимацию

$$A_t = \{a^u = \lambda_u e^u \mid \psi(a^u) = \beta_t, u = 1,\ldots,N\}.$$

Шаг 2. Для каждого $u = 1,\ldots,N$ найти $\tilde{z}^u$ – решение линеаризованной задачи

$$\langle z, \Lambda z\rangle - \langle \nabla\psi(a^u), z\rangle \downarrow \min,\ z \in S,\ h(z) \leq \rho_t.$$

Шаг 3. Начиная с точки $\tilde{z}^u \in S$ для каждого $u = 1,\ldots,N$, получить $\overline{C}$-процедурой точку z^u локального минимума задачи $(MC(W))$.

Шаг 4. Для каждого $u = 1,\ldots,N$, вычислить вес $W_u = \sum_{v\in supp(z^u)} w_v$. Если $W_u > 1$, то клику $supp(z^u)$ добавить во множество Q.

Шаг 5. Среди всех $z^u,\ u = 1,\ldots,N$, выбрать точку z^v:

$$h(\bar{z}^v) = \min_{1\leq u\leq N} h(\bar{z}^u),$$

Шаг 6. Если $h(z^v) < h(z^t)$, то положить $z^{t+1} := z^v, t := t+1$ и идти на шаг 1.

Шаг 7. Если $h(z^v) \geq h(z^t)$, то **STOP:** клики множества Q порождают невыполненные неравенства клик.

Далее запишем общую схему метода отсечений, основанного на представленном

алгоритме поиска невыполненных неравенств клик.

Метод отсечений для неравенств клик

Шаг 0. Решить задачу линейного программирования (1)–(4). Пусть $(x, y) \stackrel{\Delta}{=} z$ – ее решение.

Шаг 1. Построить граф $G(V,E)$ для задачи упаковки множества, в котором каждой вершине $u \in V$ сопоставлен вес $w_u = z_u$.

Шаг 2. Алгоритмом поиска невыполненных неравенств клик построить множество Q локально максимальных клик K_s со свойством $W(K_s) > 1$.

Шаг 3. Если $Q = \varnothing$, то **STOP**:

$LB_4 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} x_{ij} + \sum_{i \in I} f_i y_i$ – искомая нижняя оценка опримального значения ЗРПК.

Шаг 4. С помощью локально максимальных клик множества Q сформировать неравенства вида (15) и добавить их в формулировку ЗРПК.

Шаг 5. Решить задачу (1)–(4) с подмножеством неравенств (15) и перейти на шаг 1.

Тестирование метода отсечений для неравенств клик и сравнение нижних оценок представлено в следующем разделе.

6. Вычислительный эксперимент

Была реализована программа, осуществляющая поиск нижней оценки LB_4, связанной с неравенствами клик, с помощью разработанного в разделе СРС метода отсечений. Для решения задач линейного программирования, возникающих на шагах метода отсечений, использовался пакет FICO Xpress Optimization Suite [22]. Для решения вспомогательных задач квадратичного программирования в алгоритме поиска невыполненных неравенств клик использовался пакет IBM ILOG CPLEX [18].

Проводилось сравнение нижней оценки LB_4, полученной с помощью неравенств клик, с нижней оценкой LB_2 из работы [12] и нижней оценкой LB_3, полученной с помощью разработанного ранее нового семейства правильных неравенств (9) [3, 4]. Для сравнения нижних оценок оптимального значения ЗРПК, представленных в данной работе, были использованы тестовые примеры из работы [12], которые можно разбить на 3 блока: задачи размерности $m = 50, n = 50$ (общее число переменных в этих примерах равно 2550); во втором блоке задачи размерности $m = 50, n = 75$ (общее число переменных 3800); и, наконец, в третьем – $m = 75, n = 100$ (общее число переменных 7575).

Результаты сравнения нижних оценок для первого блока задач представлены в табл. 1. Здесь и далее в таблицах использовались следующие обозначения: *Name* – название тестового примера в соответствии с [12], *gap* – разрыв целочисленности для нижней оценки, полученной с помощью решения линейной релаксации исходной задачи (P) без добавления в формулировку каких-либо правильных неравенств, gap [12] и gap [3] – разрывы целочисленности из работ [12] и [3] соответственно и gap_{new} – разрыв целочисленности, полученный с помощью разработанного метода отсечений для неравенств клик.

Таблица 1

Нижние оценки для задач с 50 предприятиями и 50 клиентами

Name	*gap*	*gap*[12]	*gap*[3]	gap_{new}
132-1	10,27	8,66	1,95	**0**
132-2	14,44	11,82	4,49	**1,3**
132-3	11,97	10,10	3,55	**0**
132-4	6,80	6,07	1,61	**0**
133-1	9,52	8,47	0,28	**0**
133-2	6,15	5,25	0,47	**0**
133-3	12,61	11,73	2,97	**0**
133-4	7,60	6,30	1,64	**0,61**
134-1	12,12	7,79	1,99	**0**
134-2	7,12	5,43	0,00	**0**
134-3	12,66	12,23	4,30	**1,61**
134-4	13,25	11,84	5,58	**3,14**

По результатам, представленным в табл. 1, можно сделать вывод, что для 8 из 12 примеров первого блока полученная на основе неравенств клик нижняя оценка совпала с оптимальным значением ($gap_{new} = 0$). В оставшихся четырех примерах в среднем в 2,7 раза удалось сократить разрыв целочисленности по сравнению с результатами из работы [3].

Для задач второго блока (табл. 2) удалось существенно сократить разрыв целочисленности из работы [3] – в среднем в 1,6 раза.

Для примеров третьего блока (табл. 3) также удалось во всех задачах улучшить нижнюю оценку.

Таблица 2

Нижние оценки для задач с 50 предприятиями и 75 клиентами

Name	*gap*	*gap*[12]	*gap*[3]	gap_{new}
a75-50-1	27,67	24,47	16,47	**12,69**
a75-50-2	27,22	23,71	16,38	**12,76**
a75-50-3	27,14	23,66	16,08	**12,75**
a75-50-4	24,29	21,75	14,53	**11,36**
b75-50-1	28,11	24,49	13,73	**8,66**
b75-50-2	31,06	27,15	17,73	**12,09**
b75-50-3	28,22	24,36	14,58	**8,39**
b75-50-4	27,28	22,67	12,01	**6,78**
c75-50-1	31,85	26,83	14,75	**9,12**
c75-50-2	29,04	25,18	12,99	**7,22**
c75-50-3	28,47	22,29	11,19	**4,95**
c75-50-4	30,47	26,63	16,05	**10,23**

Таблица 3

Нижние оценки для задач с 75 предприятиями и 100 клиентами

Name	*gap*	*gap*[12]	*gap*[3]	gap_{new}
a100-75-1	21,27	18,96	11,99	**10,55**
a100-75-2	27,19	25,20	18,77	**16,83**
a100-75-3	25,97	24,16	17,71	**15,48**
a100-75-4	24,57	22,27	15,98	**14,79**
b100-75-1	31,80	28,51	21,64	**20,55**
b100-75-2	33,08	30,48	23,29	**21,74**
b100-75-3	34,47	30,97	23,76	**22,41**
b100-75-4	28,56	27,07	19,18	**17,72**
c100-75-1	32,15	27,95	20,52	**18,82**
c100-75-2	31,49	28,35	20,14	**17,87**
c100-75-3	32,30	28,92	20,78	**18,25**
c100-75-4	32,36	29,41	21,16	**19,11**

Таким образом, на основании проведенного вычислительного эксперимента можно сделать вывод об эффективности разработанного метода отсечений с точки зрения улучшения нижней оценки оптимального значения ЗРПК. Неравенства клик, сконструированные на основе взаимосвязи ЗРПК с задачей упаковки множества, будучи добавленными в линейную релаксацию задачи, позволяют существенно сократить разрыв целочисленности в примерах небольшой размерности, а в 2/3 задач с 50 предприятиями и 50 клиентами – найти решение ЗРПК.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алексеева Е.В. Генетический локальный поиск для задачи о p-медиане с предпочтениями клиентов / Е.В. Алексеева, Ю.А. Кочетов // Дискретный анализ и исследование операций. 2007. Т. 14, № 1. С. 3–31.
2. Береснев В.Л. Дискретные задачи размещения и полиномы от булевых переменных / В.Л. Береснев. – Новосибирск: Изд-во Института математики, 2005.
3. Васильев И.Л. Метод ветвей и отсечений для задачи размещения с предпочтениями клиентов / И.Л. Васильев, К.Б. Климентова // Дискретный анализ и исследование операций. 2009. Т. 16, № 2. С. 21–41.
4. Васильев И.Л. Новые нижние оценки для задачи размещения с предпочтениями клиентов / И.Л. Васильев, К.Б. Климентова, Ю.А. Кочетов // Журн. вычисл. математики и мат. физики. 2009. Т. 4, № 6. С. 1055–1066.
5. Горбачевская Л.Е. Полиномиально разрешимые и np-трудные двухуровневые задачи стандартизации: дис. ... канд. физ.-мат.наук / Л.Е. Горбачевская. Новосибирск, 1998.
6. Горбачевская Л.Е. Двухуровневая задача стандартизации с условием единственности оптимального потребительского выбора / Л.Е. Горбачевская, В.Т. Дементьев // Дискретный анализ и исследование операций. 1999. Т. 6, №2. С. 3–11.
7. Груздева Т.В. Решение задачи о клике сведением к задаче с d.c. ограничением / Т.В. Груздева // Дискретный анализ и исследование операций. 2008. Т. 15, № 6. С. 20–33.
8. Емеличев В.А. Многогранники, графы, оптимизация / В.А. Емеличев, М.М. Ковалев, М.К. Кравцов. – М: Наука, 1981. 344 с.
9. Стрекаловский А.С. Минимизирующие последовательности в задачах с d.c. ограничениями / А.С. Стрекаловский // Журн. вычисл. математики и мат. физики. 2005. Т. 45, № 3. С. 435–447.
10. Avella P. A computational study of a cutting plane algorithm for university course timetabling author / P. Avella, I. Vasil'ev // Journal of Scheduling. 2005. V. 8, N 6. P. 497–514.
11. Borndorfer R. Set packing relaxations of some integer programs / R. Borndorfer, R. Weismantel // Mathematical Programming. 2000. V. 88. P. 425–450.
12. Cánovas L. A strengthened formulation for the simple plant location problem with order / L. Cánovas, S. García, M. Labbé, A. Marín // Operations Research Letters. 2007. V. 35, N 2. P. 141–150.
13. Cánovas L. On the facets of the simple plant location packing polytope / L. Cánovas, S. García, M. Landete, A. Marín // Discrete Applied Mathematics. 2002. V. 124, N 1–3. P. 27–53.

14. DIMACS – Discrete Mathematics and Computer Science.URL:ftp://dimacs.rutgers.edu/pub/challenge/graph/benchmarks
15. Hanjoul P. A facility location problem with clients' preference orderings / P. Hanjoul, D. Peeters // Regional Science and Urban Economics. 1987. V. 17. P. 451–473.
16. Hansen P., Lower bounds for the uncapacitated facility location problem with user preferences / P. Hansen, Y. Kochetov, N. Mladenovi c′. Les Charies du GERAD G-2004-24, 2004.
17. Hoffman K. Solving airline crew scheduling problems by branch-and-cut / K. Hoffman, M. Padberg // Management Science. 1993. V. 39, N 6. P. 657–682.
18. IBM ILOG CPLEX. URL: http://www-01. ibm.com/software/integration/optimization/cplex
19. Nemhauser G.L. Integer and Combinatiorial Optimization. / G.L. Nemhauser, L.A. Wolsey. – New-York: A Wiley-Interscience Publication, 1999.
20. Pochet Y. Production Planning by Mixed Integer Programming / Y. Pochet, L.A. Wolsey. – New-York: Springer, 2006.
21. Waterer H. Savelsbergh M.W.P. The relation of time indexed formulations of single machine scheduling problems to the node packing problem / H. Waterer, E.L. Johnson, P. Nobili // Mathematical Programming. 2002. V. 93. P. 477–494.
22. Fair Isaac Corporation: Xpress Optimization Suite. URL:http://www.fico.com/

УДК 620.17

Лапшин Владимир Леонардович,
д. т. н., профессор, заведующий кафедрой сопротивления материалов и строительной механики Иркутского государственного технического университета, тел. 40-54-25, E-mail: lapshin@istu.irk.ru
Глухов Александр Владимирович,
соискатель Иркутского государственного технического университета. тел. 40-54-25, E-mail: lapshin@istu.irk.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ УДАРНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УПРУГО-ВЯЗКО-ПЛАСТИЧНОЙ МЕХАНОРЕОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

V.L. Lapshin, A.V. Gluhov

THE RESEARCH OF RESIDUAL DEFORMATIONS OF SHOCK INTERACTION PROCESS ELASTIC-VISCOUS-PLASTIC MECHANOREOLOGICAL MODEL

Аннотация. *Приводится математическое описание механореологической модели процесса ударного взаимодействия сферического тела с поверхностью, анализируется влияние упруго-пластических параметров модели на величину остаточных деформаций и высоту отскока модели. Приводится алгоритм расчета, на основе которого в результате компьютерного эксперимента получены уравнения регрессии, описывающие влияние рассматриваемых факторов на исследуемые параметры процесса ударного взаимодействия модели.*

Ключевые слова: *удар, сферическое тело, контактное взаимодействие тел, механореологическая модель.*

Abstract. *The mathematical description of mechanoreological model of process of a shock interaction of a spherical body with a surface is resulted, the influence of elastic – plastic parameters of a model on size of residual deformations and size springback of model is analyzed. The algorithm of analysis is resulted. As a result of computer experiment the regression equations are derived. They describe influence of the considered factors on researched parameters of process of shock interaction of model.*

Keywords: *shock, spherical body, contact interaction of the solids, mechanoreological model.*

При моделировании ударных процессов во многих случаях необходимо учитывать потери энергии, возникающие при взаимодействии тел.

Эти потери могут быть связаны как с диссипацией энергии при упругих деформациях, так и с протеканием необратимых процессов, например развитием остаточных (пластических) деформаций. С целью решения подобных задач была разработана упруго-вязко-пластичная механореологическая модель, имеющая в своем составе дополнительный элемент сдвига, позволяющий отдельно учитывать потери энергии при ударном взаимодействии, связанные с возникновением в материале остаточных (пластических) деформаций [1, 2].

Модель обеспечивает исследование основных закономерностей процесса ударного взаимодействия сферического тела и включает в себя два последовательных блока (рис. 1): упруго-вязкий блок $K_1 - C$ и упруго-пластический блок $K_2 - f_2$. Блок $K_1 - C$ описывает упругие деформации системы и учитывает возникающие при этом потери энергии с помощью демпфера C, сила сопротивления которого зависит от скорости и величины деформации. Сила сопротивления упруго-вязкой деформации определяется:

$$N_1 = F_{ДИС} + F_{УПР1}; F_{УПР1} = K_1(y_1 - y_2)^{n1};$$

$$F_{ДИС} = C(\dot{y}_1 - \dot{y}_2)^{a1}(y_1 - y_2)^{a2},$$

где: $y_1, y_2, \dot{y}_1, \dot{y}_2$ – перемещение и скорость массы m_1 и m_2; K_1 – коэффициент жесткости упругого элемента упруго-вязкого блока модели; C – коэффициент вязкости вязкого элемента упруго-вязкого блока модели.

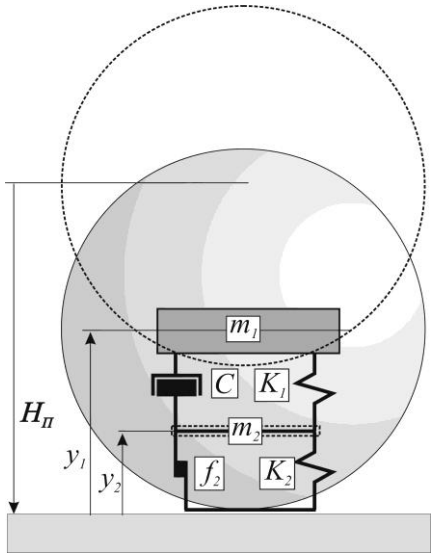


Рис. 1. Схема упруго-вязко-пластичной модели

Коэффициент жесткости упругого элемента модели K_1 связан со свойствами и параметрами сферического тела и свойствами исследуемой поверхности и рассчитывается по формуле [3]

$$K_1 = \frac{4}{3\pi}\sqrt{\frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)\left[\frac{1-\mu_1^2}{\pi E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{\pi E_2}\right]^2}},$$

где E_1, E_2 – модули упругости сферического тела и исследуемой поверхности; μ_1, μ_2 – коэффициенты Пуассона сферического тела и исследуемой поверхности; R_1, R_2 – радиусы кривизны сферического тела и исследуемой поверхности.

При исследовании процесса соударения сферического тела с плоской поверхностью для поверхности принимается условие $R_2 \to \infty$.

Блок $K_2 - f_2$ с нелинейным упругим элементом K_2 и нелинейным элементом сдвига f_2 описывает пластические деформации и учитывает возникающие при этом потери энергии. Установка элемента сдвига f_2 параллельно с упругим элементом K_2 обеспечивает более полное и эффективное моделирование такого явления, как упрочнение материала, которое характеризуется ростом усилия с увеличением пластической деформации. Сила сопротивления упруго-пластической деформации определяется:

$$N_2 = F_{ПЛ} + F_{УПР2};\ F_{УПР2} = K_2 y_2^{n2};\ F_{ПЛ} = f_2 y_2^{n3},$$

где K_2 – коэффициент жесткости упругого элемента упруго-пластического блока модели; f_2 – коэффициент сдвига упруго-пластического блока модели или коэффициент податливости материала.

Вся масса сферического тела сосредоточена в инерционном элементе m_1, масса элемента m_2 ничтожно мала ($m_2 \to 0$) и не оказывает заметного влияние на динамику движения системы. Она введена для удобства математического описания системы с помощью двух дифференциальных уравнений второго порядка.

Все элементы модели имеют нелинейные характеристики. Если говорить о конкретных значениях степенных показателей, то для упругой составляющей при ударном взаимодействии сферического тела следует принимать $n_1 = 3/2$ [3–5], пластическую составляющую можно приближенно принимать пропорциональной действующей силе ($n_3 = 1$) [4, 5]. Диссипативные сопротивления при исследовании колебательных и ударных процессов чаще всего принимаются пропорциональными скорости деформации ($a_1 = 1; a_2 = 0$).

Важным параметром упруго-вязкого блока модели является коэффициент демпфирования $\nu = n/P$ ($n = C/2m_1$; $P = \sqrt{K_1/m_1}$). Для абсолютно упругого удара $\nu = 0$. С увеличением ν потери энергии при упруго-вязком ударном взаимодействии модели увеличиваются, что соответствует уменьшению высоты отскока сферического тела от поверхности. Дифференциальные уравнения движения модели записываются следующим образом:

$$m_1\ddot{y}_1 + C_1(\dot{y}_1 - \dot{y}_2)^{a1}(y_1 - y_2)^{a2} + K_1(y_1 - y_2)^{n1} = -m_1 g; \quad (1)$$

$$m_2\ddot{y}_2 + K_2 y_2^{n2} + f_2 y_2^{n3} + C_1(\dot{y}_2 - \dot{y}_1)^{a1}(y_2 - y_1)^{a2} + K_1(y_2 - y_1)^{n1} = -m_2 g. \quad (2)$$

Сила ударного взаимодействия определяется:

$$N_1 = C(\dot{y}_1 - \dot{y}_2)^{a1}(y_1 - y_2)^{a2} + K_1(y_1 - y_2)^{n1}; \quad (3)$$

$$N_2 = K_2 y_2^{n2} + f_2 y_2^{n3};\ N_1 \approx N_2.$$

Решение системы уравнений осуществлялось численным методом Рунге – Кутта.

Разработанная математическая модель позволяет исследовать влияние упругих, вязких (диссипативных) и пластических свойств материала на динамику ударного взаимодействия сферического тела. На базе математической модели была разработана специальная исследовательская программа «УДАР». Она позволяет рассчитать параметры динамического взаимодействия сферического тела с образцом материала (время удара, силу ударного взаимодействия, величину и скорость деформации, высоту отскока тела). Укрупненный алгоритм расчета приводится на рис. 2:

1. Блок 1 формирует исходные данные.

2. Блок 2 производит расчет постоянных величин, входящих в математическую модель.

3. Блок 3 задает начальные условия для этапа ударного взаимодействия.

4. Блок 4 производит расчет скорости и величины деформации (полной $\dot{y}_1, y_1$, упругой $\dot{y}_1 - \dot{y}_2, y_1 - y_2$ и остаточной $\dot{y}_2, y_2$ составляющих), силы нормальной реакции N и определяет момент времени T_{Nmax}, когда сила N достигает максимального значения N_{max} (уравнения (1)–(3)).

5. Блок 5 определяет окончание этапа нагружения. Когда скорость нагружения становится равной нулю ($\dot{y}_1 = \ddot{y}_2 = 0$), динамическое усилие N и остаточная деформация y_2 достигают максимальных значений и наступает этап разгрузки модели. На данном этапе в работу вступает только упруго-вязкий блок модели, описывающий исчезновение только упругих деформаций. При этом упруго-пластический блок остается в деформированном состоянии, так как характеризует пластические (остаточные) деформации материала.

6. Блок 6 производит расчет скорости и величины деформации (упругой) на этапе разгрузки, силы нормальной реакции N (уравнения (1), (3)). Рассчитывается скорость и величина упругой деформации $\dot{y}_1, y_1$. Уравнение (2) не используется, при этом принимается $\dot{y}_2 = 0, y_2 = \text{const}$ (максимальное значение этапа нагружения).

7. Блок 7 определяет момент времени, когда сила N становится равной нулю (окончание этапа контактного взаимодействия, сферическое тело отскакивает на высоту H_0).

8. Блок 8 производит расчет выходных параметров процесса ударного взаимодействия.

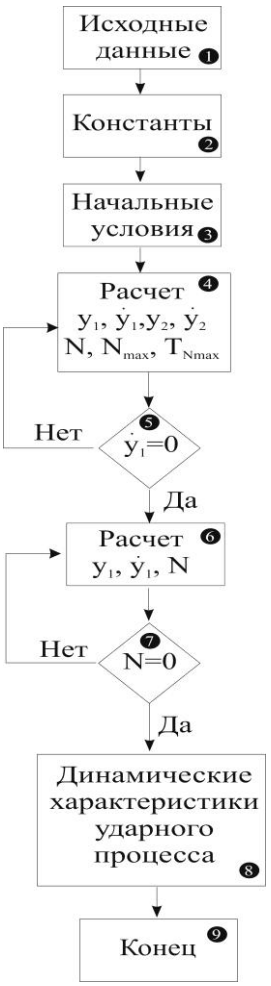


Рис. 2. Схема алгоритма

С целью изучения закономерностей поведения разработанной модели был выполнен комплекс компьютерных экспериментов. Исследовалось влияния упругих и пластических параметров модели на динамику ударного взаимодействия

с поверхностью путем проведения факторных экспериментов и получения уравнений регрессии, отражающих влияние рассматриваемых факторов на время удара, силу ударного взаимодействия, высоту отскока сферического тела, величину пластической деформации. Методика проведения компьютерных экспериментов была разработана на основе теории рационального планирования эксперимента.

При проведении вычислительных экспериментов был использован ортогональный центральный композиционный план. Плечо «звездных» точек принималось на уровне –1, +1 (центрированные звездные точки). Уравнение регрессии для трехфакторного эксперимента в общем виде выглядит следующим образом:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3.$$

Для расчета коэффициентов уравнений регрессии, проведения статистической оценки значимости коэффициентов с помощью критерия Стьюдента ($t_{кр}$) и проверке адекватности модели использовался программный комплекс «STATISTICA». Проверка адекватности моделей производилась по *F*-критерию (критерию Фишера) при уровне значимости $P = 0{,}05$.

В качестве исследуемых факторов рассматривались упругий параметр модели K_1 и коэффициенты K_2, f_2 (размерность МН/м^n). Диапазон изменения упругого параметра модели K_1 соответствовал диапазону изменения модуля упругости материала поверхности E_2 от 60000 МПа до 200000 МПа, что охватывает основные металлы, стали и сплавы.

В качестве сферического тела был принят стальной шарик с параметрами $E_1 = 2\times10^5$ МПа; $\mu_1 = 0{,}27$; $R_1 = 4{,}75$ мм. Высота падения составляла 30 мм, коэффициент Пуассона для поверхности принимался $\mu_2 = 0{,}27$, коэффициент демпфирования $\nu = 0{,}0004$. Показатели степени на модели принимались неизменными: $a_1 = 1$; $a_2 = 0$; $n_1 = 1{,}5$; $n_2 = 1{,}5$; $n_3 = 1$. Уровни факторов и интервалы их варьирования представлены в табл. 1. При выборе уровней варьирования факторов K_2 и f_2 использовались результаты предшествующих исследований.

Таблица 1

Уровни факторов и интервалы варьирования

Факторы	Кодовое обозначение	Уровни факторов		
		–1	0	+1
K_1	X_1	4000	7000	10000
K_2	X_2	400	5200	10000
f_2	X_3	10	55	100

В данной статье приводятся результаты экспериментов по определению высоты отскока сферического тела и по определению *dY*. В ходе исследования рассчитывалась относительная высота отскока $dH = H_0 / H_П$ (где H_0 – высота отскока, $H_П$ – высота падения) и полная деформация Y_{max} (y_1), состоящая из упругой $Y_{упр}$ ($y_1 - y_2$) и пластической $Y_{пл}$ (y_2) составляющих. Далее определялась величина $dY = Y_{пл} / Y_{\max}$, характеризующая величину пластической составляющей по отношению к полной деформации. Матрица планирования и результатов эксперимента представлена в табл. 2 (где dH и dY – параметры ударного взаимодействия модели; $d\hat{H}$ и $d\hat{Y}$ – параметры, рассчитанные по полученным уравнениям регрессии).

Таблица 2

Матрица планирования и результатов эксперимента

№	X_1	X_2	X_3	dH	$d\hat{H}$	dY	$d\hat{Y}$
	уровни факторов						
1	–1	–1	–1	0,414	0,428	0,523	0,510
2	–1	–1	1	0,815	0,819	0,123	0,117
3	–1	1	–1	0,661	0,656	0,297	0,301
4	–1	1	1	0,829	0,821	0,112	0,122
5	1	–1	–1	0,273	0,284	0,675	0,664
6	1	–1	1	0,706	0,712	0,221	0,215
7	1	1	–1	0,520	0,517	0,442	0,446
8	1	1	1	0,732	0,719	0,201	0,211
9	–1	0	0	0,757	0,752	0,179	0,182
10	1	0	0	0,629	0,629	0,301	0,303
11	0	–1	0	0,652	0,618	0,274	0,308
12	0	1	0	0,706	0,735	0,230	0,201
13	0	0	–1	0,498	0,481	0,458	0,473
14	0	0	1	0,765	0,777	0,169	0,159
15	0	0	0	0,683	0,688	0,249	0,245
16	0	0	0	0,683	0,688	0,249	0,245

В результате эксперимента и выполненных расчетов на ПК были получены коэффициенты уравнений регрессии. Их значения для кодированных значений факторов приводятся в табл. 3. Выделенные коэффициенты являются незначимыми, т. е. в рассматриваемом диапазоне значений они не оказывают существенного влияния. Статистический анализ показал, что полученные уравнения регрессии адекватны.

Для наглядности в качестве примера на рис. 3–8 приводятся диаграммы, характеризующие поверхность отклика функции (относительная высота отскока *dH*, относительная величина пластической деформации *dY*) в зависимости

от двух факторов. Величина третьего фактора принималась на среднем уровне значимости. Диаграммы построены с помощью программного комплекса «STATISTICA».

Таблица 3

Коэффициенты уравнения регрессии

	b_0	b_1	b_2	b_3
d H	0,688	–0,062	0,059	0,148
dY	0,245	0,061	–0,053	–0,157
		b_{11}	b_{22}	b_{33}
dH		0,002	–0,012	–0,059
dY		–0,002	0,001	0,071
		b_{12}	b_{13}	b_{23}
dH		0,001	0,009	–0,056
dY		–0,002	–0,014	0,053

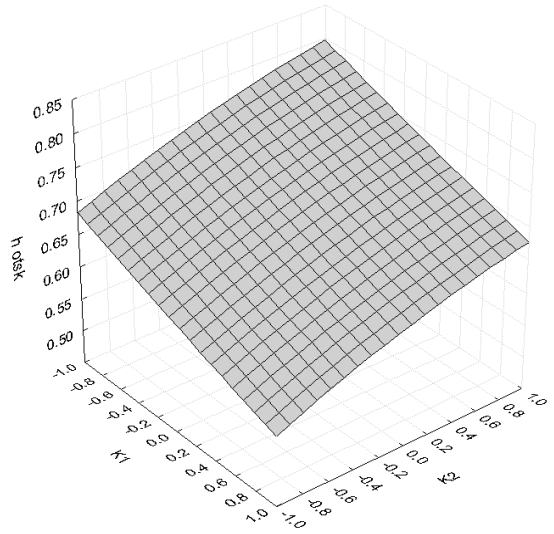


Рис. 3. Зависимость высоты отскока *dH* от факторов K_1 и K_2

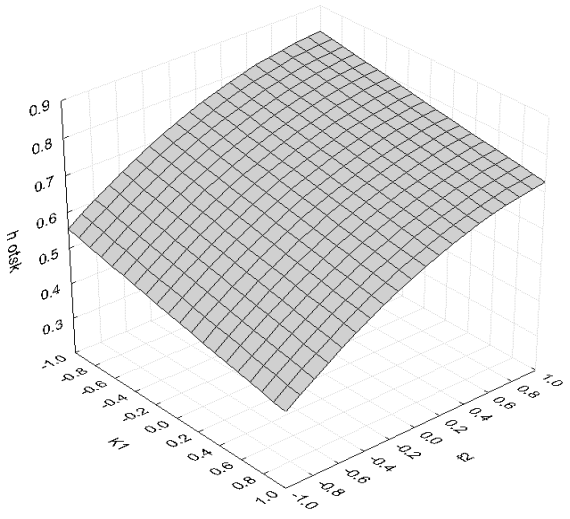


Рис. 4. Зависимость высоты отскока *dH* от факторов K_1 и f_2

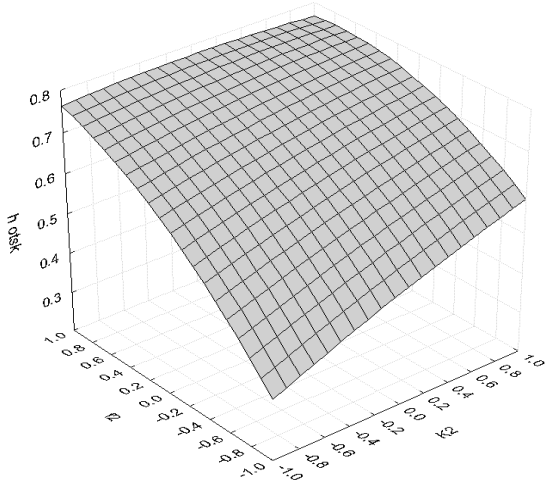


Рис. 5. Зависимость высоты отскока *dH* от факторов f_2 и K_2

Уменьшение значений факторов K_2, f_2 приводит к увеличению пластической деформации в связи со снижением упруго-пластических сопротивлений и уменьшению относительной высоты отскока модели, так как увеличиваются потери энергии ударного взаимодействия на пластические деформации. Увеличение K_1 приводит к увеличению пластической деформации и уменьшению высоты отскока, так как увеличивается жесткость упруго-вязкого блока модели.

Во всех экспериментах при достижении величиной фактора f_2 наибольших значений влияние фактора K_2 становится несущественным. Значимость факторов можно оценить по значениям коэффициентов уравнений регрессии. Следует также отметить, что рассмотренные закономерности характеризуются существенной нелинейностью.

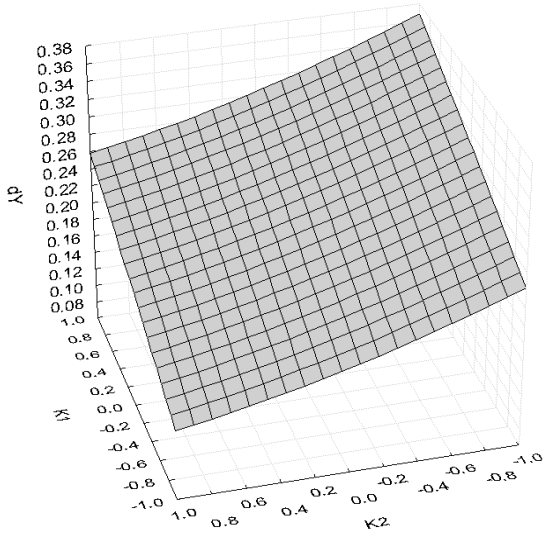


Рис. 6. Зависимость *dY* от факторов K_1 и K_2

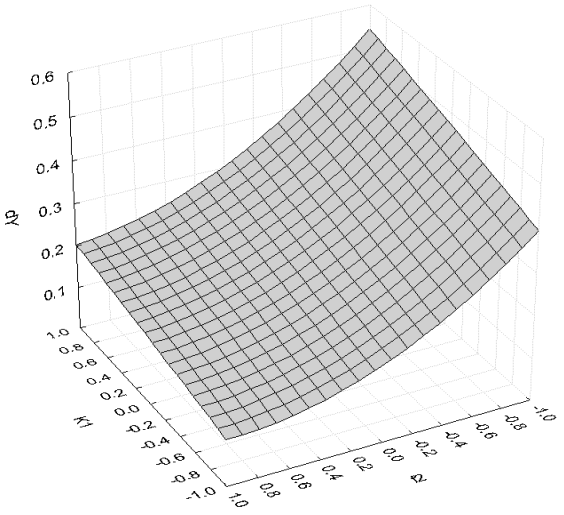


Рис. 7. Зависимость *dY* от факторов: f_2 и K_1

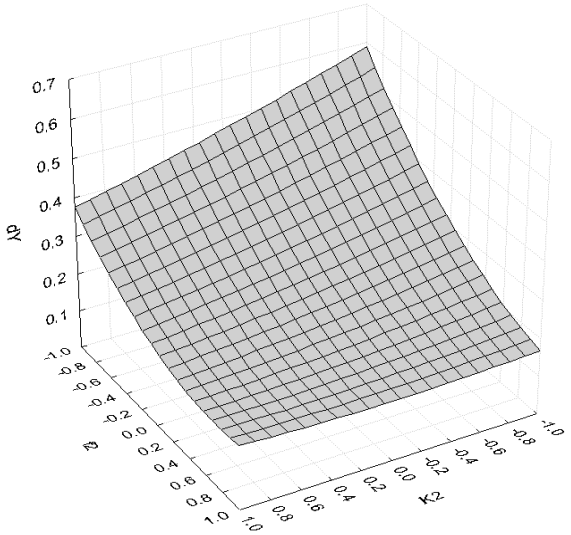


Рис. 8. Зависимость *dY* от факторов: f_2 и K_2

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лапшин В.Л. Упруго-вязко-пластичная механореологическая модель для оценки упруго-вязких свойств минералов при моделировании процессов вибросепарации / В. Л. Лапшин, Е. И. Демаков // Механика – XXI веку. VI Всероссийская науч.-техн. конф. с международным участием: сб. докладов. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2007. – С. 67–71.
2. Лапшин В.Л. Моделирование упруго-пластического взаимодействия сферического тела с плоской поверхностью при ударе [Текст] / В. Л. Лапшин, Е. И. Демаков // Материалы XI Международной науч. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева (6–10 нояб. 2007, г. Красноярск) / под общ. ред. И.В. Ковалева; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2007. – С. 240–241.
3. Лапшин В.Л. Исследовательская модель процесса ударного взаимодействия сферического тела с плоской поверхностью рудного материала / В.Л. Лапшин, В.П. Ященко, А.В. Рудых // Вестник ИРГТУ. – 2006. – №2(26). – С. 110–115.
4. Батуев Г.С., Голубков Ю.В., Ефремов А.К., Федосов А.А. Инженерные методы исследования ударных процессов. – М. : Машиностроение. – 1977. – 240 с.
5. Кильчевский Н.А. Динамическое контактное сжатие твердых тел. Удар. – Киев: Наукова думка. – 1976. – 319 с.

УДК 629.4.015 + 625.1.03

Зеньков Евгений Вячеславович,
аспирант, Национальный Исследовательский Иркутский государственный технический университет, e-mail: jovanny1@yandex.ru
Цвик Лев Беркович,
д.т.н., профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: tsvik_l@mail.ru
Кулешов Алексей Владимирович,
старший преподаватель, Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: alex_kul@bk.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЯГКОГО ВИДА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ УЗЛОВ НА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЛАБОРАТОРНЫХ ОБРАЗЦАХ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ

E.V. Zenkov. L.B. Tsvik, A.V. Kuleshov

MODELLING THE SOFT KIND OF MODE OF DEFORMATION OF THE CONSTRUCTIVE UNITS ON THE CYLINDRICAL LABORATORY BENCHMARKS WITH CONCENTRATORS OF STRESS

Аннотация. *Рассматриваются лабораторные образцы, моделирующие напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкций. Анализируется НДС некоторых высоконагруженных конструктивных узлов, характеризуемых мягким видом этого состояния. Описывается лабораторный образец, моделирующий вид НДС рассмотренных конструктивных узлов с учётом этого фактора.*

***Ключевые слова*:** *конструктивный узел, вид напряженного состояния, лабораторный образец, метод конечных элементов, испытания на прочность в условиях циклического нагружения.*

Abstract. *The laboratory benchmarks modelling of kind of the mode of deformation of constructions are considered. The mode of deformation of some very loaded constructive knots characterised by a soft kind of mode is analyzed. The laboratory benchmark modelling a kind of the mode of deformation considered constructive knots with the account of this factor is described.*

Keywords: *constructive knot, stiffness coefficient of stress, computing experiment, laboratory benchmark, finite element method.*

Одной из проблем, возникающих при экспериментальном исследовании сопротивления усталостному разрушению в лабораторных условиях, является трудность создания в соответствующих лабораторных образцах мягкого напряженно-деформированного состояния (НДС), характеризуемого отрицательными значениями величины $П$ [1], равный отношению первого инварианта тензора напряжений к интенсивности напряжений σ_i [2]

$$П = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i}, \qquad (1)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения, возникающие в точке наблюдения; σ_i – эквивалентное напряжение, определяемое формулой

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}\ . \qquad (2)$$

Мягкий вид НДС (далее под мягким понимается НДС, характеризуемое значительной отрицательной величиной одного или нескольких главных напряжений) характерен для ряда конструктивных элементов высоконагруженных конструкций. В частности, кромок отверстий в стенках сосудов высокого давления, в посадках с натягом, например в зоне контакта колеса и оси колёсной пары железнодорожного вагона или контакта тела качения с сопрягаемыми кольцами соответствующего подшипника, при контактном силовом взаимодействии элементов конструкций, в некоторых типах опор и в ряде других случаев.

Влияние вида НДС на прочность различных конструкций, работающих в условиях статического нагружения, достаточно полно рассмотрено, например, в работе [1]. В [1] показано, что со сни-

жением коэффициента жесткости *П* ресурс пластичности материала конструкции и его прочность существенно повышаются.

Влияние жесткости схемы НС на прочность конструктивных узлов, работающих в условиях циклического нагружения, в настоящее время изучено существенно менее полно. В немногочисленных работах, в частности [3–4], освещающие данную проблему, выявлено, что увеличение коэффициента жёсткости вида НДС в некоторой зоне конструкции может привести к тому, что очаг разрушения перемещается в эту зону, несмотря на то, что уровень напряжений в ней не является максимальным для конструкции в целом [3]. Существенно зависит от параметра *П* и значение предела выносливости материала.

Проведенные в работе [4] циклические испытания до разрушения подтвердили зависимость ресурса рассматриваемых трубчатых конструкций не только от уровня, но и от характера возникающих в них напряжений (вида НДС). В частности, в работе [4] отмечено, что сжимающее (мягкий вид НДС) напряженное состояние способствует увеличению срока эксплуатации рассматриваемых конструкций за счет нормальных напряжений, которые в рассмотренном эксперименте проявляют эффект «залечивания» образующихся дефектов, а при растягивающем (жесткий вид НДС) напряженном состоянии, наоборот, способствуют росту дефектов и, соответственно, уменьшению срока эксплуатации оборудования.

Использование критериев прочности, предложенных в работах [1–2] и основанных на коэффициенте вида НДС, представляется обоснованным и позволяет повысить точность расчетной оценки усталостной прочности различных конструктивных узлов. Входящие в формулу (1) абсолютные значения величин главных напряжений σ_1, σ_2, σ_3, образующихся в зоне концентрации, а также соотношение их знаков, определяют значение коэффициента жесткости *П*.

Рассмотрим НДС образцов, позволяющих в лабораторных условиях воспроизводить НДС мягкого вида [5]. Знание вида НДС в конструктивных узлах, выявленного, например, на начальных этапах проектирования конструкции с помощью метода конечных элементов, позволяет при этом осуществить обоснованный выбор основных геометрических размеров лабораторного образца [6] для экспериментального изучения соответствующей конструкции.

Одним из критериев подобия лабораторного образца и оцениваемой конструкции является значение коэффициента *П*. Возможность переноса результатов, полученных при испытании лабораторных образцов с определенными значениями величин интенсивности напряжений σ_i и жесткости *П*, на оценку прочности конструкции произвольной формы определяется тем, что в соотношения (1) и (2) входят только инварианты анализируемого НДС – величины σ_1, σ_2, σ_3.

Отметим тот факт, что действующие нормы оценки ресурса усталостной прочности [1] ориентируются только на два инварианта – интенсивность напряжений и коэффициент асимметрии цикла. Возникает необходимость уточненного расчета ресурса усталостной прочности конструкции с учетом значений всех трёх инвариантов тензора напряжений в очаге возможного разрушения конструкции. Например, с учётом значения всех трёх главных напряжений анализируемого НДС.

Наиболее остро отмеченная проблема возникает в тех случаях, когда проведение натурных экспериментов с испытанием конструктивных узлов или элементов конструкции до разрушения связано с затратой значительных финансовых и временных ресурсов. В этих случаях предварительные прочностные исследования описываемых образцов для прочностных испытаний в условиях циклического нагружения [6] в лабораторных условиях могут существенно снизить требования к указанным ресурсам.

Рассмотрим моделирование НДС некоторых конструктивных узлов, в зоне концентрации напряжений которых возникает мягкий вид НДС. В частности, практический интерес вызывает НС, характерное для внутренних кромок патрубковых зон сосудов, работающих под давлением (рис. 1). Рабочий диапазон внутреннего избыточного давления *p* при эксплуатации сосудов изменяется в широких пределах, начиная с сотых и десятых долей МПа до нескольких сотен МПа.

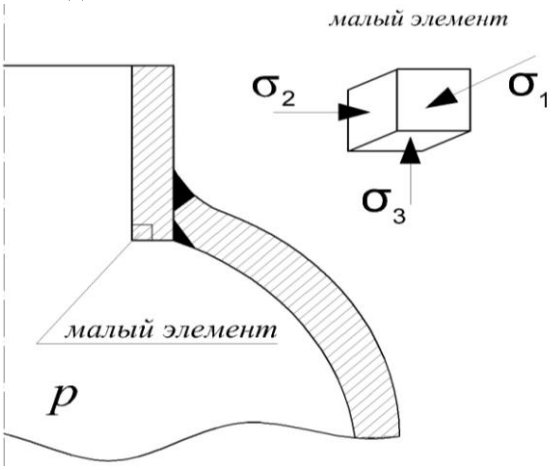


Рис. 1. Поперечное сечение патрубка сосуда

Выделим в рассматриваемой зоне кромки отверстия ее небольшую область в виде малого элемента, изображенного на рис. 1. Приближённо величина *П* может быть оценена в зависимости от величины внутреннего давления в сосуде *p*.

Эквивалентное напряжение для малого призматического элемента, представленного на рис. 1, определяется формулой (2). В рассматриваемом случае выполняются равенства

$$\sigma_2 = -p,\ \sigma_3 = -p,$$

а величина σ_1 – пока неизвестная величина окружного напряжения. Выражение величины σ_i упростим, подставив в выражение (2) известные значения σ_2, σ_3:

$$2\sigma_i^2 = (\sigma_1 + p)^2 + (\sigma_1 + p)^2. \quad (3)$$

Отсюда следует равенство

$$\sigma_1 = \sigma_i - p. \quad (4)$$

Для величины *П* при этом получаем

$$П = 1 - \frac{3p}{\sigma_i}. \quad (5)$$

Приближённо примем, что допускаемые напряжения для материала патрубка равны допускаемым напряжениям при циклическом нагружении материала, из которого изготовлен сосуд давления (например, широко применяемой для этих целей стали 09Г2С). Внеся соответствующее значение σ_i в формулу (5), получим зависимость коэффициента жесткости *П* от внутреннего давления в сосуде. Соответствующие результаты расчетов представлены на рис. 2.

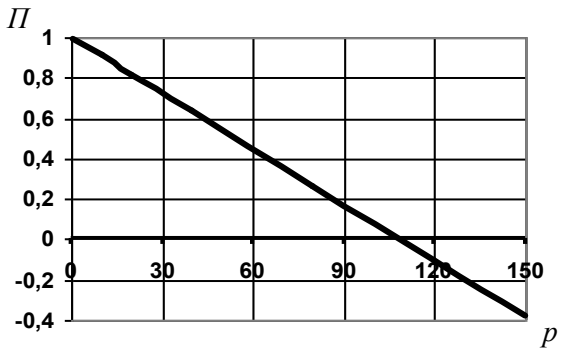


Рис. 2. Зависимость жесткости *П* на внутренней кромке патрубка сосуда от действия внутреннего давления *p*

Из полученной зависимости следует, что с увеличением расчётного давления НДС сосуда на внутренней кромке патрубка становится всё более мягким и при давлении в сосуде более 110 МПа величина *П* в зоне кромки характеризуется отрицательным значением, достигающим в рассмотренном диапазоне давлений значения *П* = –0,4. Наибольшие значения *П* соответствуют жесткой схеме НС в рассматриваемой зоне. При этом величина *П* равна единице и соответствует относительно небольшим величинам расчётного внутреннего давления в сосуде.

Существенное практическое значение имеет расчётная оценка ресурса работоспособности подшипников качения. В связи с этим представляет интерес рассмотрение особенностей НДС контактного взаимодействия сферического упругого тела и соответствующего опорного элемента. Известное решение задачи о контакте выпуклых тел (задачи Герца [7]) может рассматриваться в этом случае как модельное, что позволяет оценить погрешность приближённых численных методик, используемых ниже и основанных на использовании метода конечных элементов (МКЭ). Соответствующее численное моделирование выполнялось с помощью программного комплекса MSC/NASTRAN, реализующего этот метод (рис. 3).

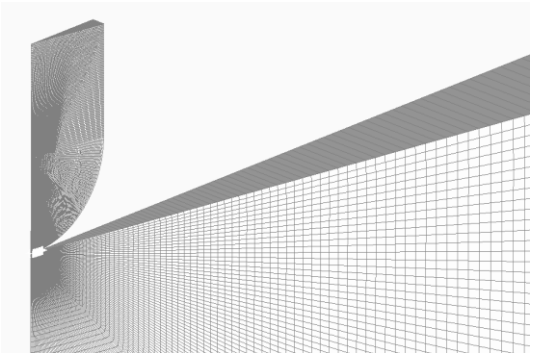


Рис. 3. Конечно-элементная модель контакта сферического тела и упругого полупространства

В процессе моделирования рассматривалась осесимметричная задача контакта двух тел с заданием соответствующих граничных условий. Анализ НДС, возникающего в зоне контакта сферического упругого тела и упругого полупространства, показал, что на поверхности контактирующих тел коэффициент жесткости *П* принимает большие отрицательные значения. Так, для упругого индентора со сферической зоной контакта, соприкасающейся с упругим полупространством (механические свойства обоих тел соответствуют свойствам конструкционной стали), имеющей радиус 6 мм, величина *П* в центре пятна контакта близка к –10. При этом в зоне максимального уровня эквивалентных напряжений σ_i, находящейся под поверхностью контактирующих тел на расстоянии 0,16 мм, коэффициент *П* равен –1,8 (рис. 4).

Представляют интерес и особенности взаимодействие элементов роликового подшипника качения. При контактном силовом взаимодействии элементов подшипника качения (ролика и наруж-

ного и внутреннего колец) эти элементы испытывают высокие сжимающие напряжения, что и определяет ресурс работы подшипника.

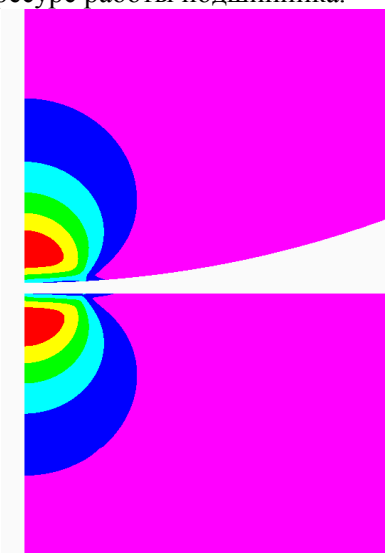


Рис. 4. НДС зоны контакта индентора и упругого полупространства

Для анализа величины $П$, возникающего НДС элементов подшипника было осуществлено конечно-элементное моделирование контактного взаимодействия цилиндрического ролика с внутренним и наружным цилиндрическими кольцами подшипника. Схематически рассматриваемый узел представлен на рис. 5.

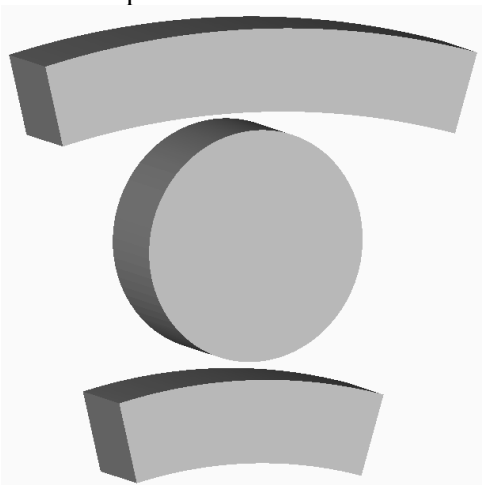


Рис. 5. Геометрическая модель контакта ролика с опорными кольцами подшипника

При моделировании НДС его элементов было использована дискретизация, содержащая 424000 узлов сетки, 2100 контактных GAP-элементов [9]. При использовании для выполнения соответствующих расчётов персонального компьютера с тактовой частотой двухъядерного процессора 3 гигагерца и оперативной памятью 2 гигабайта время работы процессора составило около 15 часов. Результат моделируемого НДС представлен на рис. 6.

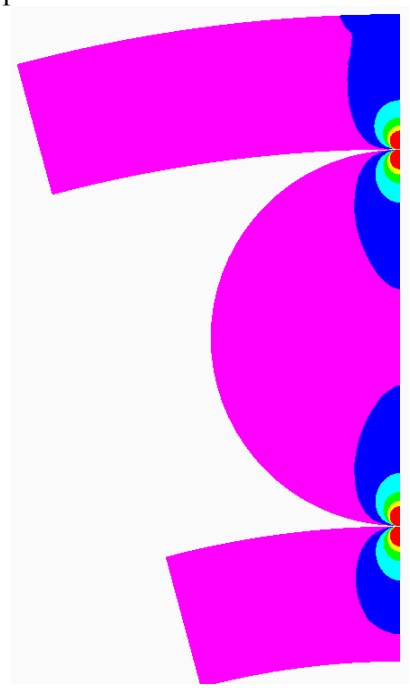


Рис. 6. НДС контактного взаимодействия ролика с опорными кольцами подшипника

Величина жесткости $П$ в зоне максимального уровня эквивалентных напряжений σ_i, находящейся под поверхностью контактирующих тел на расстоянии 0,04 мм, близка к значению $П = -2{,}4$. При этом в зоне контактирующих тел, на поверхности контакта ролика с нижним опорным кольцом, величина жесткости $П$ близка к –3,5. Полученный результат показывает, что НДС в зоне очага зарождения усталостных трещин в случае контакта цилиндрического тела качения с опорой более мягкое (для внутреннего и наружного колец подшипника $П \cong -2{,}4$), чем в случае контакта сферического тела качения и его опоры ($П \cong -1{,}8$). Следует отметить также, что в случае сферического тела качения в точке его контакта с поверхностью опоры напряжённое состояние существенно более мягкое ($П = -10$), чем в аналогичной точке контакта роликового тела качения с прямолинейной образующей и его опоры ($П = -3{,}5$). Указанные особенности вида НДС в рассмотренных подшипниках может определять и характер нарушения их работоспособности – к появлению шелушения, рифлёности, выкрашивания, растрескивания и т. п. дефектов.

Проблема моделирования усталостных процессов, происходящих в конструктивных узлах, в которых воспроизводится мягкий вид НДС, в ряде случаев может быть решена с помощью испытания до разрушения образцов цилиндрическо-

го типа. На рис. 7 представлена конструктивная схема предлагаемого образца, который позволяет моделировать НС рассмотренных конструктивных узлов. В рабочей его зоне моделируется необходимый вид НДС при определенном сочетании конструктивных его параметров [5].

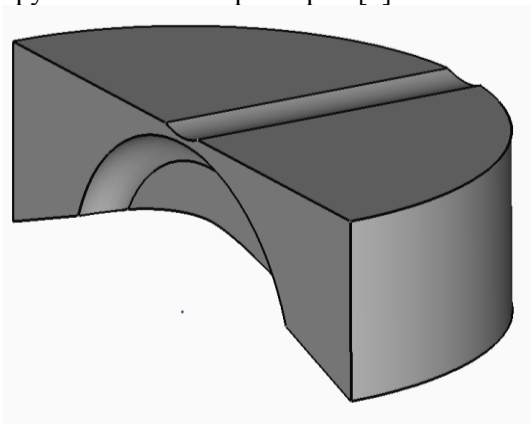


Рис. 7. Конструктивная схема лабораторного образца цилиндрического типа (вид половины образца)

Конструкция рассматриваемого образца представляет собой цилиндрическое тело с концентраторами напряжений, имеющими вид U-образных канавок, выполненных на его взаимно противоположных поверхностях. Существенно, что образец имеет две плоскости симметрии, расположенные под прямым углом друг к другу и являющиеся одновременно и плоскостями симметрии канавок-концентраторов напряжений.

Характерной особенностью рассматриваемого образца является то, что на одной из поверхностей (нижняя поверхность на рис. 8; на этом рисунке представлена четвёртая часть цилиндрического образца, НДС которого имеет две взаимноперпендикулярные плоскости симметрии) выполнена коническая выемка. Нагружение образца в вычислительном эксперименте осуществлялось приложением к центральной части его верхней (на рис. 7) поверхности некоторого постоянного давления. U-образная канавка на нагружаемой части образца имела прямолинейную образующую (верхняя канавка на рис. 7). Опорная нижняя поверхность образца имела кольцевую U-образную в поперечном сечении канавку. Опирание образца осуществлялось в процессе моделирования по нижней кромке его цилиндрической наружной поверхности.

Конструкция образца является симметричной относительно плоскостей симметрии U-образных канавок. По результатам численного моделирования НДС представленного образца определялось значение величины Π в точке наблюдения рабочей зоне образца. При проведении исследований в качестве точки наблюдения выбиралась точка на пересечении плоскостей симметрии рассматриваемого образца на поверхности кольцевой канавки (на рис. 7 эта точка является нижней на перемычке между двумя поверхностями U-образных канавок).

Как показали вычислительные эксперименты, именно в этой точке в образцах рассматриваемого типа уровень интенсивности напряжений максимален. При этом специальная система тестов, разработанная в [8] для плоскоцилиндрических образцов рассматриваемого типа, позволила оценить погрешность МКЭ для использованных в процессе счёта дискретных моделей. Использованная при этом степень дискретизации исследуемого тела позволила снизить максимальную вычислительную погрешность определения всех компонент напряжений до 5 % [8].

На рис. 8 схематически представлен результат соответствующего численного решения для эквивалентных напряжений σ_i.

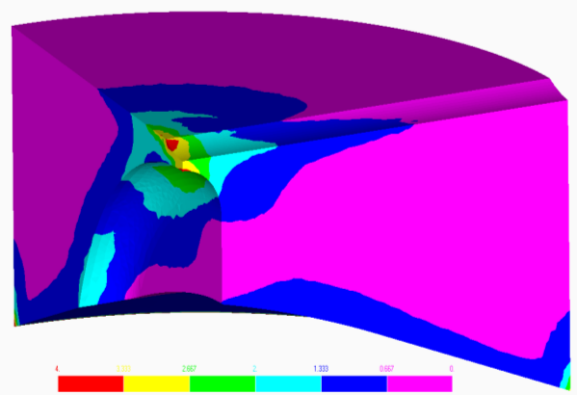


Рис. 8. НДС четверти образца

Результаты расчётов показали, что максимальный уровень эквивалентных напряжений в рассматриваемом случае возникает в точке наблюдения. Конструктивные параметры образца были подобраны так, чтобы величина Π в точке наблюдения была отрицательной и равна –1,8.

Отметим, что уровень напряжений в зоне приложения к образцу поперечной нагрузки также относительно высок. Но величина его может быть снижена распределением поперечной нагрузки по большей площади, а вид НДС образца, возникающего непосредственно под нагрузкой, существенно более мягок, чем в рабочей зоне образца вблизи точки наблюдения. Это обстоятельство позволяет предположить, что при испытании образца циклически изменяющейся нагрузкой очаг его усталостного разрушения будет находиться в рабо-

чей зоне образца.

Полученные численные результаты моделирования НДС цилиндрических образцов с U-образными канавками позволяют сделать вывод, что с их помощью может быть осуществлено моделирование не только уровня напряжений различных конструкций, но и моделирование возникающего в них мягкого вида НДС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник. – М.: «Машиностроение». – 1985. – 224 с.
2. Смирнов-Аляев Г.А. Механические основы пластической обработки металлов. Инженерные методы. – Л.: «Машиностроение», Ленинград. – 1968. – 272 с.
3. Цвик Л.Б., Пимштейн П.Г, Борсук Е.Г. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния многослойного цилиндра с монолитным вводом. //Проблемы прочности. – 1978. – № 4. – С.74–77.
4. Гагарин Ю.А., Пичков С.Н. Исследование поведения дефектов в полях растягивающих и сжимающих напряжений. // Проблемы прочности и пластичности. Межвузовский сборник. – Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2000. – С. 11 – 116.
5. Цвик Л.Б., Зеньков Е.В., Пыхалов А.А. Влияние геометрических параметров плоскоцилиндрических образцов с концентраторами напряжений на вид их напряженно-деформированного состояния. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2011. – Вып. №3(31). – С. 35–42.
6. Описание изобретения к патенту РФ № 2360227 на «Образец для оценки прочности материала при сложном напряженном состоянии». МПК G01N3/08.//Цвик Л.Б., Пыхалов А.А., Храменок М.А. и др. Опубл. 27.06.2009 г. Бюл. № 18.
7. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – М.: Наука, 1979. – 582 с.
8. Зеньков Е.В., Цвик Л.Б., Пыхалов А.А. Дискретное моделирование напряжённо-деформированного состояния плоскоцилиндрических образцов с концентраторами напряжений в виде канавок. // Вестник ИрГТУ. – №7(54), 2011 – С. 23–31.
9. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows. М.: ДМК Пресс, 2003, 448 с.

УДК 621.365

Филиппенко Николай Григорьевич,
ст. преподаватель каф. ТРТСиМ ИрГУПС, Иркутск, тел.: 638395-149, e-mail: ifpister@gmail.com
Каргапольцев Сергей Константинович,
д. т. н., профессор, каф. ТРТСиМ ИрГУПС, г. Иркутск, тел: 638395-362,
Лившиц Александр Валерьевич,
к. т. н., доцент, зав. каф. ТРТСиМ ИрГУПС, Иркутск, тел.: 638395-362, e-mail: livnet@list.ru

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ОБРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

N.G. Filippenko, S.K. Kargapolcev, A.V.Livchitc

IMPROVING OF EFFECTIVE PROCESSING BY HIGH-FREQUENCY CURRENTS OF POLYMERS

Аннотация. *В статье рассмотрены основные направления совершенствования технологического процесса высокочастотной обработки полимерных материалов. Предложена методика построения системы управления, основанная на новых, ранее не учитываемых явлениях частичных разрядов. Предложена блок-схема автоматизации, не вносящая изменений в существующие схемы и конструкции высокочастотного оборудования.*

Ключевые слова: *автоматизированная система управления, высокочастотный нагрев, автоматизация электротермическая обработка.*

Abstract. *In the article, the main directions of perfecting of technological process of high-frequency processing of dielectric materials are considered. The technique of construction of a control system based because of new, before the partial categories, not taken into account the phenomena is offered. The scheme of automation not introducing of modifications of the*

existing schemes and constructions highly of frequent equipment is offered.

Keywords: *automated control system, high-frequency heat, automation electrothermal processing.*

Последние десятилетия в ряде отраслей промышленности все большее применение стали находить полимерные материалы.

Коррозионная стойкость, малое водопоглощение, высокая удельная прочность, антимагнитные свойства и технологичность позволяют использовать эти материалы взамен цветных металлов, нержавеющих сталей и других конструкционных материалов.

В связи с этим возрастающий объем и ассортимент производства деталей из полимеров требует дальнейшего совершенствования существующих технологических процессов их изготовления.

В настоящее время к наиболее прогрессивным технологиям изготовления деталей из полимерных материалов следует отнести технологии, связанные с обработкой токами высокой частоты (ВЧ), как ресурсо- и энергосберегающие. В отличие от традиционных технологий с внешним подводом тепла, таких как конвекционное, тепловое излучение, ВЧ-электротермия обладает целым рядом преимуществ:

- избирательность воздействия (наиболее сильно нагреваются компоненты материала, обладающие наибольшими диэлектрическими потерями);
- быстрый и управляемый прогрев материала в объеме вне зависимости от его геометрических размеров, формы и коэффициента теплопроводности;
- безынерционность (отсутствие тепловой инерции нагревателя);
- отсутствие контакта обрабатываемого материала с теплоносителем;
- возможность концентрации высоких энергий в больших объемах.

В то же время, в ходе реализации ВЧ-обработки возникает ряд проблем, вызванных изменениями свойств полимерных материалов в процессе их транспортировки, хранения и эксплуатации. Все это приводит к затруднениям в обеспечении эффективности технологических процессов и решении вопросов их автоматизации.

Прежде всего это проявляется в непостоянстве электрофизических показателей полимеров, а именно: тангенса угла потерь, электропроводности, диэлектрической проницаемости, – что приводит к необходимости изменения мощности ВЧ-воздействия при переходе от материала к материалу. Измерение параметров непосредственно в зоне действия ВЧ-излучения невозможно, поэтому в работах [1, 2] предлагается решать данную проблему, рассчитывая время нагрева по прогнозируемой температуре в зоне обработки. При этом расчет производится для каждого материала отдельно, с целым рядом допущений, что снижает ценность их методики применительно к производственным условиям. В работе [3] контроль параметров ВЧ-обработки ведется на основе визуального наблюдения за состоянием обрабатываемого изделия (деструкция, изменение цвета). До практического применения предлагаемые выше решения достаточно далеки.

Имеющиеся на сегодняшний день разработки не предусматривают возможности в случае аварийной ситуации (пробойных токов) сохранить от повреждения обрабатываемые изделия и дорогостоящие электроды. Это является одним из основных факторов, сдерживающих широкое промышленное использование ВЧ-установок. Также немаловажно, что эти автоматизированные системы при монтаже требуют практически полного переоснащения имеющегося на производстве ВЧ-оборудования, что отрицательно влияет на процессы их внедрения.

Для устранения данных недостатков авторы предлагают контролировать процесс обработки посредством измерения скорости изменение анодного тока ВЧ-генератора и динамики возникновения, ранее не учитываемых частичных разрядов (ЧР), возникающих на поверхности обрабатываемых материалов. ЧР являются чувствительной характеристикой электрофизического состояния полимеров [4]. Они проявляются в виде искровых разрядов на различных частях изделия. Измерение импульсов ЧР позволяет с высокой достоверностью обнаружить механизм предпробойного состояния на самых ранних стадиях его проявления. В связи с этим можно сделать вывод, что анализируя динамику ЧР, можно контролировать процесс развития пробоя во времени.

На рис. 1 представлена вольт-амперная характеристика пробоя полимерных материалов [5].

Данная особенность полимеров была взята за основу автоматизации процесса управления ВЧ-устройством с защитой от токов пробоя.

Расчет скорости увеличения анодного тока можно вычислить как разность мгновенных значений тока:

$$\frac{I_n}{\tau_n} - \frac{I_{n-1}}{\tau_{n-1}} \le K, \qquad (1)$$

где I_n, I_{n-1} – мгновенное значение тока, А;
τ_n, τ_{n-1}, – мгновенное значение времени, сек;
K – коэффициент линейности.

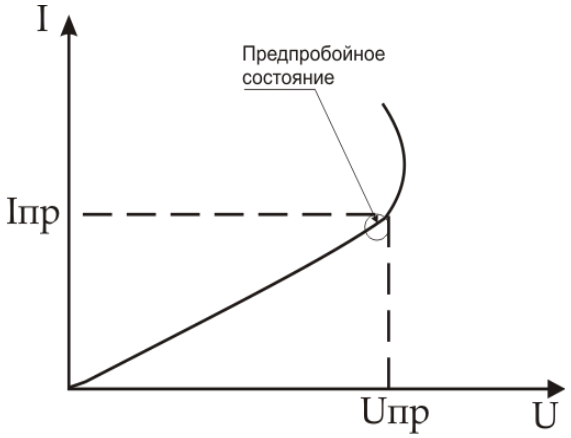


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика пробоя полимерных материалов

K в свою очередь рассчитывается по формуле

$$K = V / T, \quad (2)$$

где T – периодичность измеряемых данных, сек; V – линейная скорость регулирования, А/сек.

Линейную скорость регулирования можно рассчитать по формуле

$$V = (I_{ном} - I_{хол}) / \tau_{рег}, \quad (3)$$

где $I_{ном}$ – ток номинальный, А;

$I_{хол}$ – ток холостого хода, А;

$\tau_{рег}$ – время регулирования анодного тока до номинального значения.

На рис. 2 изображена предлагаемая структурная схема блока автоматизации устройства ВЧ-термообработки полимерных материалов. Работа блока осуществляется следующим образом: одновременно с включением высокочастотного генератора включаются блок управления и блок автоматизации. Линейный датчик Холла измеряет анодный ток высокочастотного генератора (АТВЧ), а акустические датчики регистрируют частичные разряды (ЧР), возникающие на полимере в процессе ВЧ-обработки. Данные по АТВЧ и ЧР передаются в вычислительное устройство микроконтроллера, собранного на базе процессора «Мега» [6]. Микроконтроллер с определенной частотой производит расчет величины изменения анодного тока и количества частичных разрядов. По интенсивности изменения контролируемых показателей можно определить электрофизическое состояние обрабатываемого полимера, а именно его предпробойное состояние. Характерным показателем пробоя является резкое возрастанием тока с отступлением от закона Ома в сторону увеличения проводимости [7], [8]. В случае обнаружении вычислительным устройством отклонения от линейной зависимости скорости возрастания анодного тока микроконтроллером подается команда исполнительному механизму на уменьшения напряженности поля до величины, соответствующей нормальному режиму термообработки. Если регистрация ЧР по динамике превышает пороговое значение, определяемое экспериментально для группы материалов, микроконтроллером также подается команда на уменьшение ВЧ-воздействия. Для защиты электрооборудования установки и предотвращения ложных срабатываний все блоки и кабельные линии защищены коаксиальной и экранирующей защитой.

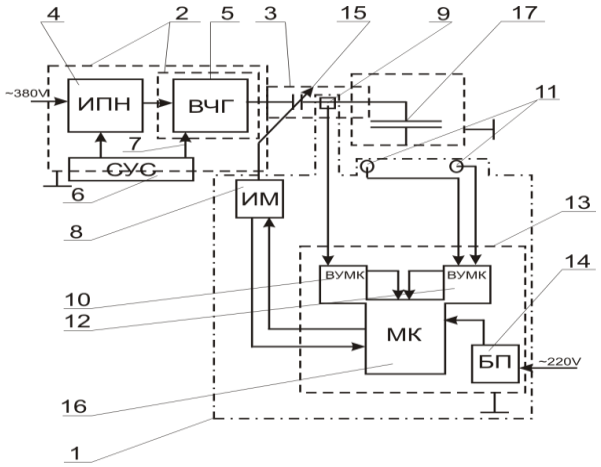


Рис. 2. Структурная схема блока автоматизации устройства ВЧ-термообработки полимерных материалов: 1 – блок автоматизации, 2 – экранирующий корпус, 3 – коаксиальный кабель, 4 – источник постоянного напряжения, 5 – высокочастотный генератор, 6 – система управления сигнализацией, 7 – цепь управления генератором, 8 – исполнительный механизм, 9 – линейный токовый датчик, 10 – вычислительное устройство, 11 – акустические датчики регистрации частичных разрядов, 12 – вычислительное устройство, 13 – помехозащищенный корпус, 14 – блок питания, 15 – переменный конденсатор, 16 – микроконтроллер, 17 – рабочий конденсатор

На примере ВЧ-устройства «УЗП 2500» был произведен расчет и получена линейная зависимость возрастания анодного тока, которую и использовали в ВУМК.

Расчет производили исходя из следующих данных:

1. Номинальный анодный ток $I_{ном} = 0{,}9$ А.
2. Ток холостого хода $I_{хол} = 0{,}2$ А.
3. Время регулирования до номинального тока $\tau_{рег} = 7$ сек.
4. Периодичность предоставления данных $T = 2000$.

Подставив значения в формулу (3), получили

$$V = (0{,}9 - 0{,}2) / 7 = 0{,}1 \text{ А/сек.} \quad (4)$$

По формуле (2) вычислили значения K

$$K = 0,1/2000 = 0,00005\ A. \quad (5)$$

Таким образом, был получен коэффициент линейной зависимости возрастания анодного тока, который и используем в ВУМК в соответствии с формулой (1).

Алгоритм работы вычислительного устройства ВУМК заключается в следующем: если разница значений текущего и предыдущего мгновенных токов окажется больше полученного значения K, вычислительное устройство обнаружит отклонение скорости анодного тока от линейной зависимости. В этом случае микроконтроллер подает исполнительному механизму команду на снижение мощности ВЧ-генератора до величины, соответствующей нормальному режиму термообработки, согласно формуле (1).

Для обнаружения предпробойного состояния в конструкцию блока включены акустические датчики частичных разрядов, что позволяет исключить влияние индустриальных и естественных электромагнитных полей, затрудняющих проведение регистрации ЧР.

Данные экспериментальных исследований частичных разрядов, возникающих при обработке полиамида марки «Армамид ПА СВ 30-1ЭТМ», показаны на рис. 3, где представлена фонограмма ЧР, при воздействии ВЧ-поля с частотой 27,12 МГц. Графическое отображение полученных данных рис. 4 показывает динамику возникновения ЧР в процессе ВЧ-обработки.

Сравнительный анализ рис. 3 и рис. 4 позволяет сделать вывод, что пробою предшествуют ЧР в достаточно большом временном интервале. Для упрощения расчетов за допустимый промежуток времени между ЧР $\tau_{чр}$ принимаем среднеарифметическое значение межразрядных интервалов. У полимеров марки «Армамид ПА СВ 30-1ЭТМ» это значение составляет 0,2 сек.

Исходя из полученного значения, введенная в ВУМК программа рассчитывает $\tau_{чр}$ по формуле

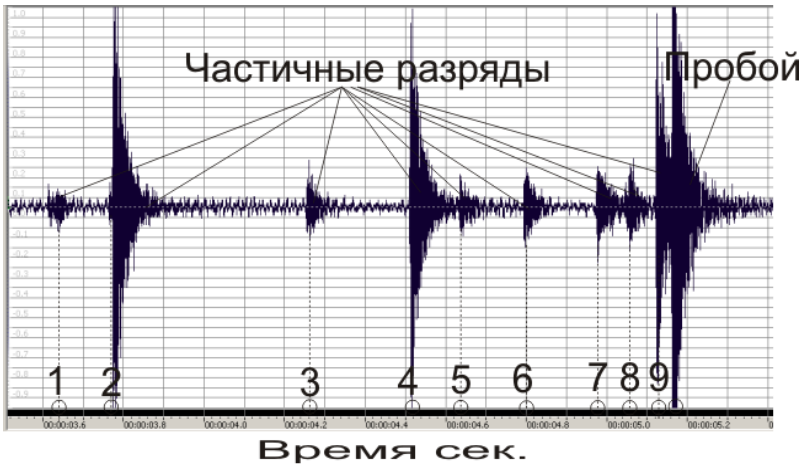


Рис. 3. Фонограмма частичных разрядов (ЧР) полиамида

Рис. 4. График динамики возникновения частичных разрядов (ЧР) полиамида

$$\tau_{чр} \leq 0{,}2 \text{ сек}, \quad (2)$$

где, $\tau_{чр}$ – допустимый промежуток времени между ЧР.

В случае невыполнения данного условия, т. е. когда интенсивность возникновения ЧР превышает 0,2 сек, микроконтроллером подается команда исполнительному механизму на уменьшение мощности ВЧ-генератора до достижения контролируемых значений, соответствующих расчетному режиму термообработки.

Исполнительным механизмом может быть сервопривод, шаговый двигатель или другое устройство. Надо отметить, что скорость исполнительного механизма нелинейная. Например, для оборудования УЗП 2500 процесс увеличения анодного тока до номинального значения выполняется в пределах 7 сек. Количество шагов, подаваемых на исполнительный механизм, подбирается экспериментально и зависит от конструктивных особенностей переменного конденсатора, установленного на ВЧ-генераторе. Так, для увеличения анодного тока на вышеуказанном оборудовании на 0,01 А (с 0,2 А до 0,21 А) количество шагов, подаваемых на шаговой двигатель – 130 ед., а для увеличения тока на 0,01 А, но уже в диапазоне с 0,89 А до 0,9 А, количество шагов – 24 ед., что предусматривается алгоритмом управления ИМ.

Особенность блока автоматизации ВЧ-термообработки полимерных материалов состоит в том, что его установка не вносит изменений в существующие принципиальные электрические схемы ВЧ-оборудования. Блок легко изготавливается и может быть использован для автоматизации различных моделей электротермических установок. Таким образом, предлагаемый автоматизированный блок управления позволяет производить термообработку различных полимерных материалов с защитой от критического воздействия пробойных явлений.

Промышленное внедрение представленного авторами устройства позволит автоматизировать высокочастотное электротермическое оборудование, повысить эффективность и надежность обработки полимерных материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Румынский С.Н. Автоматизация процесса высокочастотной сварки корпусов щелочных аккумуляторов / Румынский С.Н., Юленец Ю.П. // Сб. научн. тр. по химическим источникам тока. – СПб: Химиздат, 2004. – С. 135–139.
2. Трофимов Н.В. Автоматизированная система управления процессом высокочастотной сварки изделий из пластмасс сложной формы Н. В. Трофимов, Ю. П. Юленец, А. В. Марков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2009. – № 7 – С. 1 – 6.
3. Махов А. Н. Конвективно-лучевая сушка композиционного материала на основе полиамида в фонтанирующем слое /Махов А.Н., Сударушкин Ю.К., Павлюк В. В. // Журнал прикладной химии. – 2005. – № 12. – С. 2008–2010.
4. Дурандин Г.Б. Материаловедение и техника высоких напряжений. / Дурандин Г. Б., Сухогузов А. П., Никитина Е. П., Косяков А. А Екатеринбург // УрГУПС, 2005. – 116 с.
5. Воробьев Г.А. Физика диэлектриков. Область сильных полей. / Воробьев Г.А., Похолков Ю.П., Королев Ю.Д., Меркулов В.И. //ТПУ, 2003. – 244 с.
6. Кривченко И.В. AVR Микроконтроллеры очередной этап на пути развития // Компоненты и технологии. № 3. 2002. – С. 30–34.
7. Фистуль В.И. Физика и химия твердого тела. / учебник для вузов в 2-х томах. – М., Металлургия, 1995. – 251 с.
8. Рахманкулов Д.Л. Гетерогенно-каталитические промышленные процессы под действием электромагнитного излучения СВЧ-диапазона : монография. – М..: Химия, 2006. – 144 с.

УДК 621.646

Погодин Валерий Константинович,
д. т. н., с. н. с. отдела № 24 ОАО «ИркутскНИИхиммаш»
тел. 41-03-36, e-mail: v.pogodin@himmash.irk.ru
Вайнберг Снежана Михайловна,
инженер-конструктор отдела № 24 ОАО «ИркутскНИИхиммаш»
тел. 41-03-36, e-mail: s.vainberg@himmash.irk.ru

КОНСТРУКЦИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ БУГЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

V.K. Pogodin, S.M. Vainberg

STRUCTURAL STRENGTH CLIP JOINTS

Аннотация. *Предлагаемая методика расчёта и конструирования предназначена для проектирования применяемых в зарубежной и отечественной практике бугельных соединений с самоуплотняющимися уплотнительными кольцами с осевым упором. Методика позволяет определять оптимальные параметры деталей и элементов бугельных соединений для конкретных условий их применения в химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей, энергетической и других отраслях промышленности.*

Ключевые слова: *разъёмное соединение, бугель, прочность, герметичность.*

Abstract. *The tendered design procedure is intended for projection to clamp hubs with self-sealing packing rings with an axled stop applied in foreign and domestic practice. The method allows to define optimum arguments of details and members clip joints for concrete conditions of their application in chemical, petrochemical and oil refining, power and other industries.*

Keywords: *detachable joint, bow collector, strength, leak-tightness.*

На рис. 1, 2 представлена конструкция бугельного соединения с самоуплотняющимся кольцом, с осевым упором, которая может быть использована для трубопроводов, сосудов и аппаратов высокого давления [1, 2].

Соединение (рис. 1) включает в себя соединяемые детали 1 и 2 с уплотнительными поверхностями, например корпуса и крышки сосуда (или соединяемых фланцев труб, или в трубах) и уплотнительное кольцо 4. На рис. 2 представлено уплотнительное соединение.

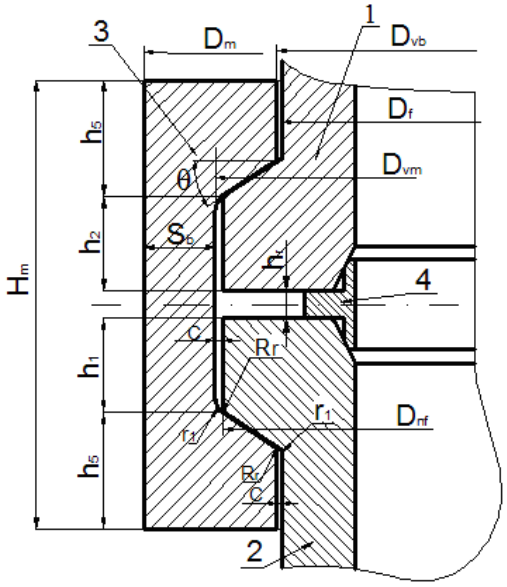


Рис. 1. Бугельное соединение с уплотнительным кольцом: 1, 2 – соединяемые детали, 3 – бугель, 4 – уплотнительное кольцо

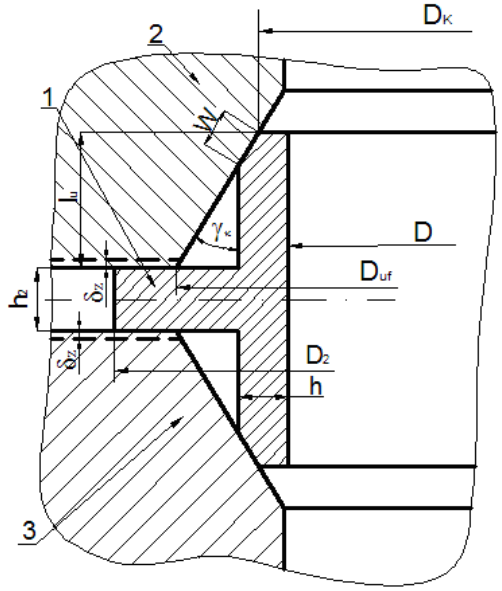


Рис. 2. Уплотнительное соединение в сборе: 1 – уплотнительное кольцо, 2, 3 – уплотнительные элементы соединяемых деталей

При расчёте конструкции следует принимать:

– величины рабочего и расчетного давлений, расчетной температуры производится в соответствии с ГОСТ 14249;

– величина пробного давления в соответствии с Правилами Ростехнадзора, ОСТ 24.201.03-90, ГОСТ 356;

– средние величины температур деталей соединения для стационарных режимов работы определяют на основании тепловых расчетов, результатов замеров фактических температур на сосудах и трубопроводах, аналогичных проектируемым, а также результатов экспериментов.

В случае отсутствия таких данных следует принимать:

– для бугельных соединений (рис. 1), которые не теплоизолированы с наружной поверхности, значения температур деталей t_f, t_b, $t_ш$, $t_к$ принимают в соответствии с графическими экспериментально полученными зависимостями, представленными на рис. 3;

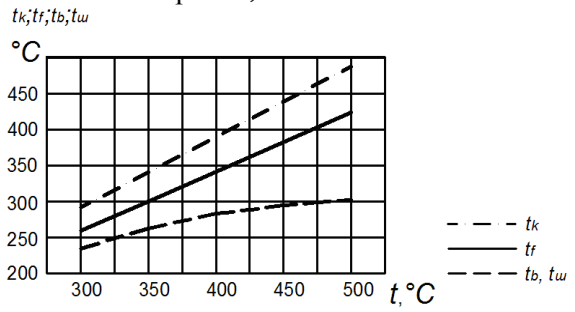


Рис. 3. Зависимость температуры деталей ($t_к$, t_f, t_b, $t_ш$) от температуры среды (t, ℃)

– для бугельного соединения, детали которого теплоизолированы с наружной поверхности, $t_f = t_{кр} = t_b = t_ш = t_к = t$;

– усилия действующих на детали бугельного соединения, тепловые воздействия учитываются в следующих случаях: при расчетной температуре $t > 200$ °С и при расчетной температуре $t > 100$ °С, если разность между величинами коэффициентов линейного расширения материалов элементов уплотнения и крепежа (бугель, шпильки) составляют более $2{,}5 \cdot 10^{-6}$ 1/град (уплотнительные кольца и соединяемые детали из аустенитных сталей);

– механические и физико-механические характеристики материалов деталей бугельного соединения для расчетных температур в соответствии с нормативными документами, а также [3, 7].

Величины технических характеристик материалов для промежуточных значений температур определяют методом интерполяции.

В качестве исходных данных для расчета принимают:

давление рабочее, *МПа*	$Ð$
давление расчетное, *МПа*	$Ð_ð$
давление пробное, *МПа*	$Ð_{ið}$
внутренний диаметр сосуда (трубы), *мм*	D
наружный диаметр фланца сосуда (крышки, трубы), *мм*	D_n
угол наклона уплотнительной поверхности фланца (трубы), *град*	γ
допускаемое погонное усилие при затяжке, *Н/мм*	$q_Ç$

Материал уплотнительных колец выбирают коррозионностойким по отношению к рабочей среде, с твердостью на 20 *НВ* меньшей, чем у материала соединяемых деталей (трубы или корпуса сосуда). В случае, если используются мягкие защитные покрытия, в качестве материала для уплотнительного кольца может использоваться тот же материал, что и материал соединяемых деталей.

Для выбранных материалов уплотнительного кольца и соединяемых деталей определяют следующие механические характеристики:

предел текучести материала кольца при t = 20 °С	σ_{TK}^{20},
предел текучести материала кольца при расчетной температуре	σ_{TK}^{t},
предел прочности материала кольца при t = 20 °С	σ_{bK}^{20},
предел прочности материала кольца при расчетной температуре	σ_{bK}^{t},
предел текучести материала соединяемых деталей при t = 20 °С	σ_{TD}^{20},
предел текучести материала соединяемых деталей при расчетной температуре	σ_{TD}^{t},
предел прочности материала соединяемых деталей при t = 20 °С	σ_{bD}^{20},
предел прочности материала соединяемых деталей при расчетной температуре	σ_{bD}^{t}.

Допускаемые напряжения в уплотнительном кольце определяют из условия

$$[\sigma_K] = \min\left\{\frac{\sigma_{TK}^{t}}{n_T}; \frac{\sigma_{bK}^{t}}{n_b}\right\},$$

где n_T – запас прочности по пределу текучести, (1,5);

n_b – запас прочности по пределу прочности, (2,6).

Допускаемое напряжение смятия

$$[\sigma_{см}]_K = 0{,}45 \cdot \sigma^t_{TK},$$

Допускаемое напряжение среза

$$[\tau_{ср}]_K = 0{,}5 \cdot [\sigma_K].$$

Конструирование уплотнительного кольца

При расчете уплотнительного кольца (рис. 4) определяют:

– высоту юбки l_u и толщину ребра h_r уплотнительного кольца из графика, представленного на рис. 5;

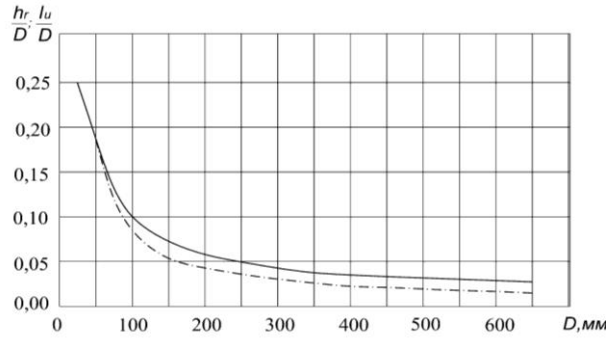


Рис. 5. Зависимость для определения размеров уплотнительного кольца

– толщину юбки уплотнительного кольца:

$$h = \sqrt{\frac{q_{Z_ç} l_u}{\sigma^t_{TK}}};$$

– наружный диаметр юбки кольца:

$$D1 = D + 2h;$$

– ширину уплотнительной поверхности кольца:

$$W = \frac{P\left(l_u + \frac{h_r}{2}\right) D \cos\rho}{D_1 [\sigma_d]_k \cos(\gamma_o - \rho)},$$

где ρ – угол трения на уплотнительных поверхностях (сталь по стали), *град* (11°20′);

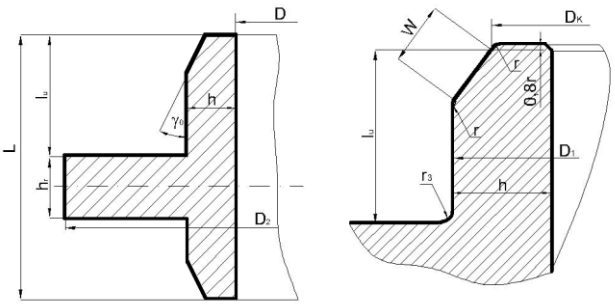


Рис. 4. Уплотнительное кольцо с осевым упором

$\gamma_0 = (\gamma_k - 1^\circ)$ – угол наклона уплотнительной поверхности кольца;

γ_k – угол наклона уплотнительной поверхности крышки и корпуса (фланца, трубы);

$[\sigma_d]_k = 0{,}5\sigma^t_{TK}$ – допускаемое контактное напряжение на уплотнительной поверхности.

Толщину юбки выбирают из условия ее прочности на срез.

$$h = \max\begin{cases} \dfrac{2P(l_u - W\cos\gamma_k)}{[\tau_{ñð}]_ê}, \\ \dfrac{2P_{ï\partial}(l_u - W\cos\gamma_k)}{[\tau_{ñð}]_ê}. \end{cases}$$

Диаметр контакта уплотнительных поверхностей

$$D_ê = D_1 - 2\left[W \cdot \sin\gamma_0 - r \cdot (1 - \sin\gamma_0) \cdot tg\gamma_0\right],$$

где r – радиус скругления уплотнительной поверхности.

Полная высота уплотнительного кольца

$$L = h_r + 2(l_u + 0{,}8r).$$

Наружный диаметр кольца D_2 определяют из графика (рис. 6).

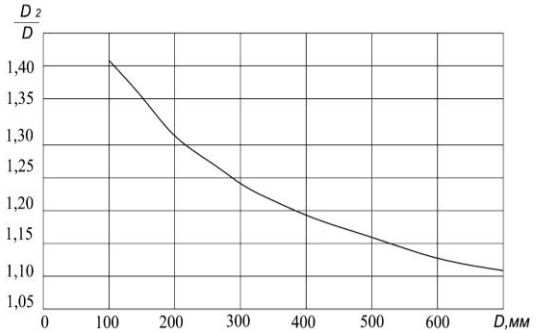


Рис. 6. Зависимость для определения наружного диаметра уплотнительного кольца

Максимально допустимая радиальная деформация уплотнительного кольца

$$\delta_r = \frac{D_k \sigma^t_{TK}}{2E^t_k},$$

где E^t_k – модуль упругости материала уплотнительного кольца при расчетной температуре.

Диаметр контакта уплотнительного кольца до затяжки

$$D_{ko} = D_k + 2\,\delta_r.$$

Исходный осевой зазор (рис. 2), между торцевой поверхностью фланца (с одной стороны) и торцом упора уплотнительного кольца

$$\delta_z = \frac{\delta_r}{tg\gamma_k}.$$

Проверку правильности выбора геометрических параметров уплотнительного кольца из условия прочности юбки на изгиб определяют по формуле

$$\sigma_x = \frac{6P}{h^2\beta^2}\left[\frac{1}{4}K_{S123}K_0(\beta \cdot l_u) - \frac{1}{4}P_{S123}K_1(\beta \cdot l_u) + K_2(\beta \cdot l_u)\right],$$

где $\beta = \frac{1,285}{\sqrt{(D_1 + D)0,25h}}$;

$K_{S123} = \frac{4K_3^2 - K_2(1-K_0)}{K_2^2 - K_1K_3}$;

$P_{S123} = \frac{4K_2K_3 - K_1(1-K_0)}{K_2^2 - K_1K_3}$;

где K_0, K_1, K_2, K_3 – функции Крылова, принимаемые согласно [3] в зависимости от величины $\beta \cdot l_u$.

При этом должно выполняться условие

$$\sigma_x < \sigma_{TK}^t.$$

Проверку наступления в кольце пластических деформаций производят из условия

$$\sigma = \sqrt{\frac{P^2 r_2^4}{(r_2^2 - r_1^2)^2} + 3P^2} \le \sigma_{TK}^t,$$

где $r_1 = \frac{D}{2}$; $r_2 = \frac{2S_k + LD}{2L}$,

$$S_k = Lh + 0,5h_r(D_2 - D_1) - 0,5W^2 \sin(2\gamma_0).$$

Допускаемую нагрузку на торцевые поверхности осевого упора уплотнительного кольца определяют по формуле

$$[Q_y] = F\sigma_T^t,$$

где $\sigma_T^t = \min\begin{cases}\sigma_{TK}^t \\ \sigma_{T\Phi}^t\end{cases}$, $S = \frac{\pi}{4}\left(D_2^2 - D_{uf}^2\right)$ – минимальная опорная площадь контакта ребра уплотнительного кольца.

Суммарная допускаемая осевая нагрузка на уплотнительное кольцо

$$\Sigma[Q] = [Q_y] + \pi D_{ko} q_3.$$

Конструирование деталей и элементов бугельного соединения

Расчетное осевое усилие, действующее на щеки бугеля, определяют по формуле

$$F_b = F_q + F_p + F_m + F_t,$$

где $F_q = \frac{\pi D_k^2}{4} P$ – осевая нагрузка от действия давления среды;

$F_p = 0,5 \cdot \pi \cdot PD_K \left(l_u + 0,5h_r\right) tg\gamma_K$ – осевая реакция уплотнительного кольца;

$F_m = \frac{4M}{D_{NK}}$ – усилие, действующее на щеки бугеля при действии изгибающего момента M на поверхность контакта изгибаемой стали с бугелем со средним диаметром D_{NK} (если момент M не задан принимают $F_m = 0,1 \cdot F_q$);

$F_t = \frac{\delta_\Sigma}{\lambda_\Sigma}$ – осевая нагрузка, возникающая от неравномерности нагрева элементов и деталей РС;

$\delta_\Sigma = \alpha_{f1} t_{f1} h_{f1} + \alpha_{f2} t_{f2} h_{f2} + \alpha_k t_k L - \alpha_b t_b (h_{f1} + h_{f2} + h_r)$, – суммарное осевое температурное перемещение деталей уплотнения в зоне контакта;

$\alpha_{f1}, \alpha_{f2}, \alpha_k, \alpha_b$, – коэффициенты линейного расширения материалов соединяемых деталей 1 и 2, уплотнительного кольца бугеля;

t_{f1}, t_{f2}, t_k, t_b – температуры соответствующих деталей;

h_{f1}, h_{f2} – толщина соединяемых деталей;

h_r – толщина ребра уплотнительного кольца;

L – полная высота уплотнительного кольца;

$\lambda_\Sigma = \lambda_K + \lambda_в$ – суммарный коэффициент осевой податливости соединения,

где $\lambda_K = \frac{h_r}{E_K^t F}$ – коэффициент осевой податливости ребра уплотнительного кольца,

где E_K^t – модуль упругости материала уплотнительного кольца,

где $\lambda_в = \frac{h_1 + h_2 + h_3}{E_b^t \cdot \pi(D_{vb} + S_b)S_b}$ – коэффициент осевой податливости бугеля,

где E_b^t – модуль упругости материала бугеля;

D_{vb} – внутренний диаметр проточки бугеля;

S_b – толщина бугеля в сечении I-I (рис. 12).

При $|F_t| \le 0,1 \cdot F_P$ в расчете не учитывается.

Если $F_t > S \cdot \sigma_T^t$, где $\sigma_T^t = \min(\sigma_{TK}^t, \sigma_{TF}^t)$, то необходимо принять другие сочетания материалов деталей соединения или изменить их геометрические размеры и тепловой режим работы.

Осевое усилие, действующее на детали

Усилие в бугельном соединении после затяжки шпилек

$$F_3 = \pi D_K \cdot q_3 + F_m.$$

Усилие в шпильках бугельного соединения после их затяжки

$$F_S = \max\left\{\frac{2tg(\Theta - \rho)}{0,55 \cdot D_K^2 \cdot P \cdot tg(\Theta + \rho)} \cdot F_3,\right.$$

где Θ – угол наклона щек бугеля;

ρ – угол трения (сталь по стали), 11°30′.

При пробном гидравлическом давлении $P_{пр}$ усилия, действующие в бугельном соединении $F_{в\,пр}$ и $F_{s\,пр}$, определяют при значении $P_{пр}$ вместо P, а F_a принимают равным нулю.

При технологическом давлении опрессовки $P_{опр}$ усилие, действующее в бугельном соединении $F_{в\,опр}, F_{s\,опр}$, определяют при значениях $F_{опр}$ вместо P, а значение F_t принимают равным нулю.

Для выбора конструкции фланца бугельного соединения определяют:

– наружный диаметр трубы (корпуса)

$$D_{fk} = \beta \cdot D,$$

где β – коэффициент толстостенности трубы (корпуса) назначают по значению $\ln \beta = \frac{P}{[\sigma]_k}$, где $[\sigma]_k$ – допускаемое напряжение материала трубы (корпуса);

$D_{nf} = D_k + 2(1-\delta_z)tg\gamma_k$ – диаметр уплотнительного конуса на торце фланца трубы (корпуса).

При $\frac{D_{fk}}{D_{nf}} \geq 1{,}2$ возможно применение резьбового фланца (рис. 7).

В других значениях $\frac{D_{fk}}{D_{nf}}$ могут использоваться приварные (рис. 8) или цельные (рис. 9) фланцы с переходным диаметром (рис. 8) или гладкие фланцы (рис. 9).

Переходный диаметр фланца принимают равным $D_f = k \cdot D_{fk}$, где значение коэффициента k определяют из графика (рис. 10).

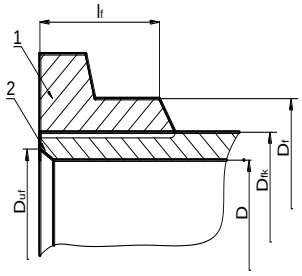


Рис. 7. Резьбовое соединение фланца с соединяемой деталью: 1 – фланец, 2 – соединяемая деталь

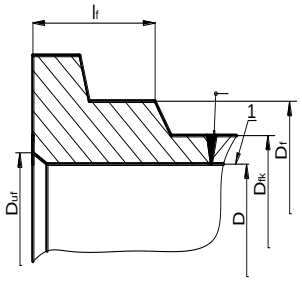


Рис. 8. Фланец с переходным диаметром: 1 – труба, 2 – фланец

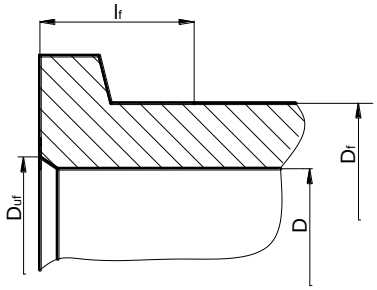


Рис. 9. Фланец гладкий

При использовании гладкого фланца (рис. 9) $D_f = D_{fk}$.

При других исполнениях (рис. 7, 8) должно соблюдаться условие $\frac{D_{fk}}{D_{uf}} \geq 1{,}1$.

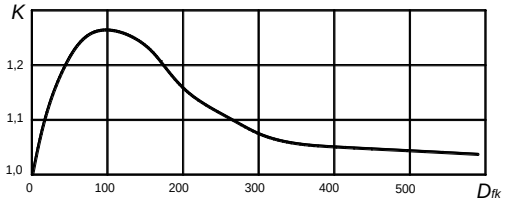


Рис. 10. Зависимость коэффициента *K* от *Dfr*

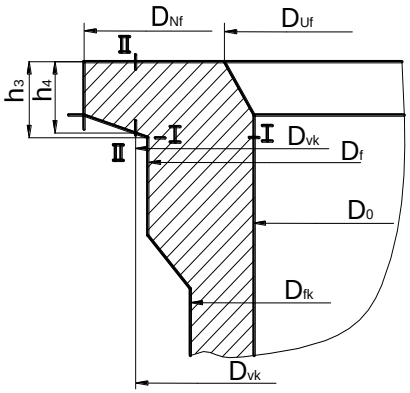


Рис. 11. Расчетная схема фланца

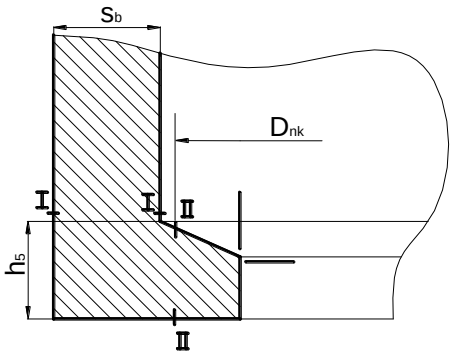


Рис. 12. Расчетная схема бугеля

Размеры бугельного соединения определяют в следующей последовательности:

R_r, r_1 – радиусы закругления опорных поверхностей соединяемых деталей r_1 и бугеля и R_r принимают согласно табл. 1;

$D_{vb} = D_f + 2C$ – внутренний диаметр бугеля, где C – зазор между наружным диаметром фланца D_{nf} и внутренним диаметром бугеля, определяется согласно табл. 1;

$D_{vk} = D_{vb} + 2R_r(1-\sin\Theta)$ – внутренний диаметр поверхности контакта соединяемой детали с бугелем,

$D_{nK} = \sqrt{\frac{4F_z}{\pi[\sigma]_f} + D_{vk}^2}$ – наружный диаметр поверхности контакта соединяемой детали с бугелем, где F_z определяют из условия

$$F_z = \max\begin{cases} F_3; \\ 1{,}1 \cdot \dfrac{\pi D_k^2}{4} \cdot P; \end{cases}$$

$D_{nf} = D_{nk} + 2R_r(1-\sin\theta)$ – наружный диаметр соединяемой детали.

Таблица 1

Размеры элементов бугельного соединения

D, мм	*C*	R_r	r_1
50	1,5	2,0	1,5
75			
100	2,0	2,5	2,0
150			
200			
250			
300			
350	2,5	3,0	2,5
400			
450			
500			
550	3,0	3,5	3,0
700			
900			
1000	4,0		
1200	5,0	4,0	
1300			
1500	6,0	5,0	3,5

Высоту опорной части h_3 определяют по формуле

$$h_3 = \sqrt{\frac{1.5 \cdot (-F_z)}{\pi[\sigma]_f}\left[\frac{(1-\mu)(\beta_k-1)(\beta_k+1)+2(1+\mu)\ln\beta_k}{(1+\mu)+(1-\mu)\beta_k^2}\right]},$$

где $\beta_k = \dfrac{D_f}{D_{nk}}$ – коэффициент толстостенности соединяемой детали.

Высоту h_4 по периметру окружности диаметром D_{vk} определяют по формуле

$$h_4 = h_3 - 0{,}5(D_{vk} - D_f)tg\Theta.$$

Высоту опорной части соединяемой детали h_f определяют из условия

$$h_f = \max\begin{cases} h_3 - (D_{nk} - D_f)0{,}5tg\theta \\ \dfrac{0{,}75(D_{uf} - D)}{tg\gamma_k} \end{cases}.$$

Напряжение среза в сечении II–II (рис. 11)

$$\tau_{cp} = \frac{F_z}{a \cdot D_{vk} \cdot h_4}.$$

Если $\tau_{cp} \ge [\tau]_f$, то h_3 увеличивают до тех пор, пока не будет соблюдено условие $\tau_{cpf} \le [\tau]_f$.

Напряжение в сечении I–I соединяемой детали определяют по формуле

$$\sigma_\Sigma = \frac{4F_b}{\pi(D_f^2 - D^2)} + \frac{9{,}6}{\pi(D_f + D)(D_f - D)^2} \times$$
$$\times\left[F_b\frac{2D_{NK} - (D_f + D)}{2} + F_r(D_{nK} - D_f)tg\theta\right].$$

Радиальную составляющую осевой силы определяют из условия

$$F_r = \max\begin{cases} F_3 tg(\theta+\rho) \\ 1{,}1F_q tg(\theta-\rho) \end{cases}.$$

Если $\sigma_\Sigma > [\sigma]_f$, то диаметр D_f увеличивают до тех пор, пока условие $\sigma_\Sigma \le [\sigma]_f$ не будет соблюдено.

Диаметр стержня шпильки d_s определяют по ГОСТ 26303-84.

Диаметр резьбы шпильки d_p, *мм*, определяют по ГОСТ 10494.

При расчете размеров бугеля (рис. 11 и 12) определяют:

– внутренний диаметр щеки $D_{vbm} = D_{nf} + 2C$;

– опорную высоту $h_7 = h_f$;

– высоту элемента $h_5 = 0{,}5 \cdot (D_{nk} - D_{vk})tg\theta + h_7$;

– полную высоту $H_m = 2h_f + 2h_5 + h_r$;

– наружный диаметр бугеля $D_m = D_{vbm} + 2S_b$.

Толщину бугеля в сечении I–I (рис. 12) S_b, определяют из условия

$$S_b = \max\begin{cases} \dfrac{1}{H_m[\sigma]_b}\left[F_b - [\sigma]_b\left(\dfrac{h_5+h_7}{2}\right)\left(\dfrac{D_{nk}-D_{vk}}{2}\right)\right]; \\ \dfrac{1}{2}\left[\sqrt{\dfrac{4F_b}{\pi[\sigma]_b} + D_{vbm}^2} - D_{vbm}\right]. \end{cases}$$

Суммарные напряжения от растяжения и изгиба в сечении I–I (рис. 12):

$$\sigma_\Sigma = \frac{F_b}{\pi D_{\tilde{n}\partial b} S_b} + \frac{1{,}5F_b}{\pi D_{\tilde{n}\partial b} S_b^2} \times$$
$$\times\left[(D_{\tilde{n}\partial b} - D_{vb}) + (D_{vm} - D_{vb})\frac{tg\theta}{tg(\theta+\rho)}\right];$$

где $D_{cpb} = \dfrac{D_m + D_{vbm}}{2}$ – средний диаметр в сечении I–I бугеля.

Если $\sigma_\Sigma > [\sigma]_b$, то диаметр D_m, увеличивают до тех пор, пока условие $\sigma_\Sigma \le [\sigma]_b$ не будет выполнено.

Напряжение среза бурта бугеля τ_b в сечении II–II $\tau_b = \dfrac{F_b}{\pi D_{nk} h_5}$.

В случае, если $\tau_b > [\tau]_b$, величину h_5, увеличивают до тех пор, пока условие $\tau_b \le [\tau]_b$ не будет выполнено.

Конструктивное оформление бугеля проводят в соответствии с рис. 13.

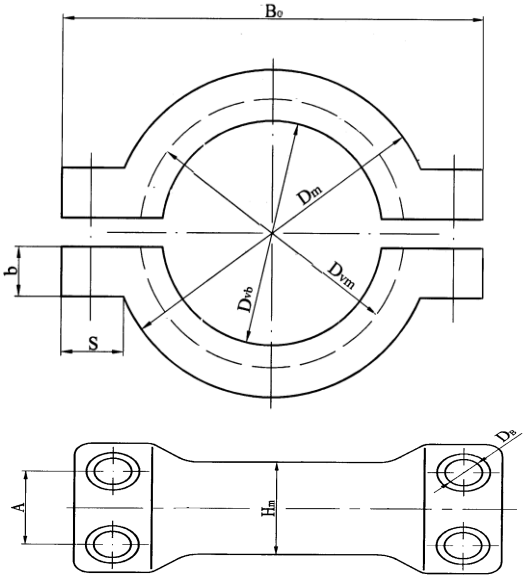


Рис. 13. Конструктивное оформление бугелей

Диаметр отверстий в бугеле под шпильки d_b определяют по следующим формулам:

$d_b = d_p + 2$ – для резьбы от М5 до М24;

$d_b = d_p + 4$ – для резьбы от М24 до М60;

$d_b = d_p + 6$ – для резьбы свыше М60.

Расстояние между шпильками $A = 3d_p$ на площадке бугеля.

В случае, если $H_m \ge 2A$, количество шпилек оставляют равным 4.

Если $H_m < 2A$, то количество шпилек принимают равным 2 и расчет повторяют. При этом принимают ширину площадки для размещения гаек $S = 2{,}5d_b$;

толщину лапки бугеля b определяют по формуле $b = \sqrt{\dfrac{3(F_S + F_m)}{2H_m[\sigma]_b}}$;

ширина бугеля: $B_b = D_m + 2S$.

На основании предложенной методики разработаны нормативные документы по конструированию бугельных соединений [5], а также разработаны, изготовлены и внедрены конструкции бугельных соединений для установок промышленных предприятий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Погодин В.К. Разъемные соединения и герметизация в оборудовании высокого давления. Иркутск: ОАО “ИркутскНИИхиммаш”, 2001, – 405 с.
2. Погодин В.К., Кузнецов К.А., Верхозин Н.А. Разработка новых бугельных соединений взамен фланцевых. Научный журнал: Современные технологии. Системный анализ. Ир-ГУПС Спецвыпуск. 2011, С. 140–147
3. Кузнецов А.М., Лившиц В.И, Погодин В.К. и др. Сосуды и трубопроводы. Справочник. Изд.2-е, доп., Иркутск: ГП «Иркутская обл. типография №1», 1999, 600 с.
4. Биргер И.А., Шор Б.Ф., Шнейдерович Р.М. Расчёты на прочность деталей машин. Изд. 2-е, исправл. и доп. М.: «Машиностроение»,1966, 616 с.
5. 4РД 0154-21-2006. Бугельные разъёмные соединения. Типы и конструкции. Технические требования. ОАО “ИркутскНИИхиммаш”, 43 с.

УДК 62 – 336

Долотов Алексей Митрофанович,
д. т. н., профессор, зав. каф. «Прикладная механика» ФГБОУ ВПО «ИрГУПС»
тел. 89086572297, e-mail: amdolotov@mail.ru
Белоголов Юрий Игоревич,
аспирант, ФГБОУ ВПО «ИрГУПС»
тел. 89149152303, e-mail: yurka-bratsc@mail.ru

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ТОНКОСТЕННОГО КЛАПАННОГО СЕДЛА ПОНИЖЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ

A.M. Dolotov, Yu.I. Belogolov

THE INTENSE-DEFORMED CONDITION OF A THIN-WALLED VALVED SADDLE OF THE DOWNGRADED RIGIDITY

Аннотация. *Определяются внутренние силовые факторы в оболочечно-пластинчатом седле клапана, позволяющем значительно снизить динамические нагрузки при срабатывании клапана.*

Ключевые слова: *клапан, оболочечное седло, уплотнительное соединение, ударное нагружение.*

Abstract. *Internal power factors in the shell-lamellar valve seat allowing considerably to lower dynamic load at wear of the valve are defined.*

Keywords: *valve, shell saddle, sealing joint, shock loading.*

В настоящее время в уплотнительных соединениях все более широкое распространение получает использование тонкостенных оболочечных элементов. По технологическим причинам оболочечные элементы обычно выполняются цилиндрическими (реже – коническими). Использование тонкостенных оболочечных элементов особенно целесообразно, когда применение неметаллических уплотнителей невозможно по условиям эксплуатации (температурный режим, химический состав герметизируемой среды и т. д.), использование притертых плоских или конических уплотнительных соединений нерационально из-за термоциклирования уплотнительного соединения, так как при этом теряются достигнутые притиркой геометрические параметры уплотнительных поверхностей, резко возрастает составляющая усилия герметизации, предназначенная для выбора отклонений формы уплотнительных поверхностей.

Использование тонкостенных оболочечных элементов в уплотнительных соединениях позволяет даже в сложных условиях эксплуатации обеспечить практически равномерное распределение герметизирующего усилия по периметру уплотнительной области независимо от коробления как золотника, так и седла, снизить требования к точности монтажа и сборки.

Однако следует отметить сложность определения рациональных геометрических параметров оболочечного элемента, в частности его толщины. Область рациональных параметров достаточно узкая. Выход из нее в одну сторону ведет к пластическим деформациям оболочечного элемента и его возможному разрушению, а в другую сторону – ведет к потере упругим оболочечным элементом его положительных черт, частично указанных выше.

Вместе с тем следует отметить, что в клапанных уплотнительных соединениях необходимо при выборе геометрических параметров оболочечного элемента учитывать и динамические ударные нагрузки, возникающие при срабатывании клапана.

В [3] показано, что максимальная динамическая нагрузка, возникающая при срабатывании клапана, может быть определена из выражения

$$F_{\max} = F + \\ +\sqrt{F^2 + 2(E_{\hat{e}} - E_{i\delta})(c_1 + c_2 tg\alpha\, tg(\alpha+\phi))}, \quad (1)$$

где F – статическая сила, действующая со стороны золотника на седло; $E_к$ – кинетическая энергия подвижной части клапана в момент контакта золотника и седла; $E_{оф}$ – энергия, затрачиваемая на выбор отклонений формы уплотнительных поверхностей; c_1 – приведенная жесткость подвижных частей клапана; c_2 – радиальная жесткость оболочечного элемента, $c_2 = 2\pi r_0 \beta^3 D / \varphi_1(\beta l)$; $\beta = \sqrt[4]{3(1-\mu^2)/(r_0^2 h^2)}$ – параметр оболочечного

элемента; $D = Eh^3/[12(1-\mu^2)]$ – изгибная жесткость; E, μ – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала оболочечного элемента; $\varphi_1(\beta l)$ – функция влияния [2]; φ – угол трения в стыке уплотнительного соединения. Остальные параметры, входящие в (1), показаны на рис. 1.

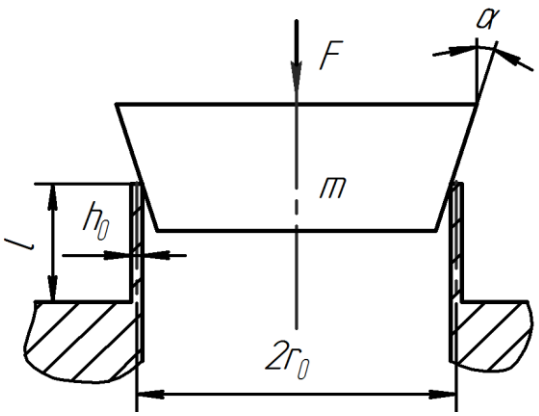


Рис. 1. Схема уплотнительного соединения с оболочечным седлом

В (1) значение F определяется давлением герметизируемой среды, требованиями к герметичности уплотнительного соединения, материалами уплотнительных поверхностей и рядом других параметров, обсуждение которых выходит за рамки данной статьи и считается заданным.

Значение $E_к$ определяется конструктором на этапе проектирования и также может изменяться в ходе эксплуатации из-за различных сочетаний колебаний параметров герметизируемой среды и в системе управления клапаном. Отметим важность использования разгруженных от действия герметизируемой среды приводов клапанов, рассмотрение которых также выходит за рамки данной статьи, но которые значительно влияют на экстремальные значения F и $E_к$, входящие в (1).

Наряду с указанными, возможным путем снижения ударной динамической нагрузки, действующей на оболочечный элемент, является снижение приведенной жесткости уплотнительного соединения. Отметим, что при снижении динамической нагрузки, действующей на оболочечный элемент, его можно сделать более тонкостенным, что в свою очередь ведет к снижению энергии, необходимой для выбора отклонений формы $E_{оф}$, и, как следствие, снижению требуемого усилия привода, что в свою очередь улучшает массогабаритные характеристики изделия в целом.

Простейшие варианты снижения приведенной жесткости уплотнительного соединения могут быть предложены использованием оболочечного элемента сильфонного типа (рис. 2), цилиндро-тороидального типа (рис. 3) или оболочечно-пластинчатого типа (рис. 4). В дальнейшем будем рассматривать прочностной расчет оболочечно-пластинчатого элемента как самого простого в технологическом отношении, а также учитывая возможность управления жесткостной характеристикой оболочечного элемента, выполняя оболочку и пластину различной толщины.

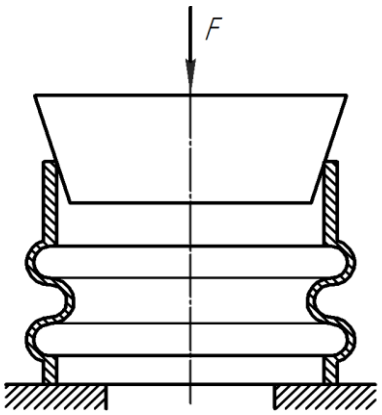


Рис. 2. Схема уплотнительного соединения с оболочечным элементом сильфонного типа

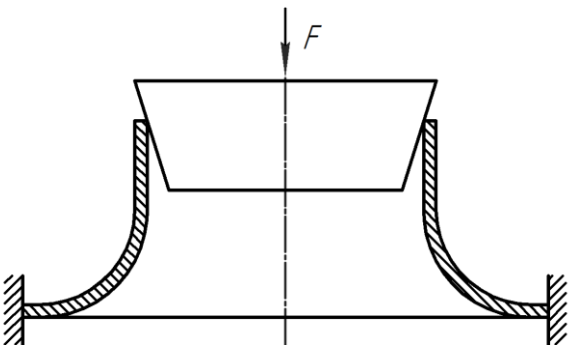


Рис. 3. Схема уплотнительного соединения с оболочечным седлом цилиндро-тороидального типа

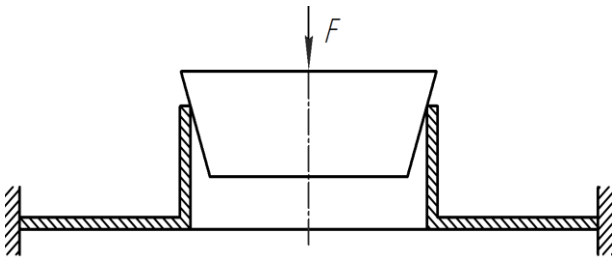


Рис. 4. Схема уплотнительного соединения с оболочечно-пластинчатым седлом

Принимая квазистатическое нагружение тонкостенного элемента, действие распределенной нагрузки от давления герметизируемой среды не учитываем, полагая, что за время быстропротекающего ударного нагружения одностороннее давлением герметизируемой среды не проявляется. Расчетная схема оболочечно-пластинчатого

элемента показана на рис. 5. Принимается допущение о приложении нагрузок по срединной поверхности тонкостенных элементов.

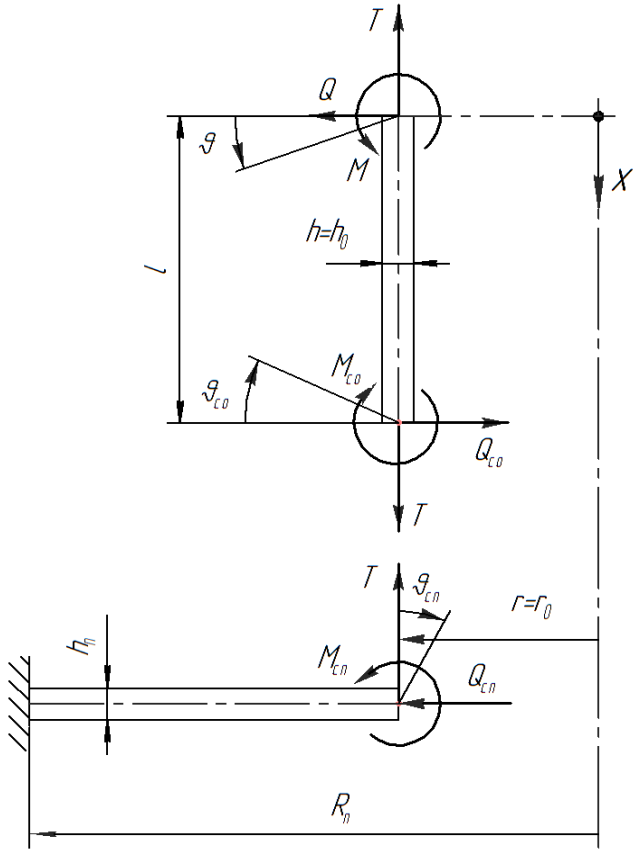


Рис. 5. Расчетная схема оболочечно-пластинчатого элемента

Отделим от цилиндра пластину и по контуру разделения прикладываем силу $Q_{\tilde{n}}, T$ и изгибающий момент M_c. На рис. 5 указаны положительные значения внутренних силовых и геометрических параметров. В соответствие с принятыми правилами знаков:

$$T = -\frac{F_{\max}}{2\pi r_0}; Q = \frac{F_{\max}}{2\pi r_0 tg(\alpha+\phi)}. \qquad (2)$$

На контуре разделения имеем следующие условия совместности:

$$\begin{aligned} M_{co}(x=l) &= -M_{cn}(r=r_0); \\ Q_{co}(x=l) &= -Q_{cn}(r=r_0); \\ w(x=l) &= -\Delta R_n(r=r_0); \\ \vartheta_{co}(x=l) &= \vartheta_{cn}(r=r_0). \end{aligned} \qquad (3)$$

Условие $T_o(x=l) = -T_n(r=r_0)$ использовано в (2). Определим силовые и геометрические параметры, указанные в (3).

Деформационное уравнение для пластины имеет вид [1]

$$\frac{d^2\vartheta}{dr^2} + \frac{1}{r}\cdot\frac{d\vartheta}{dr} - \frac{\vartheta}{r^2} = \frac{T}{D_n}, \qquad (4)$$

где D_n – изгибная жесткость пластины.

После двукратного интегрирования оно принимает вид

$$\vartheta(r) = C_1 r + \frac{C_2}{r} + \frac{Tr_0}{D_n}\left[\frac{r}{2}\ln r - \frac{r}{2}\right]. \qquad (5)$$

Для того, чтобы в (5) устранить логарифм размерной величины, решение (5) представляем в следующем виде:

$$\vartheta(r) = C_1 r + \frac{C_2}{r} + \frac{Tr_0 r}{2D_n}\ln\frac{r}{r_0}. \qquad (6)$$

Граничные условия для пластины:

$$\begin{aligned} &\vartheta = 0 \text{ при } r = R; \\ &D\left[\frac{d\vartheta}{dr} + \mu\frac{\vartheta}{r}\right] = M_{cn} \text{ при } r = r_0. \end{aligned} \qquad (7)$$

Деформационное уравнение для оболочечного элемента имеет вид

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + 4\beta^4\omega = -\frac{\mu T}{r_0 D_o}. \qquad (8)$$

Решение запишем в виде

$$\begin{aligned} w(x) &= A_0 K_0(\beta x) + A_1 K_1(\beta x) + \\ &+ A_2 K_2(\beta x) + A_3 K_3(\beta x) + w^*; \end{aligned} \qquad (9)$$

$$\begin{aligned} w'(x) = \vartheta(x) &= \beta[-4A_0 A_3(\beta x) + \\ &+ A_1 K_0(\beta x) + A_2 K_1(\beta x) + A_3 K_2(\beta x)]; \end{aligned} \qquad (10)$$

$$\begin{aligned} w''(x) = \frac{M(x)}{D_o} &= \beta^2[-4A_0 K_2(\beta x) - \\ &- 4A_1 K_3(\beta x) + A_2 K_0(\beta x) + A_3 K_1(\beta x)]; \end{aligned} \qquad (11)$$

$$\begin{aligned} w''' = \frac{Q}{D_i} &= \beta^3[-4A_0 K_1(\beta x) - \\ &- 4A_1 K_2(\beta x) - 4A_2 K_3(\beta x) + \\ &+ A_3 K_0(\beta x)], \end{aligned} \qquad (12)$$

где $w(x)$ – радиальное смещение образующей оболочечного элемента; D_o – изгибная жесткость оболочки; w^* – частное решение, $w^* = -\frac{\mu T r_0}{Eh}$; $A_0 ... A_3$ – постоянные интегрирования; $K_0(\beta x) ... K_3(\beta x)$ – функции А.Н. Крылова.

Подстановка граничных условий для оболочки, а именно:

$$\begin{aligned} &x = 0 : w''(0) = 0; w'''(0) = \frac{Q}{D_o}; \\ &x = l : w'(l) = \vartheta_{\tilde{n}\tilde{i}}; \; w''(l) = \frac{M_{\tilde{n}\tilde{i}}}{D_i} \end{aligned}$$

для сечения $x = 0$ сразу позволяет найти из (11) и (12):

$$A_2 = 0;\ A_3 = \frac{Q}{D_o\beta^3}. \qquad (13)$$

Раскрывая первое граничное условие для пластины:

$$C_1R + C_2 / R + \frac{Tr_0R_n}{2D_n}\ln\frac{R_n}{r_0} = 0, \qquad (14)$$

первое условие совместности:

$$D_0\beta^2[-4A_0K_2(\beta l) - 4A_1K_3(\beta l) + \frac{Q}{D_0\beta^3}K_1(\beta l)] = -D_n[C_1(1+\mu) - \frac{C_2}{r_0^2}(1-\mu) + \frac{Tr_0}{2}], \qquad (17)$$

объединяя второе и третье условия совместности:

$$A_0K_0(\beta l) + A_1K_1(\beta l) + \frac{Q}{D\beta^3}K_3(\beta l) - \frac{\mu Tr_0}{Eh_0} = -\frac{r_0(1-\mu)}{Eh_n}D_0\beta^3[-4A_0K_1(\beta l) - 4A_1K_2(\beta l) + \frac{Q}{D_0\beta^3}K_0(\beta l)], \qquad (15)$$

раскрывая четвертое условие совместности:

$$C_1r_0 + \frac{C_2}{r_0} = \beta[-4A_0K_3(\beta l) + A_1K_0(\beta l) + \frac{Q}{D_0\beta^3}K_2(\beta l)], \qquad (16)$$

получаем систему четырех уравнений (14)–(16) для нахождения последних четырех постоянных интегрирования C_1, C_2, A_0, A_1.

По найденным внутренним силовым факторам можно определить напряжения во всех точках пластины и оболочки и сделать соответствующие выводы о полученных геометрических параметрах оболочечно-пластинчатого элемента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бояршинов С.В. Основы строительной механики машин. – М.: Машиностроение, 1973. – 456 с.
2. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин: Справочник. – М.: Машиностроение, 1993. – 640 с.
3. Долотов А.М., Огар П.М., Чегодаев Д.Е. Основы теории и проектирования уплотнений пневмогидроарматуры летательных аппаратов: Учебное пособие. – М.: Изд-во МАИ, 2000. – 296 с.: ил.
4. Расчеты на прочность в машиностроении/Под ред. С.Д. Пономарева – М.: Машгиз. Т. 1. – 1956. – 884 с. Т. 2. – 1985. – 974 с. Т. 3. – 1959. – 1118.

УДК 531.391

Чайкин Сергей Васильевич,
к. ф.-м. н., старший научный сотрудник Института динамики систем и теории управления СО РАН. Т. (3952) 45-30-32, e-mail: schaik@yandex.ru
Банщиков Андрей Валентинович,
к. ф.-м. н., доцент, старший научный сотрудник Института динамики систем и теории управления СО РАН. Т. (3952) 45-30-53, (3952) 45-30-12, e-mail: bav@icc.ru

УСЛОВИЯ ГИРОСКОПИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ОДНОГО КЛАССА РАВНОВЕСИЙ СИММЕТРИЧНОГО ГИРОСТАТА НА КРУГОВОЙ ОРБИТЕ

S.V. Chaikin, A.V. Banshchikov

CONDITIONS FOR GYROSCOPIC STABILIZATION OF THE CERTAIN CLASS OF EQUILIBRIUMS OF SYMMETRICAL GYROSTAT ON A CIRCULAR ORBIT

Аннотация. *В ограниченной постановке рассматривается движение симметричного гиростата по кеплеровой круговой орбите в центральном ньютоновском поле сил. Исследуются необходимые условия устойчивости и условия гироскопической стабилизации одного класса равновесий корпуса гиростата относительно орбитальной системы координат.*

Ключевые слова: *устойчивость движения, степень неустойчивости, гироскопическая стабилизация, системы неравенств.*

Abstract. *The motion of symmetrical gyrostat on Keplerian circular orbit in central Newtonian field*

of forces is considered in the restricted formulation of problem. The necessary stability conditions and conditions for gyroscopic stabilization for the certain class of equilibriums of gyrostat's core with respect to the orbital coordinate system are researched too.

Keywords: *stability of motion, degree of instability, gyroscopic stabilization, system of inequalities.*

Введение

Данная работа, как и ряд предшествующих работ (см., например, [1–3]), посвящена изучению различных аспектов устойчивости и стабилизации относительных равновесий орбитального гиростата.

1. Постановка задачи. Относительные равновесия

Гиростат представляет собой твердое тело, в котором произвольным образом зафиксирована ось вращающегося с постоянной угловой скоростью уравновешенного маховика. При этом два момента инерции гиростата относительно главных центральных осей инерции равны. Система (массы m) движется в центральном ньютоновском поле сил так, что ее центр масс O вращается с постоянной орбитальной угловой скоростью $\boldsymbol{\omega}$ по кеплеровой круговой орбите радиуса R вокруг притягивающего центра. Далее будем пренебрегать взаимным влиянием движения гиростата вокруг центра масс O и движением последнего по орбите – так называемая ограниченная постановка задачи орбитального движения [4].

С помощью самолетных углов α, β, γ (рис. 1) определяем положение гиростата (осей Ox_k) относительно правой орбитальной системы координат Oy_k (a_k – орты соответствующих осей). Ось Oy_3 направлена по местной вертикали – радиусу-вектору, проведенному из притягивающего центра в центр масс гиростата; ось Oy_2 направлена по нормали к плоскости орбиты так, что $\boldsymbol{\omega} = \omega a_2$, где $\omega = |\boldsymbol{\omega}|$.

Не ограничивая общности, введем жестко связанную с корпусом гиростата правую прямоугольную декартову систему координат $Ox_1x_2x_3$ с полюсом O в центре масс гиростата и осями, направленными по его главным осям инерции, так, что $B > A = C$ и $h_3 = 0$, $h_1 > 0$, $h_2 > 0$. Здесь A, B, C – моменты инерции системы относительно осей Ox_1, Ox_2, Ox_3 соответственно, h_k – проекция вектора гиростатического момента системы (кинетического момента маховика), деленная на ω, на ось Ox_k (i_k – орт оси). В осях Ox_k матрица компонентов $[I]$ тензора инерции I является диагональной, $[I] = \mathrm{diag}\,(A, B, C)$.

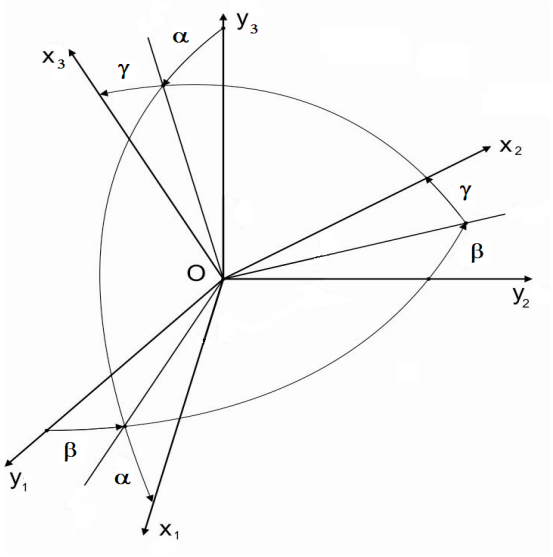


Рис. 1. Орбитальная и связанная системы координат

При этом потенциал сил гравитации Π_g определяем приближенным выражением [4]:

$$\Pi_g = -\frac{\mu m}{R} + \frac{1}{2}\omega^2 (3a_3 I a_3 - tr I),$$

где μ – произведение гравитационной постоянной на массу притягивающего центра.

Уравнения, описывающие относительные равновесия – состояния покоя корпуса гиростата относительно орбитальной системы координат, хорошо известны, см., например, [1, 2]. Далее используется их вид, предложенный в [3]. В рассматриваемом случае уравнения выписываются следующим образом:

$$\begin{cases} a_{23} = 0, \quad a_{21}^2 + a_{22}^2 = 1, \\ \left[\begin{cases} a_{21}h_2 - a_{22}h_1 + (B-A)\,a_{21}\,a_{22} = 0, \\ a_3 = \pm a_2 \times (I\,a_2 + h/4), \quad a_1 = a_2 \times a_3, \end{cases} \right. \\ \left[\begin{cases} a_{21}h_2 - a_{22}h_1 + 4\,(B-A)\,a_{21}\,a_{22} = 0, \\ a_1 = \pm\,(I\,a_2 + h) \times a_2, \quad a_3 = a_1 \times a_2. \end{cases} \right. \end{cases} \qquad \begin{matrix} \\ \\ (1) \\ \\ (2) \end{matrix}$$

Здесь и далее $a_{ki} \equiv a_k\, i_j$, $\times$ – векторное произведение. Уравнения (1), (2) относительно неизвестных a_{2k} определяют орт a_2 в равновесии, а затем по значению a_2 находятся по соответствующим формулам орты a_1 и a_3.

Замечание. Таким образом, для гиростата с осевой симметрией имеются лишь два класса относительных равновесий (см. общепринятую классификацию равновесий, например в [1]):

а) равновесия второго класса (в нашем случае задаются уравнениями (2)), когда по касательной к орбите в центре масс гиростата в ту или другую сторону направлена главная центральная ось инерции гиростата (в нашем случае Ox_3), две другие оси (Ox_1 и Ox_2) не совпадают ни с одним из ортов $\pm a_2$; при этом вектор гиростатического момента системы (вектор направлен по h) в равновесии перпендикулярен a_1;

b) равновесия третьего класса (в нашем случае задаются уравнениями (1)) характеризуются тем, что вдоль местной вертикали в ту или другую сторону направлена главная центральная ось инерции гиростата (в нашем случае Ox_3), ни одна из других осей связанной системы координат не совпадают ни с одним из ортов $\pm a_2$; при этом вектор гиростатического момента системы в равновесии перпендикулярен a_3.

Далее займемся получением необходимых условий устойчивости относительных равновесий гиростата на круговой орбите, определяемых уравнениями (1), и параметрическим анализом условий их гироскопической стабилизации [5].

В соответствии с введенными углами поворотов (см. рис. 1) относительные равновесия ($\dot\alpha = 0,\ \dot\beta = 0,\ \dot\gamma = 0$), задаваемые системой уравнений (1), будем определять следующими их значениями:

$$\alpha = \alpha_0 = 0,\quad \beta = \beta_0 = \text{const},\quad \gamma = \gamma_0 = 0, \qquad (3)$$

или $\{\alpha = \alpha_0 = \pi,\ \beta = \beta_0 = \text{const},\ \gamma = \gamma_0 = 0\}$, а значение угла β_0 определяется из (1) при $a_{21} \equiv \sin\beta_0,\ a_{22} \equiv \cos\beta_0$.

Замечание. При различных значениях $h_1,\ h_2 \in (0,\infty)$ уравнение (1) в этом случае, как легко можно показать, имеет решением минимум два различных вещественных значения $\beta_0 \in [0, 2\pi)$ и максимум четыре (также различных) вещественных значения.

2. Уравнения движения

Представим линеаризованные в окрестности решения (3) уравнения движения в виде

$$M\ddot q + G\dot q + Kq = 0, \qquad (4)$$

где $q = (\alpha,\ \beta, \gamma)^T$ – вектор обобщённых координат; M – положительно-определенная матрица кинетической энергии

$$M = \begin{pmatrix} B\cos^2\beta_0 + A\sin^2\beta_0 & 0 & A\sin\beta_0 \\ 0 & A & 0 \\ A\sin\beta_0 & 0 & A \end{pmatrix};$$

$$G = \omega\begin{pmatrix} 0 & g_{12} & 0 \\ -g_{12} & 0 & g_{23} \\ 0 & -g_{23} & 0 \end{pmatrix}$$ – кососимметричная матрица гироскопических сил, здесь

$$g_{12} = h_1\cos\beta_0 - h_2\sin\beta_0 + (A-B)\sin 2\beta_0;$$
$$g_{23} = h_2 + (B-2A)\cos\beta_0$$

и K – симметричная матрица потенциальных сил:

$$K = \omega^2\begin{pmatrix} 3(B-A)\sin^2\beta_0 & 0 & 3(B-A)\sin\beta_0 \\ 0 & k_{22} & 0 \\ 3(B-A)\sin\beta_0 & 0 & k_{33} \end{pmatrix},$$

где $k_{22} = (B-A)\cos 2\beta_0 + h_1\sin\beta_0 + h_2\cos\beta_0;$

$$k_{33} = (B-A)(3+\cos^2\beta_0) + h_2\cos\beta_0.$$

Отметим, что условия положительной определенности матрицы K совпадают с достаточными условиями устойчивости [6] исследуемого решения (3).

Введем безразмерные параметры:

$$H_1 = \frac{h_1}{B};\ H_2 = \frac{h_2}{B};\ J = \frac{A}{B};\ p_c \equiv \cos\beta_0;\ p_s \equiv \sin\beta_0.$$

Значения параметров лежат в интервалах:

$$-1 < p_c < 1;\quad H_2 > 0;\quad \frac{1}{2} < J < 1; \qquad (5)$$

$$(p_c \neq 0;\ p_s = \pm\sqrt{1-p_c^2};\ H_1 > 0).$$

Ограничения на параметр J следуют из условий $B < A + C;\ C = A$. Отметим, что при значениях $p_c = 0$ $(p_s = 0)$ из (1) следует $h_2 = 0$ $(h_1 = 0)$, а это противоречит $H_1,\ H_2 \in (0,\infty)$.

В новых обозначениях разрешим (1) относительно H_1:

$$H_1 = \frac{p_s\left(H_2 + (1-J)p_c\right)}{p_c}. \qquad (6)$$

Перепишем уравнения первого приближения (4) в новых обозначениях, где все производные берутся по безразмерному времени $\tau = \omega t$. Представим матрицы этих уравнений с учетом (6):

$$M = \begin{pmatrix} J p_s^2 + p_c^2 & 0 & p_s J \\ 0 & J & 0 \\ p_s J & 0 & J \end{pmatrix};$$

$$G = \begin{pmatrix} 0 & p_c p_s(J-1) & 0 \\ p_c p_s(1-J) & 0 & H_2 + p_c(1-2J) \\ 0 & p_c(2J-1) - H_2 & 0 \end{pmatrix};$$

$$K = \begin{pmatrix} 3(1-J)\left(1-p_c^2\right) & 0 & 3p_s(1-J) \\ 0 & k_{22} & 0 \\ 3p_s(1-J) & 0 & k_{33} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$k_{22} = (1-J)\,p_c^2 + \frac{H_2}{p_c}; \quad k_{33} = H_2 p_c + \left(3+p_c^2\right)(1-J).$$

Выписав характеристическое уравнение системы:

$$det(M\lambda^2 + G\lambda + K) = v_3\lambda^6 + v_2\lambda^4 + v_1\lambda^2 + v_0 = 0, \quad (8)$$

устанавливаем, что в коэффициенты v_i $(i = \overline{0,2})$ параметр p_s входит только в квадрате. Учитывая, что $p_c^2 + p_s^2 = 1$, легко исключить параметр p_s. Представим коэффициенты уравнения (8), зависящие от трёх параметров p_c, J, H_2, в явном виде:

$$v_0 = 3(1-J)\left(1-p_c^2\right)\left(H_2 + (1-J)\,p_c\right)\left(H_2 + (1-J)\,p_c^3\right);$$

$$v_1 = H_2^2\left(3 - 2p_c^2 - 2J\left(1-p_c^2\right)\right) +$$

$$+H_2(1-J)\,p_c\left(3 + 2p_c^2 - 2J\left(1-p_c^2\right)\right) -$$

$$-(1-J)\,p_c^2\left(J\left(7p_c^2 - 3\right) - 4p_c^2\right);$$

$$v_2 = H_2^2\left(J + (1-J)\,p_c^2\right) + H_2 p_c(1-J)\left(J + (2-J)\,p_c^2\right) +$$

$$+ (J-1)^2\,p_c^4 + (3-2J)\,Jp_c^2; \qquad v_3 = J^2 p_c^2. \quad (9)$$

3. Анализ матрицы потенциальных сил

В соответствии с теоремами Кельвина – Четаева [5] начнем изучение вопроса об устойчивости решения (3) с анализа матрицы K потенциальных сил.

Заметим, что $det\,K = v_0$. Выпишем условия положительной определенности матрицы K из (7):

$$(1-J)\left(1-p_c^2\right) > 0, \quad k_{22} > 0, \quad v_0 > 0. \quad (10)$$

Отметим, что первое условие в (10) всегда выполняется с учетом значений параметров из интервалов (5). Последнее неравенство в (10) сводится к неравенству $p_c\left(H_2 + (1-J)p_c\right) > 0$, исходя из явного вида v_0 в (9).

Символьное решение системы неравенств (10) получено с помощью функции *Reduce* пакета Mathematica и имеет вид

$$\left(\left(-1 < p_c < 0 \wedge 0 < H_2 < (J-1)p_c^3\right) \vee \left(0 < p_c < 1 \wedge H_2 > 0\right)\right)$$

$$\wedge\left(\frac{1}{2} < J < 1\right). \quad (11)$$

Для графического представления решения системы неравенств (10) (см. рис. 2) использовалась функция *RegionPlot3D* пакета Mathematica. В затененных областях рисунка матрица K положительно определена.

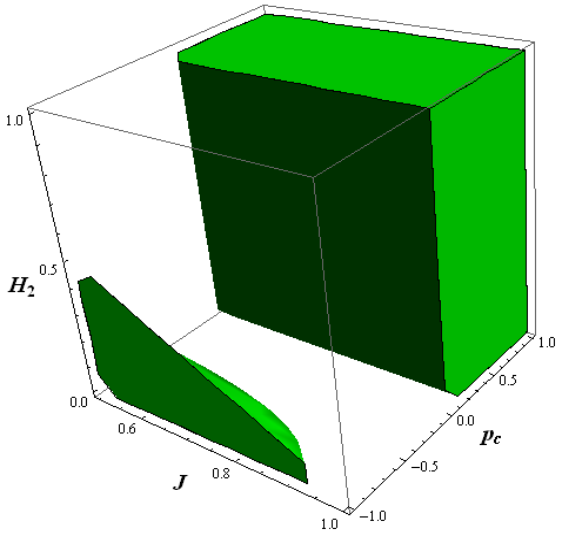


Рис. 2. Области с положительно определенной матрицей K

Из полученных решений видно, что для положительной определённости матрицы K на интервале $0 < p_c < 1$ нет ограничения сверху для значения H_2, а на интервале $-1 < p_c < 0$ имеется ограничение: $0 < H_2 < 1/2$.

При выполнении условий (10) рассматриваемое равновесие системы устойчиво. Известно [5], что в этом случае при действии гироскопических и диссипативных сил устойчивость равновесия сохранится. Если положение равновесия неустойчиво под действием одних потенциальных сил, то из теоремы Кельвина – Четаева о влиянии гироскопических сил следует, что гироскопическая стабилизация возможна только для систем, имеющих четную степень неустойчивости.

Если предположить, что главный диагональный минор 2-го порядка матрицы K отрицателен, т. е. $k_{22} < 0$, то система будет неустойчивой и можно поставить вопрос о возможности гироскопической стабилизации.

Известно, что четность (нечетность) степени неустойчивости по Пуанкаре определяется положительностью (отрицательностью) определителя матрицы потенциальных сил.

Символьное решение системы неравенств, определяющих область с четной степенью неустойчивости, найдено с помощью функции *Reduce*[$k_{22} < 0 \wedge v_0 > 0$, $\{J, p_c, H_2\}$] и имеет вид

$$\frac{1}{2} < J < 1 \wedge -1 < p_c < 0 \wedge H_2 > -p_c(1-J).$$

Графическое представление этой области приведено на рис. 3.

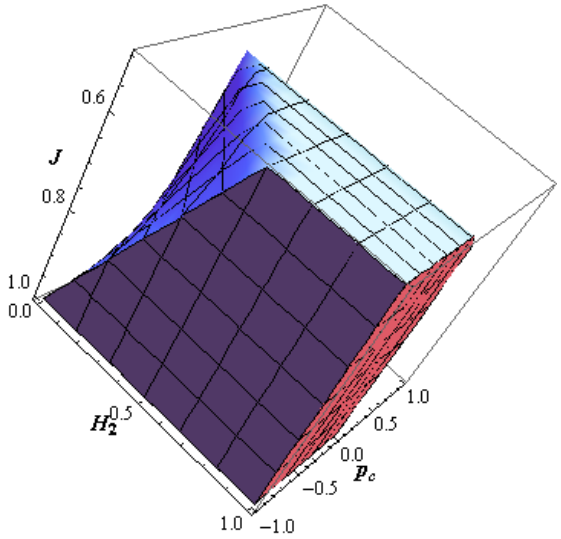


Рис. 3. Область с четной степенью неустойчивости

Из полученных решений следует, что все значения угла $\beta_0 \in \left]\pi/2, 3\pi/2\right[$ при $H_2 \geq 1/2$ принадлежат области с четной степенью неустойчивости.

Для наглядности на рис. 4 приводится срез областей с различными степенями неустойчивости при $H_2 = 1/10$. Области неустойчивости: наиболее темные – с нулевой степенью (т. е. в них выполняются условия (10) и решение (3) устойчиво), более светлая – с четной степенью (т. е. в этой области система неустойчива, но $detK > 0$), вне выделенных областей система имеет нечетную степень неустойчивости (т. е. $detK < 0$).

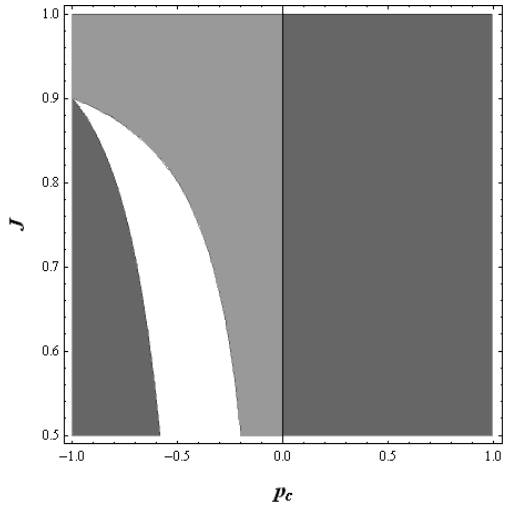


Рис. 4. Срез областей с различными степенями неустойчивости при $H_2 = 1/10$

4. К вопросу о гироскопической стабилизации

Характеристическое уравнение (8) содержит λ только в четных степенях. Известно, что устойчивость в таких системах возможна только в случае, когда все корни многочлена будут чисто мнимыми, а, соответственно, корни относительно λ^2 являются вещественными отрицательными числами.

Необходимые условия устойчивости, обеспечивающие требуемые свойства корней, представляют собой систему неравенств [7]:

$$\begin{cases} v_3 > 0, \quad v_2 > 0, \quad v_1 > 0, \quad v_0 > 0, \\ v_2^2 v_1^2 - 4v_1^3 v_3 - 4v_2^3 v_0 + 18 v_3 v_2 v_1 v_0 - 27 v_0^2 v_3^2 > 0. \end{cases} \quad (12)$$

Заметим, что $v_3 = detM$, следовательно, первое условие в (12) выполняется в силу положительной определенности матрицы кинетической энергии. Последнее неравенство в (12) также получено в аналитическом виде, но в силу его громоздкости в явном виде не представлено. Отметим, что его выражение представляет собой полином восьмой степени по параметру H_2 с ненулевыми коэффициентами, зависящими от параметров p_c, J.

Известно, что для положительно-определённой матрицы K на интервалах из (11) все неравенства (12) выполняются.

В случае отсутствия положительной определенности матрицы K, для обнаружения свойства гироскопической стабилизации необходимо выяснить, в какой части области, изображенной на рис. 3, выполняются неравенства (12). Ответ на этот вопрос дается с помощью функции *RegionPlot3D* и представлен на рис. 5.

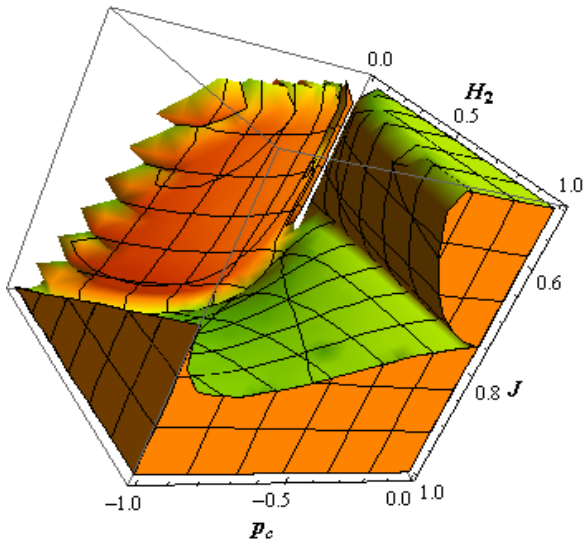


Рис. 5. 3D-область гироскопической стабилизации

2D-представление (рис. 6) решения системы неравенств (12) наглядно показывает, что гиро-

скопическая стабилизация возможна не во всей области с четной степенью неустойчивости, а только в ее заштрихованной части.

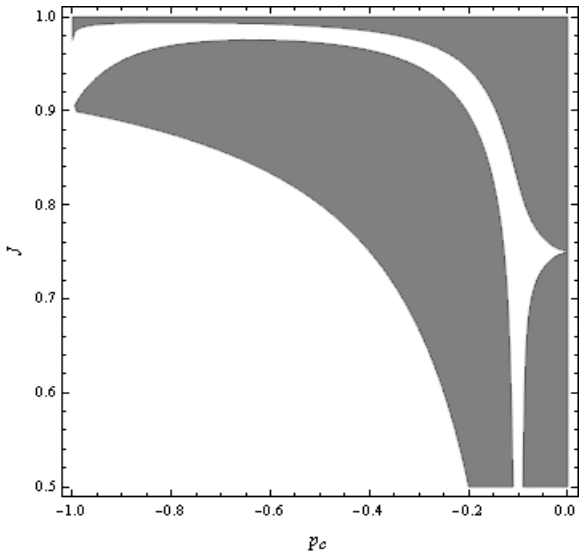


Рис. 6. Срез области гироскопической стабилизации при $H_2 = 1/10$

Заключение

Для одного из двух возможных классов относительных равновесий симметричного гиростата получены необходимые условия устойчивости и проведен параметрический анализ условий гироскопической стабилизации. При выполнении символьных расчетов и численного моделирования в качестве инструментального средства использовались функции пакета компьютерной алгебры Mathematica и программный комплекс LinModel [8]. Представленные исследования предваряют дальнейшую работу по устойчивости и стабилизации относительных равновесий несимметричного гиростата.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Longman R.W. Gravity-Gradient stabilization of gyrostat satellites with rotor axes in principal planes // Celestial Mech., 1971. – № 3. – P. 169–188.
2. Сарычев В.А., Мирер С.А., Дегтярев А.А. Динамика спутника-гиростата с вектором гиростатического момента в главной плоскости инерции // Космические исследования. – 2008. – Т. 46, № 1. – С. 61–73.
3. Чайкин С.В., Банщиков А.В. Анализ множества относительных равновесий спутника-гиростата // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2010. – № 3 (27). – С. 38–42.
4. Белецкий В.В. Движение искусственного спутника относительно центра масс. М.: Наука, 1965. – 416 с.
5. Четаев Н.Г. Устойчивость движения. Работы по аналитической механике. М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 535 с.
6. Сарычев В.А. Вопросы ориентации искусственных спутников // Итоги науки и техники. Исследование космического пространства. – М.: ВИНИТИ, 1978. – Т. 11. – С. 5–223.
7. Козлов В.В. О стабилизации неустойчивых равновесий зарядов сильными магнитными полями // Прикладная математика и механика. – 1997. – Т. 61, вып. 3. – С. 390–397.
8. Банщиков А.В., Бурлакова Л.А., Иртегов В.Д., Титоренко Т.Н. Программный комплекс LinModel для анализа динамики механических систем большой размерности. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008610622. ФГУ ФИПС, 1 февраля 2008 г.

УДК 621.752

Ахмадеева Алла Абдулваровна,
аспирант, Иркутский государственный университет путей сообщения
тел. (395-2) 638-357, e-mail: vgozbenko@yandex.ru
Гозбенко Валерий Ерофеевич,
д.т.н., профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения
тел. (395-2) 638-357, e-mail: vgozbenko@yandex.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛАВНЫХ КООРДИНАТ ВАГОНА С ДВУХСТУПЕНЧАТЫМ РЕССОРНЫМ ПОДВЕШИВАНИЕМ

A.A. Akhmadeeva, V.E. Gozbenko

DEFINITION OF THE MAIN COORDINATES OF THE CAR WITH TWO-LEVEL SPRING SUSPENSION

Аннотация. *В статье рассматриваются динамические характеристики вагона с двухступенчатым рессорным подвешиванием. Исследована система в главных координатах с несимметричными массоинерционными характеристиками. Из расчетов следует, что изменение параметров системы, в частности веса груза, существенно влияет на линейные и угловые обобщенные координаты.*

Ключевые слова: *свободные колебания, главные координаты, несимметричная механическая система.*

Abstract. *In the article, dynamic characteristics of the car with two-level spring suspension are considered. The system in the main coordinates with asymmetrical masso-inertial characteristics is investigated. From calculations change of parameters of system follows, that, in particular, cargo weight, essentially influence the linear and angular generalised co-ordinates.*

Keywords: *free fluctuations, the main coordinates, asymmetrical mechanical system.*

Введение

Повышение эффективности и качества подвижного состава основывается на совершенствовании конструкций железнодорожных экипажей уже на стадии проектирования путем применения новых, более рациональных методов и средств [5]. В связи с этим важное значение приобретают проблемы совершенствования математических моделей рабочих процессов агрегатов и систем, а также эксплуатационных свойств подвижного состава [2], позволяющих адекватно описывать реальные процессы и получать более достоверные характеристики и параметры их функционирования.

Рассмотрим модель вагона. В состав модели входит кузов вагона, опирающийся на две вагонные тележки, оснащенные двумя колесными парами каждая. Принимается, что кузов вагона и тележки обладают двумя степенями свободы: подпрыгивания и галопирования. Таким образом, модель вагона обладает шестью степенями свободы [3]. Схема вагона с двухступенчатым рессорным подвешиванием, используемого при построении модели, показана на рис. 1.

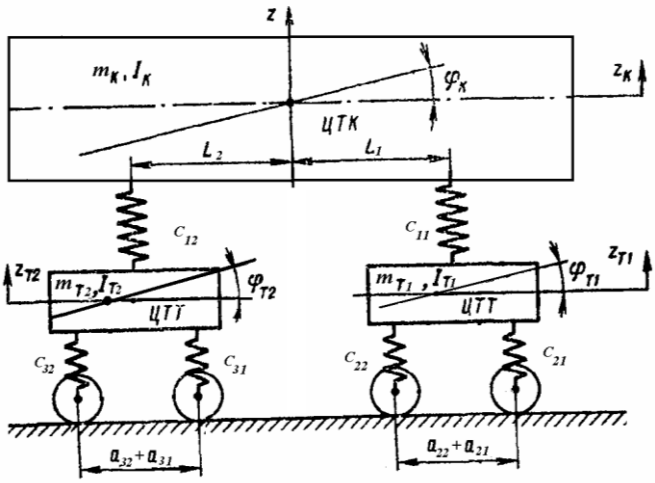


Рис. 1. Расчетная схема колебаний вагона с двухступенчатым рессорным подвешиванием

Для исследования свободных колебаний подрессоренных частей вагона приняты обозначения: $m_К$, $m_{Т1}$, $m_{Т2}$ – масса кузова и тележек соответственно; $I_К$ – момент инерции кузова при галопировании; c_{11}, c_{12} – вертикальная жесткость центрального подвешивания тележки; c_{21}, c_{22}, c_{31}, c_{32} – вертикальная жесткость буксового подвешивания колесной пары; $z_К$, $z_{Т1}$, $z_{Т2}$ – текущие вертикальные перемещения центра тяжести соответственно кузова, первой и второй тележек; $\varphi_К$, $\varphi_{Т1}$, $\varphi_{Т2}$ – текущие угловые перемещения кузова, первой и второй тележек соответственно; $L_1 + L_2$ – база кузова.

Составив кинетическую и потенциальную энергию и используя уравнения Лагранжа второго рода [1], получим систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} m_{\text{К}}\ddot{z}_{\text{К}} + (c_{11}+c_{12})z_{\text{К}} - c_{11}z_{\text{Т1}} - c_{12}z_{\text{Т2}} + \\ + (c_{11}L_1 - c_{12}L_2)\varphi_{\text{К}} = 0; \\ m_{\text{Т1}}\ddot{z}_{\text{Т1}} - c_{11}z_{\text{К}} + (c_{11}+c_{21}+c_{22})z_{\text{Т1}} - c_{11}L_1\varphi_{\text{К}} + \\ + (c_{21}a_{21} - c_{22}a_{22})\varphi_{\text{Т1}} = 0; \\ m_{\text{Т2}}\ddot{z}_{\text{Т2}} - c_{12}z_{\text{К}} + (c_{12}+c_{31}+c_{32})z_{\text{Т2}} + c_{12}L_2\varphi_{\text{К}} + \\ + (c_{31}a_{31} - c_{32}a_{32})\varphi_{\text{Т2}} = 0; \\ I_{\text{К}}\ddot{\varphi}_{\text{К}} + (c_{11}L_1 - c_{12}L_2)z_{\text{К}} - c_{11}L_1z_{\text{Т1}} + c_{12}L_2z_{\text{Т2}} + \\ + (c_{11}L_1^{\,2} + c_{12}L_2^{\,2})\varphi_{\text{К}} = 0; \\ I_{\text{Т1}}\ddot{\varphi}_{\text{Т1}} + (c_{21}a_{21} - c_{22}a_{22})z_{\text{Т1}} + (c_{21}a_{21}^{\,2} + c_{22}a_{22}^{\,2})\varphi_{\text{Т1}} = 0; \\ I_{\text{Т2}}\ddot{\varphi}_{\text{Т2}} + (c_{31}a_{31} - c_{32}a_{32})z_{\text{Т2}} + (c_{31}a_{31}^{\,2} + c_{32}a_{32}^{\,2})\varphi_{\text{Т2}} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Для упрощения системы (1) положим:

$$A_{11} = m_{\text{К}},\ C_{11} = c_{11} + c_{12},\ C_{12} = C_{21} = -c_{11},$$
$$C_{13} = C_{31} = -c_{12},\ C_{14} = C_{41} = c_{11}L_1 - c_{12}L_2,$$
$$A_{22} = m_{\text{Т1}},\ C_{22} = c_{11} + c_{21} + c_{22},$$
$$C_{24} = C_{42} = -c_{11}L_1,\ C_{25} = C_{52} = (c_{21}a_{21} - c_{22}a_{22}),$$
$$A_{33} = m_{\text{Т2}},\ C_{33} = c_{12} + c_{31} + c_{32},\ C_{34} = C_{43} = c_{12}L_2,$$
$$C_{36} = C_{63} = c_{31}a_{31} - c_{32}a_{32},\ A_{44} = I_{\text{К}},$$
$$C_{44} = c_{11}L_1^{\,2} + c_{12}L_2^{\,2},\ A_{55} = I_{\text{Т1}},$$
$$C_{55} = c_{21}a_{21}^{\,2} + c_{22}a_{22}^{\,2},\ A_{66} = I_{\text{Т2}},$$
$$C_{66} = c_{31}a_{31}^{\,2} + c_{32}a_{32}^{\,2}.$$

Тогда система (1) примет вид:

$$\begin{cases} A_{11}\ddot{z}_{\text{К}} + C_{11}z_{\text{К}} + C_{12}z_{\text{Т1}} + C_{13}z_{\text{Т2}} + C_{14}\varphi_{\text{К}} = 0; \\ A_{22}\ddot{z}_{\text{Т1}} + C_{21}z_{\text{К}} + C_{22}z_{\text{Т1}} + C_{24}\varphi_{\text{К}} + C_{25}\varphi_{\text{Т1}} = 0; \\ A_{33}\ddot{z}_{\text{Т2}} + C_{31}z_{\text{К}} + C_{33}z_{\text{Т2}} + C_{34}\varphi_{\text{К}} + C_{36}\varphi_{\text{Т2}} = 0; \\ A_{44}\ddot{\varphi}_{\text{К}} + C_{41}z_{\text{К}} + C_{42}z_{\text{Т1}} + C_{43}z_{\text{Т2}} + C_{44}\varphi_{\text{К}} = 0; \\ A_{55}\ddot{\varphi}_{\text{Т1}} + C_{52}z_{\text{Т1}} + C_{55}\varphi_{\text{Т1}} = 0; \\ A_{66}\ddot{\varphi}_{\text{Т2}} + C_{63}z_{\text{Т2}} + C_{66}\varphi_{\text{Т2}} = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Введение главных координат значительно упрощает изучение колебаний [6]. Зависимость между обобщенными координатами $z_{\text{К}}$, $z_{\text{Т1}}$, $z_{\text{Т2}}$, $\varphi_{\text{К}}$, $\varphi_{\text{Т1}}$, $\varphi_{\text{Т2}}$ и главными координатами q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6 можно выразить так:

$$\begin{cases} z_{\text{К}} = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6; \\ z_{\text{Т1}} = \mu_{11}q_1 + \mu_{12}q_2 + \mu_{13}q_3 + \mu_{14}q_4 + \mu_{15}q_5 + \mu_{16}q_6; \\ z_{\text{Т2}} = \mu_{21}q_1 + \mu_{22}q_2 + \mu_{23}q_3 + \mu_{24}q_4 + \mu_{25}q_5 + \mu_{26}q_6; \\ \varphi_{\text{К}} = \mu_{31}q_1 + \mu_{32}q_2 + \mu_{33}q_3 + \mu_{34}q_4 + \mu_{35}q_5 + \mu_{36}q_6; \\ \varphi_{\text{Т1}} = \mu_{41}q_1 + \mu_{42}q_2 + \mu_{43}q_3 + \mu_{44}q_4 + \mu_{45}q_5 + \mu_{46}q_6; \\ \varphi_{\text{Т2}} = \mu_{51}q_1 + \mu_{52}q_2 + \mu_{53}q_3 + \mu_{54}q_4 + \mu_{55}q_5 + \mu_{56}q_6. \end{cases} \quad (3)$$

Будем искать решение системы дифференциальных уравнений (2) в виде $z_i = A_i\sin(kt+\alpha)$, $i = \overline{1,3}$, $\varphi_i = A_i\sin(kt+\alpha)$, $i = \overline{4,6}$. Подставляя в (2) и отбрасывая множитель $\sin(kt+\alpha)$, получаем:

$$\begin{cases} A_1(C_{11} - A_{11}k^2) + A_2C_{12} + A_3C_{13} + A_4C_{14} = 0; \\ A_1C_{21} + A_2(C_{22} - A_{22}k^2) + A_4C_{24} + A_5C_{25} = 0; \\ A_1C_{31} + A_3(C_{33} - A_{33}k^2) + A_4C_{34} + A_6C_{36} = 0; \\ A_1C_{41} + A_2C_{42} + A_3C_{43} + A_4(C_{44} - A_{44}k^2) = 0; \\ A_2C_{52} + A_5(C_{55} - A_{55}k^2) = 0; \\ A_3C_{63} + A_6(C_{66} - A_{66}k^2) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Эта система имеет решение, отличное от тривиального $A_i = 0$, $i = \overline{1,6}$ если ее определитель равен нулю.

Таким образом, приходим к характеристическому (частотному) уравнению $\Delta(k^2) = 0$.

Найденный из характеристического уравнения корень k_1^2 подставим в систему (4). Так как определитель $\Delta(k_1^2)$ равен нулю, то в системе (4) будет только пять уравнений:

$$\begin{cases} (C_{11} - A_{11}k^2) + \dfrac{A_2}{A_1}C_{12} + \dfrac{A_3}{A_1}C_{13} + \dfrac{A_4}{A_1}C_{14} = 0; \\ C_{21} + \dfrac{A_2}{A_1}(C_{22} - A_{22}k^2) + \dfrac{A_4}{A_1}C_{24} + \dfrac{A_5}{A_1}C_{25} = 0; \\ C_{31} + \dfrac{A_3}{A_1}(C_{33} - A_{33}k^2) + \dfrac{A_4}{A_1}C_{34} + \dfrac{A_6}{A_1}C_{36} = 0; \\ C_{41} + \dfrac{A_2}{A_1}C_{42} + \dfrac{A_3}{A_1}C_{43} + \dfrac{A_4}{A_1}(C_{44} - A_{44}k^2) = 0; \\ \dfrac{A_2}{A_1}C_{52} + \dfrac{A_5}{A_1}(C_{55} - A_{55}k^2) = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Решая это уравнение, получим:

$$\frac{A_2^{(i)}}{A_1^{(i)}} == \mu_{1i},\ \frac{A_3^{(i)}}{A_1^{(i)}} = \mu_{2i},\ \frac{A_4^{(i)}}{A_1^{(i)}} = \mu_{3i},\ \frac{A_5^{(i)}}{A_1^{(i)}} = \mu_{4i},\ \frac{A_6^{(i)}}{A_1^{(i)}} = \mu_{5i}, \quad (6)$$

где

$$A_2^{(i)} = \begin{vmatrix} A_{11}k_i^{\,2} - C_{11} & C_{13} & C_{14} & 0 & 0 \\ -C_{21} & 0 & C_{24} & C_{25} & 0 \\ -C_{31} & C_{33} - A_{33}k_i^{\,2} & C_{34} & 0 & C_{36} \\ -C_{41} & C_{43} & C_{44} - A_{44}k_i^{\,2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{55} - A_{55}k_i^{\,2} & 0 \end{vmatrix}, \quad (7)$$

$$A_3^{(i)} = \begin{vmatrix} C_{12} & A_{11}k_i^{\,2} - C_{11} & C_{14} & 0 & 0 \\ C_{22} - A_{22}k_i^{\,2} & -C_{21} & C_{24} & C_{25} & 0 \\ 0 & -C_{31} & C_{34} & 0 & C_{36} \\ C_{42} & -C_{41} & C_{44} - A_{44}k_i^{\,2} & 0 & 0 \\ C_{52} & 0 & 0 & C_{55} - A_{55}k_i^{\,2} & 0 \end{vmatrix}, \quad (8)$$

$$A_4^{(i)} = \begin{vmatrix} C_{12} & C_{13} & A_{11}k_i^{\,2} - C_{11} & 0 & 0 \\ C_{22} - A_{22}k_i^{\,2} & 0 & -C_{21} & C_{25} & 0 \\ 0 & C_{33} - A_{33}k_i^{\,2} & -C_{31} & 0 & C_{36} \\ C_{42} & C_{43} & -C_{41} & 0 & 0 \\ C_{52} & 0 & 0 & C_{55} - A_{55}k_i^{\,2} & 0 \end{vmatrix}, \quad (9)$$

$$A_5^{(i)} = \begin{vmatrix} C_{12} & C_{13} & C_{14} & A_{11}k_i^{\,2} - C_{11} & 0 \\ C_{22} - A_{22}k_i^{\,2} & 0 & C_{24} & -C_{21} & 0 \\ 0 & C_{33} - A_{33}k_i^{\,2} & C_{34} & -C_{31} & C_{36} \\ C_{42} & C_{43} & C_{44} - A_{44}k_i^{\,2} & -C_{41} & 0 \\ C_{52} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}, \quad (10)$$

$$A_6^{(i)} = \begin{vmatrix} C_{12} & C_{13} & C_{14} & 0 & A_{11}k_i^{\,2} - C_{11} \\ C_{22} - A_{22}k_i^{\,2} & 0 & C_{24} & C_{25} & -C_{21} \\ 0 & C_{33} - A_{33}k_i^{\,2} & C_{34} & 0 & -C_{31} \\ C_{42} & C_{43} & C_{44} - A_{44}k_i^{\,2} & 0 & -C_{41} \\ C_{52} & 0 & 0 & C_{55} - A_{55}k_i^{\,2} & 0 \end{vmatrix}, \quad (11)$$

$$A_1^{(i)} = \begin{vmatrix} C_{12} & C_{13} & C_{14} & 0 & 0 \\ C_{22} - A_{22}k_i^{\,2} & 0 & C_{24} & C_{25} & 0 \\ 0 & C_{33} - A_{33}k_i^{\,2} & C_{34} & 0 & C_{36} \\ C_{42} & C_{43} & C_{44} - A_{44}k_i^{\,2} & 0 & 0 \\ C_{52} & 0 & 0 & C_{55} - A_{55}k_i^{\,2} & 0 \end{vmatrix}, \; i = \overline{1,6} \quad (12)$$

Для того чтобы установить соответствие между коэффициентами a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6 и A_{11}, A_{22}, A_{33}, A_{44}, A_{55}, A_{66}, а также коэффициентами жесткости c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6 и C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{14}, C_{21}, C_{22}, C_{24}, C_{25}, C_{31}, C_{33}, C_{34}, C_{36}, C_{41}, C_{42}, C_{43}, C_{44}, C_{52}, C_{55}, C_{63}, C_{66} подставим в выражение T и Π, вычисленные в обобщенных координатах, их значения (3) и, сопоставляя со значениями

$$T = \frac{1}{2}\left(a_1\dot{q}_1^{\,2} + a_2\dot{q}_2^{\,2} + a_3\dot{q}_3^{\,2} + a_4\dot{q}_4^{\,2} + a_5\dot{q}_5^{\,2} + a_6\dot{q}_6^{\,2}\right),$$

$$\Pi = \frac{1}{2}\left(c_1q_1^{\,2} + c_2q_2^{\,2} + c_3q_3^{\,2} + c_4q_4^{\,2} + c_5q_5^{\,2} + c_6q_6^{\,2}\right),$$

получим формулы для вычисления коэффициентов инерции a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6 а также коэффициентов жесткости c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6 [5]:

$$\begin{cases}
a_1 = A_{11} + A_{22}\mu_{11}^2 + A_{33}\mu_{21}^2 + A_{44}\mu_{31}^2 + A_{55}\mu_{41}^2 + A_{66}\mu_{51}^2,\\
a_2 = A_{11} + A_{22}\mu_{12}^2 + A_{33}\mu_{22}^2 + A_{44}\mu_{32}^2 + A_{55}\mu_{42}^2 + A_{66}\mu_{52}^2,\\
a_3 = A_{11} + A_{22}\mu_{13}^2 + A_{33}\mu_{23}^2 + A_{44}\mu_{33}^2 + A_{55}\mu_{43}^2 + A_{66}\mu_{53}^2,\\
a_4 = A_{11} + A_{22}\mu_{14}^2 + A_{33}\mu_{24}^2 + A_{44}\mu_{34}^2 + A_{55}\mu_{44}^2 + A_{66}\mu_{54}^2,\\
a_5 = A_{11} + A_{22}\mu_{15}^2 + A_{33}\mu_{25}^2 + A_{44}\mu_{35}^2 + A_{55}\mu_{45}^2 + A_{66}\mu_{55}^2,\\
a_6 = A_{11} + A_{22}\mu_{16}^2 + A_{33}\mu_{26}^2 + A_{44}\mu_{36}^2 + A_{55}\mu_{46}^2 + A_{66}\mu_{56}^2,\\
c_1 = C_{11} + 2C_{12}\mu_{11} + 2C_{13}\mu_{21} + 2C_{14}\mu_{31} + C_{22}\mu_{11}^2 +\\
+ C_{33}\mu_{21}^2 + C_{44}\mu_{31}^2 + C_{55}\mu_{41}^2 + C_{66}\mu_{51}^2,\\
c_2 = C_{11} + 2C_{12}\mu_{12} + 2C_{13}\mu_{22} + 2C_{14}\mu_{32} + C_{22}\mu_{12}^2 +\\
+ C_{33}\mu_{22}^2 + C_{44}\mu_{32}^2 + C_{55}\mu_{42}^2 + C_{66}\mu_{52}^2,\\
c_3 = C_{11} + 2C_{12}\mu_{13} + 2C_{13}\mu_{23} + 2C_{14}\mu_{33} + C_{22}\mu_{13}^2 +\\
+ C_{33}\mu_{23}^2 + C_{44}\mu_{33}^2 + C_{55}\mu_{43}^2 + C_{66}\mu_{53}^2,\\
c_4 = C_{11} + 2C_{12}\mu_{14} + 2C_{13}\mu_{24} + 2C_{14}\mu_{34} + C_{22}\mu_{14}^2 +\\
+ C_{33}\mu_{24}^2 + C_{44}\mu_{34}^2 + C_{55}\mu_{44}^2 + C_{66}\mu_{54}^2,\\
c_5 = C_{11} + 2C_{12}\mu_{15} + 2C_{13}\mu_{25} + 2C_{14}\mu_{35} + C_{22}\mu_{15}^2 +\\
+ C_{33}\mu_{25}^2 + C_{44}\mu_{35}^2 + C_{55}\mu_{45}^2 + C_{66}\mu_{55}^2,\\
c_6 = C_{11} + 2C_{12}\mu_{16} + 2C_{13}\mu_{26} + 2C_{14}\mu_{36} + C_{22}\mu_{16}^2 +\\
+ C_{33}\mu_{26}^2 + C_{44}\mu_{36}^2 + C_{55}\mu_{46}^2 + C_{66}\mu_{56}^2.
\end{cases} \qquad (13)$$

Т. о., уравнения движения в главных координатах q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6 примут вид

$$\begin{cases}
a_1\ddot{q}_1 + c_1q_1 = 0;\\
a_2\ddot{q}_2 + c_2q_2 = 0;\\
a_3\ddot{q}_3 + c_3q_3 = 0,\\
a_4\ddot{q}_4 + c_4q_4 = 0,\\
a_5\ddot{q}_5 + c_5q_5 = 0,\\
a_6\ddot{q}_6 + c_6q_6 = 0.
\end{cases} \qquad (14)$$

Полученные дифференциальные уравнения свободных колебаний системы в главных координатах (13) представляют собой шесть независимых линейных дифференциальных уравнения второго порядка. Общее решение этих уравнений имеет вид

$$\begin{cases}
q_1 = C_1\sin(k_1t + \alpha_1),\\
q_2 = C_2\sin(k_2t + \alpha_2),\\
q_3 = C_3\sin(k_3t + \alpha_3),\\
q_4 = C_4\sin(k_4t + \alpha_4),\\
q_5 = C_5\sin(k_5t + \alpha_5),\\
q_6 = C_6\sin(k_6t + \alpha_6),
\end{cases} \qquad (15)$$

где C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, α_1, α_2, α_3, α_4, α_5, α_6 – постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий при $t = t_0$: $z_К = z_{К0}$; $\dot{z}_К = \dot{z}_{К0}$; $z_{Т1} = z_{Т10}$; $\dot{z}_{Т1} = \dot{z}_{Т10}$; $z_{Т2} = z_{Т20}$; $\dot{z}_{Т2} = \dot{z}_{Т20}$, $\varphi_К = \varphi_{К0}$, $\dot{\varphi}_К = \dot{\varphi}_{К0}$, $\varphi_{Т1} = \varphi_{Т10}$, $\dot{\varphi}_{Т1} = \dot{\varphi}_{Т10}$, $\varphi_{Т2} = \varphi_{Т20}$, $\dot{\varphi}_{Т2} = \dot{\varphi}_{Т20}$. Тогда

$$q_1 = q_{10};\ \dot{q}_1 = \dot{q}_{10};\ q_2 = q_{20};\ \dot{q}_2 = \dot{q}_{20};\ q_3 = q_{30};$$
$$\dot{q}_3 = \dot{q}_{30},\ q_4 = q_{40};\ \dot{q}_4 = \dot{q}_{40};\ q_5 = q_{50};\ \dot{q}_5 = \dot{q}_{50};$$
$$q_6 = q_{60};\ \dot{q}_6 = \dot{q}_{60}.$$

В качестве примера найдем решение системы дифференциальных уравнений (1) в главных координатах при следующих параметрах системы:

$$m_К = 3{,}3\ \text{тт} \cdot \text{с}^2/\text{м},\ m_{Т1} = 0{,}4\ \text{тс} \cdot \text{с}^2/\text{м},$$
$$m_{Т2} = 0{,}39\ \text{тс} \cdot \text{с}^2/\text{м},\ I_К = 135{,}2\ \text{тс} \cdot \text{с}^2\text{м},$$
$$c_{11} = 118{,}6\ \text{тс/м},\ c_{12} = 118\ \text{тс/м},\ c_{21} = 237\ \text{тс/м},$$
$$c_{22} = 237{,}1\ \text{тс/м},\ c_{31} = 236{,}9\ \text{тс/м},$$
$$c_{32} = 237{,}05\ \text{тс/м},\ L_1 = 6{,}4\ \text{м},\ L_2 = 6{,}39\ \text{м},$$
$$a_{21} = 0{,}5\ \text{м},\ a_{22} = 0{,}49\ \text{м},\ a_{31} = 0{,}51\ \text{м},$$
$$a_{32} = 0{,}49\ \text{м},\ I_{Т1} = 0{,}075\ \text{тс} \cdot \text{с}^2\text{м},$$
$$I_{Т2} = 0{,}078\ \text{тс} \cdot \text{с}^2\text{м}$$

Все вычисления будем производить с помощью математического пакета программ MathCAD [7].

Из системы (4) найдем корни k_i^2, $i = \overline{1,6}$:

$$k_1^2 = 1498{,}392;\ k_2^2 = 56{,}609;\ k_3^2 = 57{,}071;$$
$$k_4^2 = 1553{,}293;\ k_5^2 = 1548{,}5;\ k_6^2 = 1991{,}015.$$

По формуле (6) определим:

$$\mu_{11} = -2{,}754 \cdot 10^{-7};\ \mu_{12} = -5{,}18 \cdot 10^{-4};$$
$$\mu_{13} = -4{,}964 \cdot 10^{-4};\ \mu_{14} = -2{,}562 \cdot 10^{-7};$$
$$\mu_{15} = -2{,}578 \cdot 10^{-7};\ \mu_{16} = -1{,}559 \cdot 10^{-7};$$
$$\mu_{21} = -6{,}279 \cdot 10^{4};\ \mu_{22} = -87{,}621;\ \mu_{23} = 89{,}089;$$
$$\mu_{24} = -6{,}747 \cdot 10^{4};\ \mu_{25} = -6{,}706 \cdot 10^{4};$$
$$\mu_{26} = -1{,}109 \cdot 10^{5};\ \mu_{31} = -0{,}156;\ \mu_{32} = -0{,}156;$$
$$\mu_{33} = -0{,}156;\ \mu_{34} = -0{,}156;\ \mu_{35} = -0{,}156;$$
$$\mu_{36} = -0{,}156;\ \mu_{41} = -3{,}798 \cdot 10^{-12};$$
$$\mu_{42} = -9{,}684 \cdot 10^{-6};\ \mu_{43} = -8{,}994 \cdot 10^{-6};$$
$$\mu_{44} = -3{,}289 \cdot 10^{-12};\ \mu_{45} = -3{,}33 \cdot 10^{-12};$$
$$\mu_{46} = -1{,}218 \cdot 10^{-12};\ \mu_{51} = -1{,}178 \cdot 10^{10};$$
$$\mu_{52} = -1{,}231 \cdot 10^{4};\ \mu_{53} = -1{,}29 \cdot 10^{4};$$
$$\mu_{54} = -1{,}36 \cdot 10^{10};\ \mu_{55} = -1{,}344 \cdot 10^{10};$$
$$\mu_{56} = -3{,}673 \cdot 10^{10}.$$

По формулам (13) найдем:

$$a_1 = 1{,}083 \cdot 10^{19};\ a_2 = 1{,}182 \cdot 10^{7};\ a_3 = 1{,}3 \cdot 10^{7};$$
$$a_4 = 1{,}444 \cdot 10^{19};\ a_5 = 1{,}409 \cdot 10^{19};$$
$$a_6 = 1{,}053 \cdot 10^{20};\ c_1 = 1{,}644 \cdot 10^{22};\ c_2 = 1{,}796 \cdot 10^{10};\ c_3 = 1{,}974 \cdot 10^{10};\ c_4 = 2{,}193 \cdot 10^{22};$$
$$c_5 = 2{,}14 \cdot 10^{22};\ c_6 = 1{,}599 \cdot 10^{23}.$$

Таким образом, уравнения движения в главных координатах q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6 примут вид

$$\begin{cases} 1{,}083 \cdot 10^{19}\ddot{q}_1 + 1{,}644 \cdot 10^{22} q_1 = 0; \\ 1{,}182 \cdot 10^{7}\ddot{q}_2 + 1{,}796 \cdot 10^{10} q_2 = 0; \\ 1{,}3 \cdot 10^{7}\ddot{q}_3 + 1{,}974 \cdot 10^{10} q_3 = 0, \\ 1{,}444 \cdot 10^{19}\ddot{q}_4 + 2{,}193 \cdot 10^{22} q_4 = 0, \\ 1{,}409 \cdot 10^{19}\ddot{q}_5 + 2{,}14 \cdot 10^{22} q_5 = 0, \\ 1{,}053 \cdot 10^{20}\ddot{q}_6 + 1{,}599 \cdot 10^{23} q_6 = 0. \end{cases} \quad (16)$$

Постоянные интегрирования C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, α_1, α_2, α_3, α_4, α_5, α_6 определим из начальных условий и найдем решение поставленной задачи в виде (15) при $t = 0$:

$$z_К = 0;\ \dot{z}_К = 0;\ z_{Т1} = 0;\ \dot{z}_{Т1} = 0;\ z_{Т2} = 0;$$
$$\dot{z}_{Т2} = 0{,}02,\ \varphi_К = 0,\ \dot{\varphi}_К = 0,\ \varphi_{Т1} = 0,\ \dot{\varphi}_{Т1} = 0,$$
$$\varphi_{Т2} = 0,\ \dot{\varphi}_{Т2} = 0 \text{ тогда } q_1 = 0;\ \dot{q}_1 = 0{,}1607;$$
$$q_2 = 0;\ \dot{q}_2 = -0{,}121;\ q_3 = 0;\ \dot{q}_3 = 0{,}1016,$$
$$q_4 = 0;\ \dot{q}_4 = -0{,}4326;\ q_5 = 0;\ \dot{q}_5 = 0{,}0308;$$
$$q_6 = 0;\ \dot{q}_6 = 0{,}0299.$$

Заключение

Рассмотрена модель вагона, обладающая шестью степенями свободы. Модель предназначена для исследования свободных колебаний подпрыгивания и галопирования кузова, подпрыгивания и галопирования тележек экипажа на прямолинейном участке пути. Получены дифференциальные уравнения в главных координатах. При увеличении массы вагона в три раза амплитуды колебаний (линейных и угловых) уменьшились в два раза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Булгаков Б.В. Колебания [Текст] / Б.В. Булгаков. – М. : Гостехиздат, 1954. – 891 с.

2. Вериго, М.Ф. Динамика вагонов. Конспект лекций [Текст] / М.Ф. Вериго. – М.: Транспорт, 1988. – 174 с.
3. Вершинский, С.В. Динамика вагона [Текст] / С.В. Вершинский, В.Н. Данилов, В.Д. Хусидов. – М.: Транспорт, 1991. – 360 с.
4. Гарг,В.К. Динамика подвижного состава [Текст] / Пер. с англ. / В.К. Гарг, Р.В. Дуккипати. – М.: Транспорт, 1988. – 391 с.
5. Исаев, И.П. Вычислительная техника в инженерных и экономических расчетах. Учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта [Текст] / И.П. Исаев, А.А.Перова, А.П. Матвеевичев, И.В. Бирюков. – М.: Транспорт, 1977. – 295 с.
6. Яблонский А.А. Курс теория колебаний [Текст] / А.А. Яблонский, С.С. Норейко. – М. : Высшая школа, 1975. – 250 с.
7. MATHCAD 6.0 PLUS. Финансовые, инженерные и научные расчеты в среде Windows 95 /перевод с английского. – М. Информационно-издательский дом «Филин», 1996. – 712 с.

УДК 625.111

Холодов Петр Николаевич,
аспирант кафедры «Изыскания, проектирование, постройка железных дорог и управление недвижимостью» Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС), тел.: 89501400338, e-mail: kholodov_pn@irgups.ru

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО РЕШЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

P.N. Kholodov

MULTICRITERIA TRADE-OFF WHEN DESIGNING THE RAILWAYS

Аннотация. *В статье предлагаются методики индивидуального и коллективного многокритериального выбора оптимального варианта решения в проектировании железных дорог.*

Процедура реализована в программе «Система поддержки принимаемых решений (Валерия)», написанной автором.

Ключевые слова: *принятие оптимальных решений, проектирование железных дорог, многокритериальный выбор, методика принятия проектных решений.*

Abstract. *In the article techniques of individual and collective multicriteria choice of an optimum variant of the decision in designing of the railways are offered.*

Procedure is realized in the program «System of support of accepted decisions (Valery)», written by the author.

Keywords: *acceptance of optimum decisions, designing of railways, multicriteria choice, technique of acceptance of design decisions.*

Железная дорога представляет собой сложную техническую транспортную систему. В процессе проектирования железных дорог необходимо согласование со всеми структурами железнодорожной отрасли. Проектирование железных дорог сопровождается соблюдением требований целого ряда нормативных документов, таких как [1, 2, 3]. Эти документы устанавливают диапазоны рекомендуемых и допускаемых параметров проектируемых объектов железной дороги. К ним можно отнести радиусы кривых участков пути в плане и профиле, длины и уклоны элементов продольных профилей, разницу в уровнях головок рельсов смежных путей, расстояние от уровня головки рельсов до контактного провода и многие другие параметры.

Помимо технических параметров, большую значимость имеют экономические показатели – стоимость строительства и эксплуатационные расходы, и социальные – обеспечение пассажиро- и грузоперевозок.

Целый ряд приведенных выше требований и условий «рождает» определенное множество вариантов проектных решений, которые можно сравнить между собой по техническим, экономическим и социальным параметрам (критериям).

В процессе проработки предложенных проектных решений часть вариантов может быть отсеяна из-за возможных ограничивающих условий (к примеру, ограничение стоимости строительства), а оставшиеся варианты необходимо сравнить и выбрать наиболее оптимальный вариант для дальнейшей проработки и реализации.

Автором предлагается методика многокритериального индивидуального принятия решений [4], позволяющая использовать три известных метода:

1) метод идеальной точки [5];

2) метод анализа иерархии Т. Саати [6];

3) метод *Electre I* [5].

В проектировании железных дорог встречаются задачи принятия решений, условия которых можно описать следующим образом.

1. Определены количественные оценки вариантов проектных решений по намеченным частным критериям эффективности. В таком случае в предлагаемой процедуре применяется метод идеальной точки. Для расширения сферы применимости этого метода автором предложена его модификация.

2. ЛПР считает возможным сравнивать варианты проектных решений лишь качественно попарно. В таком случае в предлагаемой процедуре применяется метод анализа иерархий. Для получения уверенных решений в процедуре автором предусмотрен этап автоматизированного расчета случайного индекса кососимметричных матриц, используемого для проверки согласованности матриц попарных сравнений.

3. Некоторые оценки по частным критериям эффективности выражены числовыми значениями, остальные ЛПР получает из попарного сравнения. В таком случае в предлагаемой процедуре применяется метод *Electre I*. Для того чтобы обеспечить выявление весов частных критериев эффективности, автором предложен алгоритм, аналогичный алгоритму, используемому в методе анализа иерархии.

На рис. 1 представлена схема принятия индивидуального решения по выбору оптимального варианта в проектировании железных дорог. На данной схеме решение каждого из описанных выше типов задач представлено в виде отдельной ветви.

Предложенная методика предполагает сравнение уже проработанных и возможных для реализации со всем заданными ограничениям вариантов проектных решений по обозначенным критериям для сравнения.

Рассмотрим предложенную методику с модификацией известных методов по шагам ее выполнения для каждого из типов решаемых задач (см. рис. 1).

1 тип задач (для решения используется метод «идеальной точки»).

Шаг 1. Заполняется таблица определенных значений критериев оценивания по вариантам сравнения.

Шаг 2. Производится анализ критериев оценивания для задания направления оптимизации (минимизация или оптимизация) и вида шкалы (равноинтервальная, показательная, степенная, логарифмическая).

Рис. 1. Схема методики индивидуального принятия решений

При проектировании железных дорог в качестве частных критериев эффективности могут использоваться такие показатели, шкалы измерения по которым не являются равноинтервальными, например показатель шумового загрязнения (шум имеет логарифмическую шкалу измерения).

Шаг 3. Выявление множества Парето – варианты, которые не превосходят по критериям оценивания другие варианты, а хотя бы по одному из критериев уступают, отсеиваются из общего множества возможных вариантов.

Шаг 4. Назначение весовых коэффициентов важности критериев оценивания либо прямым назначением, в т. ч. нормализацией оценок по принятой шкале (например, от 1 до 9), либо путем попарного сравнения (способом из метода анализа иерархии), либо процедурой голосования лиц, принимающих решение (при коллективном выборе вариантов).

Шаг 5. Определяются оптимальности вариантов по вычисленным значениям глобальных критериев.

Метод идеальной точки основан на применении глобального критерия, определяемого по формуле:

$$\rho_i = \sqrt{\sum \left(C_j \cdot \left(r_j^i \right)^2 \right)}, \text{ для } j = 1, \ldots m, \quad (1)$$

где C_j – весовые коэффициенты j-х частных критериев эффективности, учитывающие «вес» – значимость каждого критерия, безразмерные, причем должно выполняться условие

$$\sum C_j = 1 \text{ , } j = 1, \ldots m, \text{ при } 0 < C_j < 1. \quad (2)$$

Нормализованные значения частных критериев эффективности, значения по которым желательно максимизировать, определяются по формуле

$$r_j^i = \frac{(R_j^+ - R_j^i)}{(R_j^+ - R_j^-)}, \text{ для } j = 1, \ldots s, \quad (3)$$

где R_j^i – реальное, ненормализованное значение j-го частного критерия для i-го варианта проектного решения в соответствующих единицах измерения;

s – число частных критериев эффективности, которые желательно максимизировать (из общего числа m частных критериев эффективности).

Нормализованные значения частных критериев эффективности, значения по которым желательно минимизировать, определяются по формуле

$$r_j^i = \frac{(R_j^i - R_j^-)}{(R_j^+ - R_j^-)}, \text{ для } j = s + 1, \ldots m. \quad (4)$$

Модификация метода состоит в том, что автор предлагает в зависимости от вида шкалы (см. шаг 2) критериев оценивания в формулы (3) и (4) подставлять не сами значения функции y, а аргументы x этих функций.

Тогда

а) для равноинтервальной шкалы $R = y/k$;

б) для показательной шкалы $R = \log_a y/k$;

в) для степенной шкалы $R = (y/k)^{(1/a)}$;

г) для логарифмической шкалы $R = a^{y/k}$.

В работе автора [4] приведен пример, где использован критерий с логарифмической шкалой и показана значимость применения модифицированного метода «идеальной точки» с учетом предложенной классификации шкал частных критериев эффективности.

Шаг 6. Завершающим этапом в процедуре принятия решений является проверка лицом, принимающим решение, чувствительности принимаемого решения в зависимости от весовых коэффициентов критериев, обдумывание полученного результата с целью принятия окончательного проектного решения.

2 тип задач (для решения применяется метод анализа иерархий).

На сегодняшний день данный метод, разработанный американским ученым Т. Саати, является широко распространенным способом решения многокритериальных задач [6].

Шаг 1. Назначение весовых коэффициентов важности критериев оценивания (аналогично шагу 4 для 1 типа задач).

Шаг 2. Нахождение соотношений между вариантами сравнения по качественной шкале и перевод ее в количественные оценки с помощью таблицы 1.

Шаг 3. Определение оптимальности вариантов по количественному индикатору качества каждой из альтернатив [6].

Одним из важных достоинств метода анализа иерархии является этап выявления противоречивости структуры предпочтений ЛПР − проверка нарушения численной (кардинальной) и транзитивной (порядковой) согласованности.

После попарного сравнения производится расчет индекса согласия (ИС). Затем производится проверка согласованности данных.

Таблица 1

Шкала относительной важности при попарном сравнении

Интенсивность относительной важности	Определение	Комментарий
1	Равная важность	Равный вклад двух элементов уровня в элемент вышестоящего уровня
3	Умеренное превосходство одного над другим	Опыт и суждения отдают легкое превосходство одного элемента над другим
5	Существенное или сильное превосходство	Опыт и суждения отдают сильное превосходство одному элементу над другим
7	Значительное превосходство	Одному элементу отдается настолько сильное превосходство, что оно становится практически значительным
9	Очень сильное превосходство	Очевидность превосходства одного элемента над другим подтверждается наиболее сильно
2, 4, 6, 8	Промежуточные решения между двумя соседними суждениями	Применяются в компромиссном случае
Обратные величины приведенных выше чисел	Если при сравнении одного варианта с другим получено одно из вышеуказанных чисел, то при сравнении второго варианта с первым получим обратную величину	

Параметром, определяющим «степень» согласованности матрицы, полученной в процессе решения, является отношение полученного ИС к случайному индексу (СИ).

Т. Саати было предложено в качестве СИ принимать величину ИС обратно-симметричной матрицы, сгенерированной случайным образом.

«Ахиллесовой пятой» данного метода, по мнению автора, является принятие СИ как определенной величины.

Напомним, как было принято значение СИ [6].

В Национальной лаборатории Окриджа, штат Теннеси, США (*англ. – Oak Ridge National Laboratory*) коллеги Т. Саати сгенерировали средние СИ для матриц порядка от 1 до 15 на базе 100 случайных выборок.

Как и ожидалось, СИ увеличивались с увеличением порядка матрицы.

Так как величина выборки равнялась 100, наблюдались статистические флуктуации в индексе при переходе от матрицы одного порядка к матрице другого порядка.

Поэтому вычисления были повторены в Уортонской школе бизнеса при Пенсильванском университете, штат Пенсильвания, США (*англ. – The Wharton School of the University of Pennsylvania*) для величины случайной выборки 500 в матрицах порядка до 11, а далее использовались предыдущие результаты для n равного от 12 до 15.

Автором предлагается для проверки и уточнения значений СИ использовать программу для ЭВМ «Случайный индекс обратно-симметричных матриц» [7].

Модуль позволяет вычислять случайный индекс и сравнивать его с теми значениями, которые определены в методе анализа иерархий Т. Саати.

Затем определяется отношение согласованности.

ЛПР предоставляется право выбора значения СИ (предложенного в методе Т. Саати или вычисленного в программе), необходимо заметить, что разница достигает порою от 10 до 30 %.

Насколько значимо число генераций для определения значения СИ можно понять, взглянув на два рисунка, приведенных ниже.

На рис. 2 показан фрагмент модуля программы, на котором видно множество точек, соответствующих значениям вычисленных СИ (ось ординат) при количестве генераций, равном 500 (ось абсцисс) при числе параметров, равном 5.

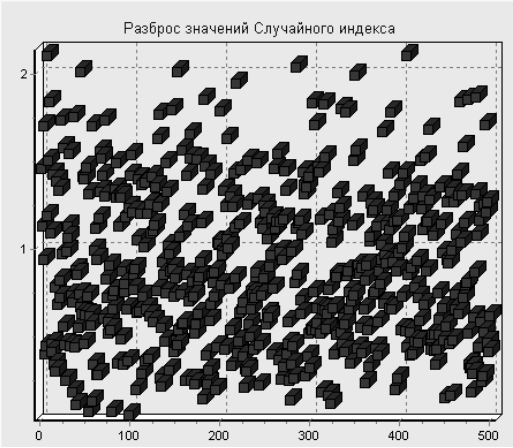


Рис. 2. Множество точек СИ при числе генераций 500

При повторении операций с таким же числом генераций множество точек незначительно изменяло свое положение. Среднее значение СИ, вычисленное с применением разработанного модуля, колебалось в пределах от 0,8 до 1,0.

На рис. 3 показан пример множества точек СИ при том же числе параметров, равном 5, но при значительно большем количестве генераций, равном 100 000.

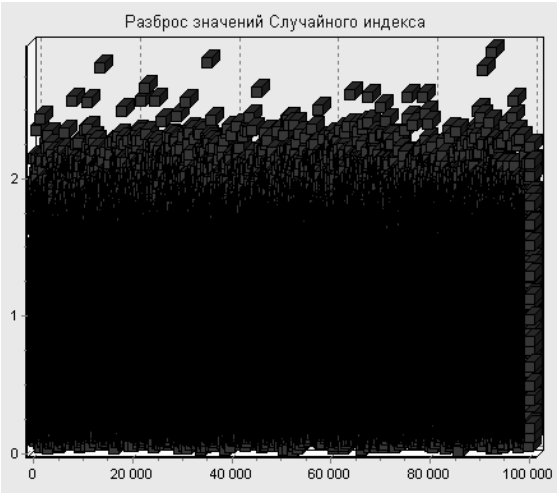


Рис. 3. Множество точек СИ при числе генераций 100 000

Значение СИ составило 1,01. Учитывая большое число генераций, такую оценку СИ можно считать устойчивой и принять СИ = 1,01 за «точное значение СИ».

Значение, определенное в школе Уортона и предложенное в методе Т. Саати, равно 1,12, что больше вычисленного на 9,82 %.

В работе автора [4] приведен пример принятия решения в проектировании железных дорог на основе метода анализа иерархий, в котором хорошо видна значимость влияния СИ на выбор проектного решения.

Шаг 4. Производится анализ чувствительности принимаемого решения в зависимости от весовых коэффициентов критериев, обдумывание полученного результата с целью принятия окончательного проектного решения.

3 тип задач (при решении используется метод Electre I).

Шаг 1. Назначение весовых коэффициентов важности критериев оценивания (аналогично шагу 4 для 1 типа задач).

Шаг 2. Нахождение соотношений между вариантами через попарное сравнение по качественной шкале («превосходит», «уступает», «равнозначны») с заданием ориентировочных значений вариантов по критериям сравнения и шкалы критериев.

Шаг 3. Нахождение матриц индексов согласия и несогласия превосходства одних вариантов над другими [5].

Шаг 4. Выбор оптимального варианта либо через вычисление индексов-компромиссов (полученных как средне арифметическое, среднегеометрическое или корень из суммы квадратов значений индексов согласия и несогласия), либо заданием допустимых индексов, либо самостоятельным анализом.

Шаг 5. Производится обдумывание полученного результата с целью принятия окончательного проектного решения.

Практическая реализация предлагаемой методики принятия решений рассматривалась в работе автора [4].

При принятии решений группой лиц предлагается использовать методику коллективного принятия решений.

Предлагается использовать шкалу, согласно которой назначаются веса (ранги) индивидуальных решений в коллективной оценке вариантов в зависимости от занимаемой должности экспертов (табл. 2). Шкала предлагается от 1 до 9; 1 – самый низкий вес эксперта в решаемой задаче выбора, 9 – самый высокий вес.

Предложенная в табл. 2 градация зависит от решаемой задачи. В каждом конкретном случае предложенная шкала может меняться в зависимости от опыта эксперта в области решаемой задачи выбора.

Таблица 2

Шкала относительной важности принимаемых решений одним экспертом при коллективном принятии решения

Интенсивность относительной важности	Занимаемая ЛПР должность в организации
9	Директор
8	Зам. директора
7	Главный инженер проекта
6	Начальник отдела
5	Главный специалист
4	Инженер

Далее путем нормализации рангов должностей экспертов, принимающих участие в сравнении, получают весовые коэффициенты важности каждого ЛПР в процедуре коллективного выбора.

Далее путем линейной свертки количественные индикаторы качества вариантов приводятся к одному значению с использованием весовых коэффициентов лиц, принимающих решение.

Схема коллективного принятия решения представлена на рис. 4.

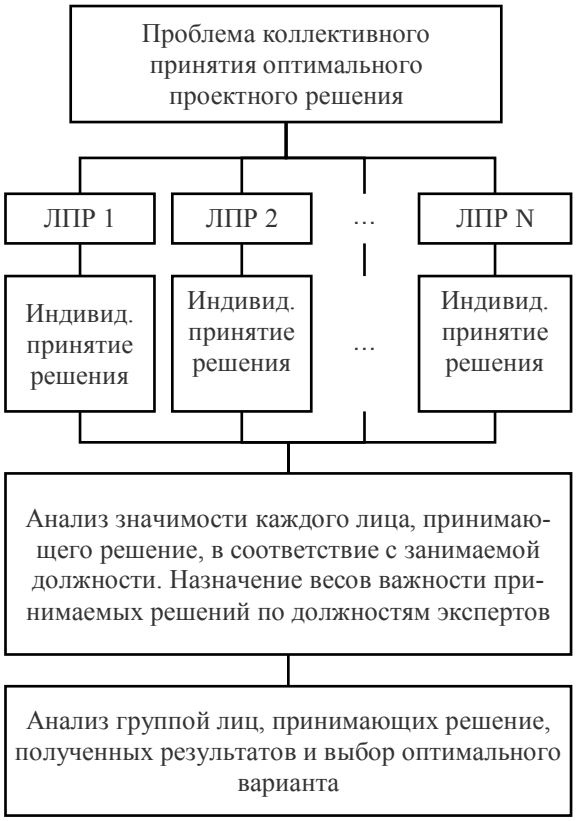


Рис. 4. Схема методики коллективного принятия решений

Автором была разработана программа для ЭВМ «Система поддержки принимаемых решений (Валерия)», в которой реализованы описанные выше методики индивидуального и коллективного принятия решений [8].

Проведенные автором эксперименты и внедрение предлагаемых методик индивидуального и коллективного принятия решений в практическую деятельность Восточно-Сибирского института проектирования транспортных систем (ВСИПТС ИрГУПС) позволяют сделать вывод о том, что предлагаемые методики можно рекомендовать для широкого применения.

При этом следует ожидать следующих положительных результатов:

1) повышение качества выбора оптимального проектного решения путем использования научно-обоснованных методик;

2) ускорение процедуры принятия решения по выбору оптимального варианта проектного решения.

При этом можно быть уверенным в том, что проектировщики железных дорог овладеют предлагаемыми методиками в приемлемые сроки, используя разработанную автором программу «Система поддержки принимаемых решений (Валерия)».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Система нормативных документов в строительстве. Строительные нормы и правила. СНиП 11-01-95. Инструкция о порядке разработки, согласования, утверждения и составе проектной документации на строительство предприятий, зданий и сооружений / Минстрой России. – М.: ГП ЦЕНТРИНВЕСТпроект, 1995. – 14 с.
2. Строительно-технические нормы министерства путей сообщения Российской Федерации. Железные дороги колеи 1520 мм : стн ц-01-95: утв. министром путей сообщения Российской федерации 25.09.1995: дата введения 01.01.1996. - М: МПС РФ, 1996.
3. Технические условия на работы по ремонту и планово-предупредительной выправке пути : ЦПТ-2003: утв. зам. министра путей сообщения Российской Федерации 2003:- М. МПС РФ, 2003.
4. Холодов, П. Н. Совершенствование процедуры принятия решений при проектировании желез-

ных / П. Н. Холодов // Вестник транспорта Поволжья: научно-технический журнал. – Самара: Изд-во СамГУПС. – 2011. – № 4 (28) : июль-август 2011. – С. 62–68.

5. Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений, а так же Хроника событий в Волшебных Странах : учебник / О.И. Ларичев. – М. : Логос, 2000. – 296 с.
6. Саати Р. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Р. Саати ; перевод с англ. Р.Г. Вачнадзе. – М. : Радио и связь, 1993. – 278 с.
7. Холодов П. Н. Случайный индекс обратно-симметричных матриц // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010617198, 28.10.2010.
8. Холодов П.Н., Подвербный В.А. Система поддержки принимаемых решений (Валерия) // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010617609, 17.11.2010.

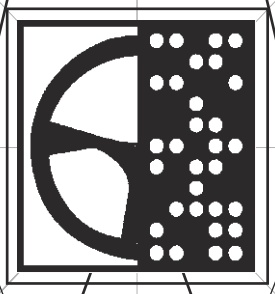
Министерство образования и науки Российской Федерации
Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта

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 и 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 621.313.323

Коновалов Юрий Васильевич,
к. т. н., доцент кафедры электропривода и электрического транспорта,
НИ ИрГТУ, тел.(3952)405238, e-mail: yrvaskon@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ

Yu.V. Konovalov

MODELING OF ELECTROMECHANICAL PROCESSES IN THE SYNCHRONOUS MOTORS

Аннотация. *Разработана математическая модель синхронного двигателя, позволяющая учитывать и изменять при моделировании параметры электрической машины. Модель реализована в программной среде MATLAB, работает в режиме реального времени и с абсолютными значениями параметров синхронного двигателя.*

Ключевые слова: *моделирование, синхронный двигатель, MATLAB, расчёт параметров.*

Abstract. *The mathematical model of the synchronous motors is developed, allowing to consider and change at modeling parameters of the electric machine. The model is realized in MATLAB program environment, works in a mode of real time and with absolute values of parameters of the synchronous motor.*

Keywords: *modeling, the synchronous motors, MATLAB, calculation of parameters.*

Нормальное функционирование промышленных предприятий в значительной степени зависит от надёжного и бесперебойного электроснабжения. Рост энерговооружённости предприятий ведёт к необходимости повышения мощности энергосистем. При развитии энергосистем увеличивается количество элементов, усложняются взаимосвязи между объектами, повышается вероятность развития аварийных ситуаций. Одним из направлений повышения устойчивости работы единого, взаимосвязанного энергокомплекса производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии является моделирование режимов работы энергообъектов как в статических, так и в динамических режимах. Воспроизведение на моделях режимов, в том числе и аварийных, позволяет оценить надёжность функционирования энергетических комплексов и выработать меры ограничения аварийных ситуаций.

Одним из основных элементов энергокомплекса является синхронная машина (СМ). Синхронные машины в режиме генератора являются основными источниками электроэнергии, синхронные компенсаторы широко используются для регулирования режимов в системах передачи и распределения электроэнергии, а синхронные двигатели (СД) являются приводами многих механизмов, как правило стационарных установок большой мощности. Электротехнические комплексы с синхронными двигателями на промышленном предприятии могут оказывать существенное влияние на режим работы отдельных энергоузлов, а также повышать энергоэффективность их работы. Поэтому моделирование режимов работы СД и исследование различных динамических режимов СД представляет собой важную научно–техническую задачу.

Одним из эффективных инструментов моделирования является среда MATLAB [1]. В этой среде разработаны математические модели многих, в том числе и синхронных, электрических машин. Однако использование готовых моделей не всегда позволяет детализировать процессы работы электромеханических комплексов при более точном учёте параметров электрических машин [2].

Устранить эти недостатки можно разработкой математической модели на основе уравнений Парка – Горева, которая позволит изменять параметры СМ (с учётом теплового состояния, насыщения и т. п.) в процессе моделирования в режиме реального времени.

Основу разработанной математической модели составляют уравнения синхронной машины в осях «*dq*», содержащие параметры машины с физической размерностью [3]:

$$
\begin{aligned}
-e_d &= \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega \cdot \Psi_q + R_1 \cdot i_d;\\
-e_q &= \omega \cdot \Psi_d + \frac{d\Psi_q}{dt} + R_1 \cdot i_q;\\
e_f &= \frac{d\Psi_f}{dt} + R_f \cdot i_f;\\
-e_0 &= \frac{d\Psi_0}{dt} + R_1 \cdot i_0;\\
0 &= \frac{d\Psi_{\acute{y}d}}{dt} + R_{kd} \cdot i_{kd};\\
0 &= \frac{d\Psi_{\acute{y}q}}{dt} + R_{kq} \cdot i_{kq}.
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

На начальном этапе моделирования будем рассматривать упрощенный вариант СД без демпферных обмоток и при симметричной системе питающего напряжения. В этом случае три последних уравнения в системе уравнений (1) будут отсутствовать. В дальнейшем эти ограничения могут быть сняты. Учитывая то, что исходным при моделировании будет двигательных режим, то систему уравнений (1) удобнее представить в виде

$$
\begin{aligned}
&\frac{d\Psi_d}{dt} - \omega \cdot \Psi_q + R_1 \cdot i_d = U_d;\\
&\omega \cdot \Psi_d + \frac{d\Psi_q}{dt} + R_1 \cdot i_q = U_q;\\
&\frac{d\Psi_f}{dt} + R_f \cdot i_f = U_f,
\end{aligned}
\qquad (2)
$$

где U_d и U_q – напряжение сети в системе координат «dq», подаваемое на обмотку статора СД; Ψ_d и Ψ_q – потокосцепления по осям d и q соответственно: $\Psi_d = L_d \cdot i_d + L_{fd} \cdot i_f$; $\Psi_q = L_q \cdot i_q$; Ψ_f – потокосцепление обмотки возбуждения (ОВ): $\Psi_f = L_f \cdot i_f + L_{fd} \cdot i_d$; L_d и L_q – индуктивности самоиндукции по осям d и q; L_f – индуктивность обмотки возбуждения; L_{fd} – индуктивность взаимоиндукции обмоток ротора и статора по оси d; R_1 – активное сопротивление обмотки статора; ω – относительная угловая частота вращения ротора, т. е. разность между синхронной угловой частотой вращения ($\omega_c = 2\pi \cdot f$) и угловой частотой вращения ротора ω_p; R_f – активное сопротивление ОВ; U_f и i_f – напряжение и ток обмотки возбуждения.

Для выполнения более полного анализа режимов работы СД необходимо решать систему дифференциальных уравнений, включающую уравнения напряжений и моментов. Электромагнитный момент определим по известному выражению:

$$
M = \Psi_d \cdot i_q - \Psi_q \cdot i_d. \qquad (3)
$$

Уравнение движения ротора будем учитывать, используя основное уравнение движения электропривода:

$$
M = M_c + J \frac{d\omega_p}{dt}, \qquad (4)
$$

где M_c – момент сопротивления на валу СД; J – момент инерции ротора.

В системе уравнений (2) отсутствует электромагнитная связь между статорными обмотками и обмоткой ротора. Для учёта этого взаимного влияния обмоток статора и ротора выполним следующее:

1) в первое уравнение дополнительно введём индуктируемую электродвижущую силу (ЭДС) от изменения потокосцепления между обмоткой ротора и обмоткой статора по оси d при изменении тока ротора i_f:

$$
e_{fd} = -\frac{d\Psi_{fd}}{dt} = -L_{fd} \frac{di_f}{dt}; \qquad (5)
$$

2) во втором уравнении к потокосцеплению по оси q (Ψ_q) добавим потокосцепление обмотки ротора Ψ_f;

3) в третье уравнение дополнительно введём индуктируемую ЭДС от изменения потокосцепления между обмоткой ротора и обмоткой статора по оси d при изменении тока ротора i_d:

$$
e_{df} = -\frac{d\Psi_{df}}{dt} = -L_{fd} \frac{di_d}{dt}. \qquad (6)
$$

С учётом (3)–(6) перепишем систему уравнений (2) в виде

$$
\begin{aligned}
&\frac{d\Psi_d}{dt} - \omega \cdot \Psi_q + L_{fd} \frac{di_f}{dt} + R_1 \cdot i_d = U_d;\\
&\omega \cdot (\Psi_d + \Psi_f) + \frac{d\Psi_q}{dt} + R_1 \cdot i_q = U_q;\\
&\frac{d\Psi_f}{dt} + L_{fd} \frac{di_d}{dt} + R_f \cdot i_f = U_f;\\
&M = \Psi_d \cdot i_q - \Psi_q \cdot i_d;\\
&M = M_c + J \frac{d\omega_p}{dt}.
\end{aligned}
\qquad (7)
$$

Учитывая число пар полюсов $p_п$ и выражение для угловой частоты вращения ротора ($\omega = \omega_c - \omega_p \cdot p_п$), представим систему уравнений (7) в виде, удобном для решения дифференциальных уравнений в среде MATLAB, заменяя символ дифференцирования оператором p:

$$p\Psi_d = U_d - R_1 \cdot i_d - L_{fd} \cdot pi_f + (\omega_c - p_ï \cdot \omega_ð) \cdot \Psi_q;$$
$$p\Psi_q = U_q - R_1 \cdot i_q - (\omega_c - p_ï \cdot \omega_ð) \cdot (\Psi_d + \Psi_f);$$
$$p\Psi_f = U_f - R_f \cdot i_f - L_{fd} \cdot pi_d; \quad (8)$$
$$p\omega_p = \frac{M - M_c}{J} = \frac{p_ï \cdot (\Psi_d \cdot i_q - \Psi_q \cdot i_d) - M_c}{J}.$$

Принимая за основу систему дифференциальных уравнений (8), позволяющую рассматривать режимы работы СД как в статических, так и в динамических режимах, была разработана математическая модель СД в среде MATLAB, представленная на рис. 1.

Входными параметрами данной модели (рис. 1) являются следующие величины:

– напряжения статора по осям *d* и *q* U_d и U_q, выраженные в вольтах;

– напряжение обмотки ротора U_f, выраженное в вольтах;

– активные сопротивления обмоток статора и ротора R_1 и R_f, выраженные в омах;

– индуктивности по продольной и поперечной осям L_d и L_q, выраженные в генри;

– индуктивность L_{fd}, выраженная в генри;

– частота питающего напряжения *f*, выраженная в герцах;

– момент инерции ротора *J*, выраженный в кг·м^2;

– число пар полюсов p_p;

– момент сопротивления на валу СД M_c, выраженный в Н·м.

Каждый из этих параметров может быть задан константой или изменяющейся по любому заданному закону переменной для учёта теплового состояния машины, насыщения по осям, изменения напряжения статора и возбуждения, момента сопротивления и др. Например, на рис. 1 предусмотрено ступенчатое изменение момента сопротивления M_c и напряжения возбуждения U_f стандартными блоками Step.

Выходными параметрами модели на рис. 1 являются:

– частота вращения ротора n_p, выраженная в об./мин;

– электромагнитный момент СД.

При необходимости модель позволяет значительно расширить количество выходных параметров.

Основу данной математической модели составляет подсистема, программно реализующая решение системы уравнений (8). Внутреннее содержание данной подсистемы представлен на рис. 2.

Для выполнения моделирования и проверки адекватности разработанной модели в качестве исходных параметров были приняты параметры стандартной модели синхронной машины из библиотеки MATLAB (файл power_syncmachine). Параметры данной модели выражены в абсолютных единицах, приведённых к обмотке статора. Окно задания параметров этой машины представлено на рис. 3.

Из параметров стандартной модели в среде MATLAB для разработанной модели некоторые параметры были взяты напрямую, без пересчёта: R_1 = 0,26 Ом; L_d = 0,0137 Гн; L_q = 0,011 Гн;

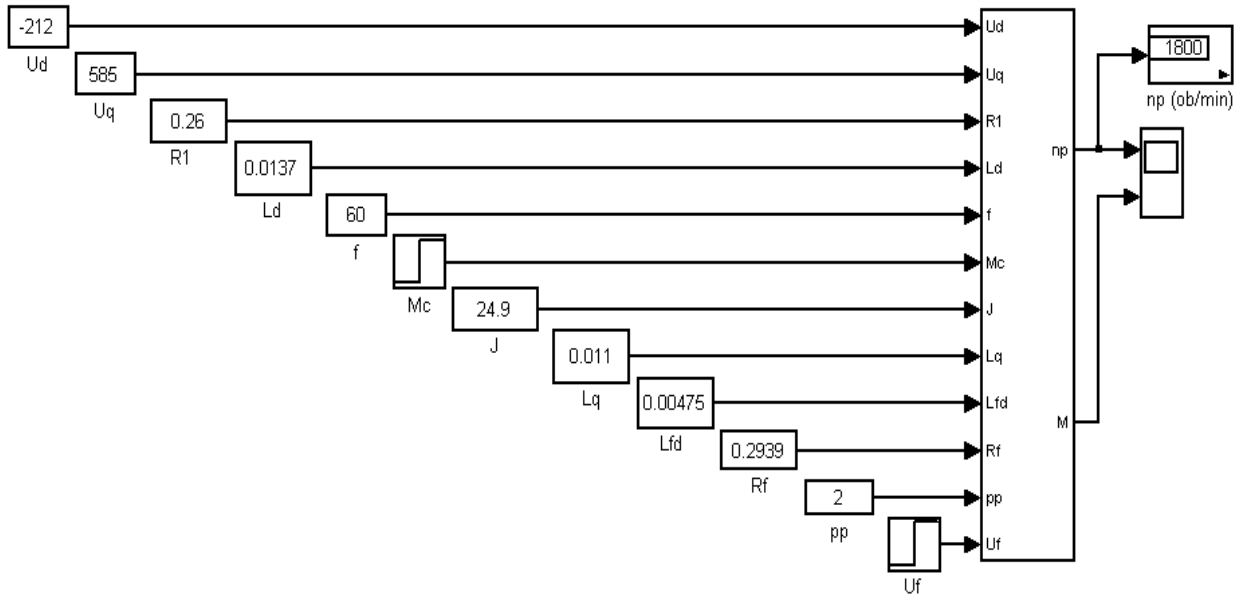


Рис. 1. Виртуальная модель синхронного двигателя

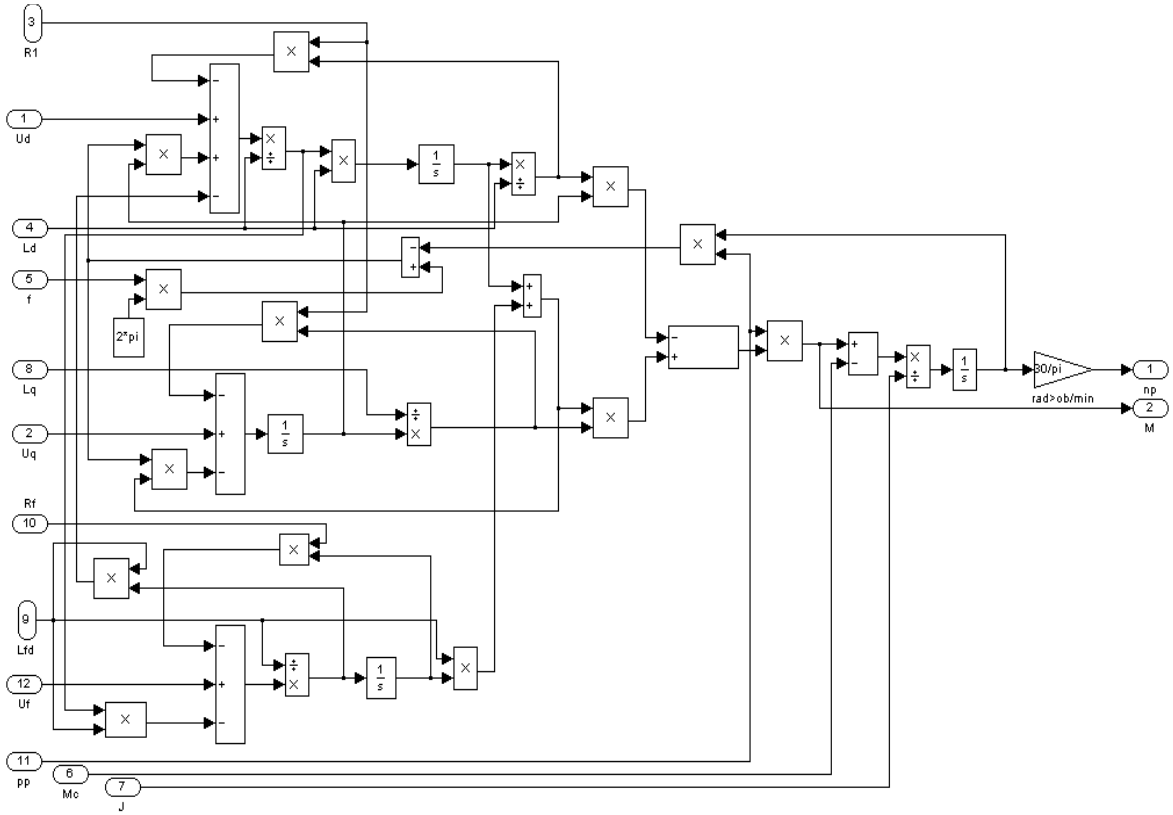


Рис. 2. Подсистема, программно реализующая решение системы дифференциальных уравнений (8)

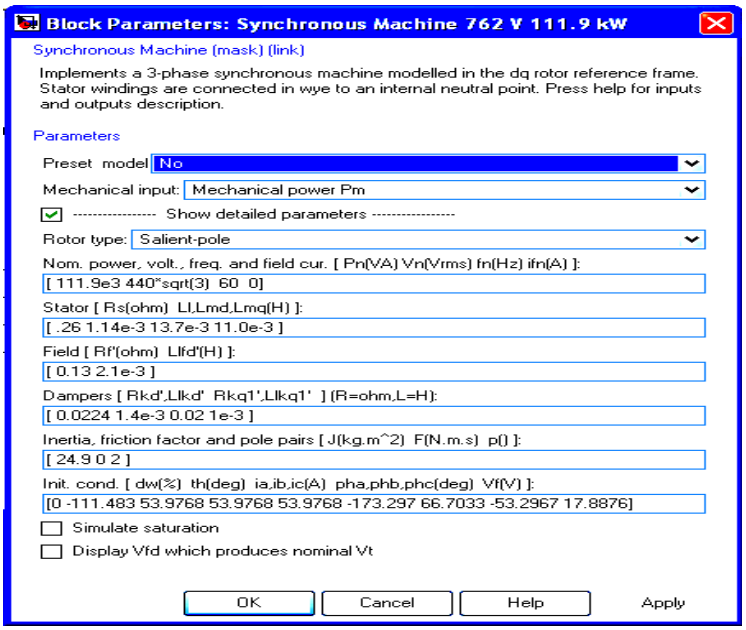


Рис. 3. Окно параметров стандартной модели синхронной машины из библиотеки MATLAB

f = 60 Гц; J = 24,9 кг·м^2; U_f = 17,8876 В; p_p = 2. Значение других параметров предварительно вычислялись, т. к. в стандартной модели MATLAB они представлены приведёнными к обмотке статора, а в разработанной модели параметры подставляются в абсолютных единицах. В результате вычисления (через коэффициенты приведения) получены следующие значения: R_f = 0,2939 В; L_{fd} = 0,00475 Гн. Значения U_d = –212 В и U_q = 585 В вычислены с использованием преобразования из трёхфазной системы напряжений Vabc в систему напряжений Vd Vq Vo стандартными блоками abc_to_dqo Transformation из библиотеки MATLAB (SimPowerSystem / Extra Library / Discrete Measurements) [1].

Результаты расчёта U_d и U_q с использованием стандартных блоков MATLAB представлены на рис. 4.

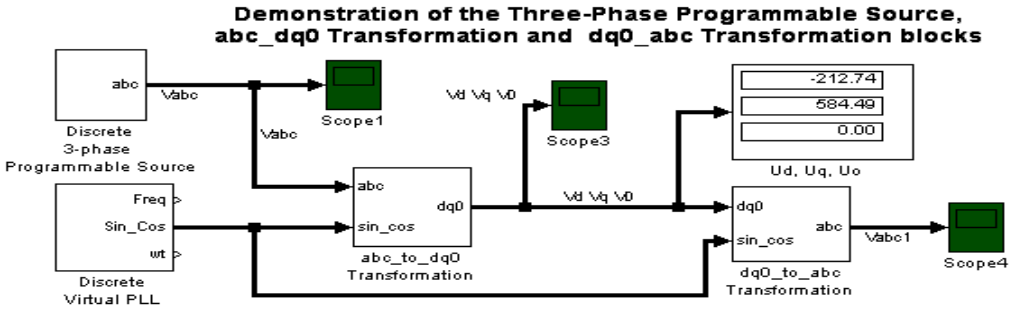


Рис. 4. Модель преобразования трёхфазной системы напряжений Vabc в систему напряжений Vd Vq Vo с использование стандартных блоков MATLAB

Трёхфазное напряжение при стандартном преобразовании (рис. 4.) было задано стандартным дискретным 3–х фазным программируемым источником – блоком Discrete 3–phase Programmable Sourse. Окно программируемых параметров этого блока представлено на рис. 5.

Задаваемыми параметрами трёхфазного источника напряжения являются: амплитуда в вольтах, начальная фаза в градусах и частота в герцах. Для моделируемого двигателя были заданы: амплитуда фазного напряжения $U_m = 440 \cdot \cdot\sqrt{2} = 622\,B$, начальная фаза – 110^0 (выбрана произвольно) и частота f = 60 Гц (см. рис. 5). В результате расчёта получено: U_d = –212,74 и U_q = 584,49 В (см. рис. 4).

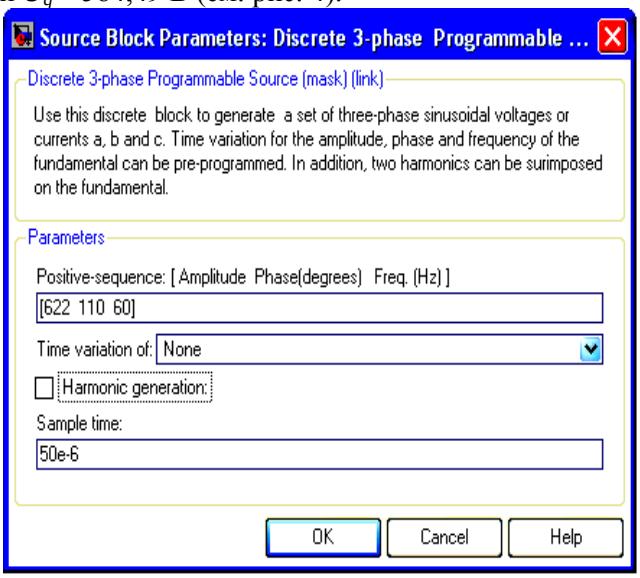


Рис. 5. Окно программируемых параметров трёхфазного источника напряжения

С использованием разработанной модели и алгоритма расчёта входных параметров в физических единицах, были исследованы следующие режимы работы СД:

1. Асинхронный пуск СД без возбуждения и на холостом ходу (ХХ). Осциллограммы частоты вращения ротора n_P и электромагнитного момента M приведены на рис. 6. Из рис. 6 видно, что время разгона до подсинхронной частоты вращения $n_{\text{рп/с}}$ = 1760 об./мин

$$(n_{P\Pi/C} = 0{,}978 \cdot n_c = 0{,}978 \cdot \frac{60 \cdot f}{p_\Pi} = 0{,}978 \cdot \frac{60 \cdot 60}{2} = 1760\ об/мин)$$

составляет 43,75 с.

2. Пуск на ХХ с поданным номинальным напряжением в обмотку возбуждения в момент времени t = 0. Осциллограммы частоты вращения и электромагнитного момента для данного случая приведены на рис. 7. Из рис. 7 видно, что время разгона до подсинхронной частоты вращения значительно уменьшилось и составляет около 10 с, после чего двигатель успешно втягивается в синхронизм и ротор вращается с синхронной частотой вращения 1800 об./мин.

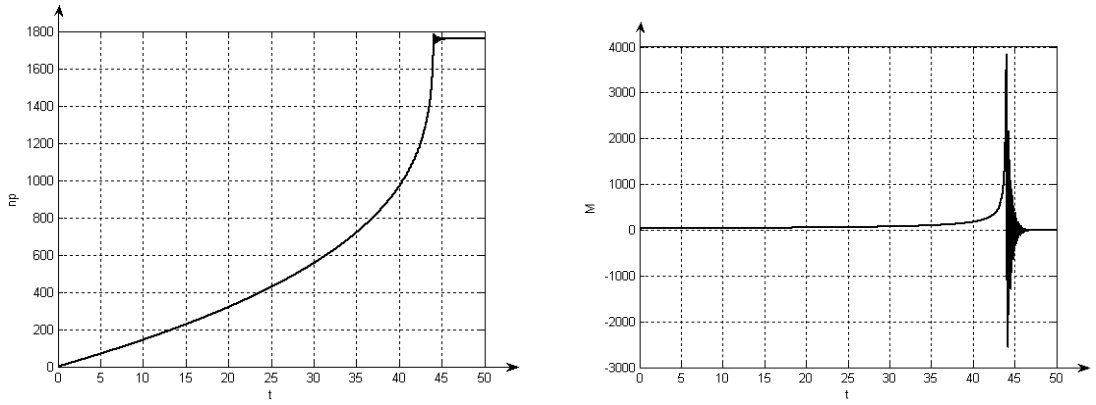
3. Асинхронный пуск СД на ХХ до подсинхронной скорости и подача номинального возбуждения в момент времени t = 50 с, после чего СД втягивается в синхронизм. Осциллограммы частоты вращения ротора и электромагнитного момента для этого случая приведены на рис. 8.

Результаты проведённого моделирования подтверждают адекватное протекание электромеханических процессов в разработанной модели синхронного двигателя.

Основные результаты вышеизложенного можно сформулировать следующим образом.

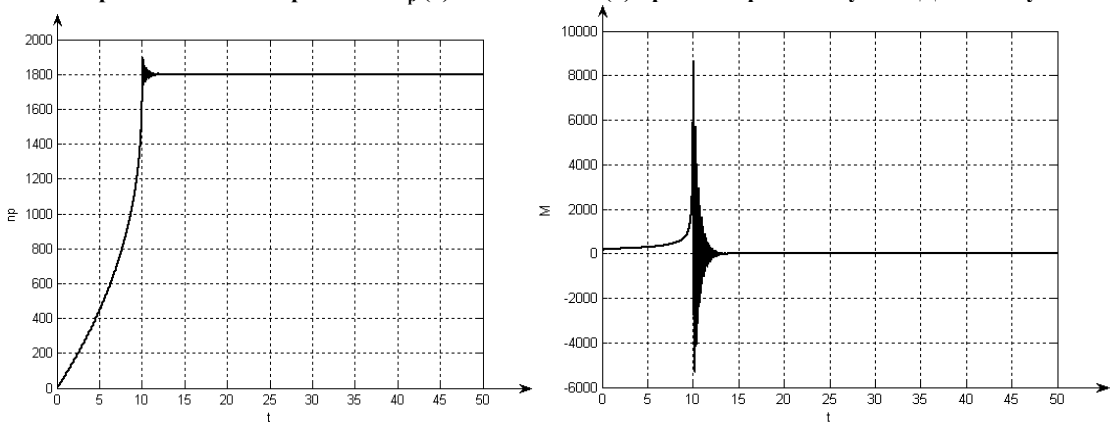
Разработана математическая модель синхронного двигателя, позволяющая учитывать и изменять при моделировании в режиме реального времени параметры электрической машины (тепловое состояние, насыщение и др.). Модель реализована в программной среде MATLAB, работает в режиме реального времени и с абсолютными значениями параметров СД.

Адекватность разработанной модели подтверждена результатами моделирования пуска синхронного двигателя при различных условиях.



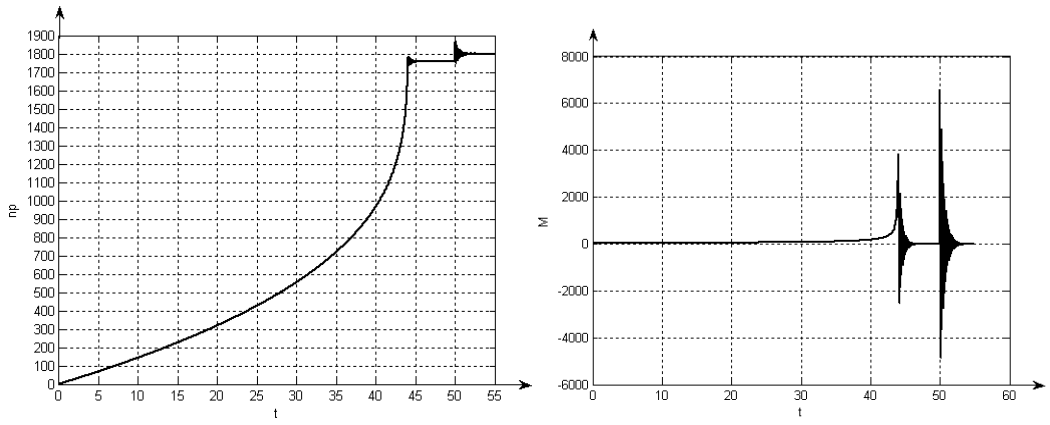
а) **б)**

Рис. 6. Осциллограммы частоты вращения $n_р$ (а) и момента М (б) при асинхронном пуске СД без возбуждения на ХХ



а) **б)**

Рис. 7. Осциллограммы частоты вращения $n_р$ (а) и момента М (б) при пуске СД с номинальным возбуждением на ХХ



а) **б)**

Рис. 8. Осциллограммы частоты вращения $n_р$ (а) и момента М (б) при асинхронном пуске СД на ХХ с последующей подачей номинального возбуждения

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink [текст] / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс: СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
2. Возбуждение и устойчивость электромеханических комплексов с синхронными двигателями [текст] / Б.Н. Абрамович [и др.]; под общ. ред. Б.Н. Абрамовича – СПб.: Изд–во Политехн. ун–та, 2010. – 127 с.
3. Важнов, А.И. Основы теории переходных процессов синхронной машины [текст] / А.И. Важнов. – М. – Л.: Государственное энергетическое издание, 1960. – 312 с.

УДК 681.5.013

Мухопад Александр Юрьевич,
к. т. н., ст. преподаватель Иркутского государственного университета путей сообщения, тел. 89021724553, e–mail: jcmg@mail.ru
Мухопад Юрий Федорович,
д. т. н., заслуженный деятель науки РФ, профессор
Иркутский государственный университет путей сообщения, тел. 89500500291, e–mail: bts48@mail.ru

КОНСТРУКТИВНЫЕ МЕТОДЫ СИНТЕЗА АВТОМАТОВ УПРАВЛЕНИЯ НА БОЛЬШИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ

A.Yu. Muckopad, Yu.F. Mukhopad

CONSTRUCTIVE METHODS OF SYNTHESIS AUTOMATION MANAGEMENT ON GREATER INTEGRAL SCHEME

Аннотация. *Рассматриваются автоматы Мура с выделенным мультиплексором. Предлагается структурная организация автоматов Мили с выбором единственного входного логического условия по коду состояния автомата. Приводится функциональная организация единой комбинационной схемы в новой структуре автомата Мили.*

Ключевые слова: *автоматы управления, алгоритм, комбинационная схема, структурный анализ, синтез.*

Abstract. *Microprogrammed automatons of Moore are considered with chosen by multiplexor. Structured organization automaton of Meely is offered with choice of the single input logical condition on code of the condition of the automaton. The functional organization of the united combinational scheme in new structure of the automaton of Meely is given. Efficiency of the proposed methods of the automaton synthesis is valued by value of the reduction of the volume ROM (PLM).*

Keywords: *automatons of management, algorithm, combinational scheme, structured analysis, synthesis.*

В настоящее время возникла необходимость пересмотра существующих методик проектирования аппаратных средств обработки информации и устройств управления ими, т. к.:

- существенно усложнилась структурная организация автоматизированных систем за счёт расширения функциональных возможностей и сервисных операций, что привело к использованию более сложных алгоритмов;
- наличие элементной базы с высоким уровнем интеграции (микроконтроллеры, логические программируемые интегральные схемы, ПЛИС, ПЗУ и ПЛМ большого объёма и др.) требует нового подхода к анализу и синтезу цифровой схемотехники.

Глубокие наукоёмкие исследования [1–5] в области теории автоматов, ориентированные на среднюю интегральную схемотехнику, становятся неконструктивными при переходе к БИС.

Управляющие автоматы для технологических процессов со специализированными средствами обработки информации реализуются по структуре Мура. Для автоматов Мура аналитическая запись функциональных зависимостей имеет вид

$$a(t + 1) = F_1(a(t), \alpha_1\, \alpha_2 \ldots\, \alpha_q),$$
$$A(t) = F_2\,(a(t)), \qquad (1)$$

где a(t), a(t + 1) – состояния автомата в настоящий (t) и следующий после импульса синхронизации (t + 1) момент времени;

A(t) – выходная команда управления операционным устройством (ОУ);

α_1, α_2,…, α_q – входные логические условия (переменные);

F_1, F_2 – булевы функции переходов $a(t) \rightarrow a(t + 1)$ и выходов $y_1, y_2, \ldots, y_m$.

Структурный анализ микропрограммных автоматов управления (МПА) существенно упрощается и становится конструктивно целенаправленным при представлении МПА структурной моделью Ю.Ф. Мухопада [11, 26] в виде функциональной (Ф), информационной (И), логической (Л), адресной (А) и управляющей (У) подсистем.

Для автоматов Мура объём схемы F_1 (А – адресная подсистема) при её реализации на ПЗУ или ПЛМ оценивается величиной $V = m2^{m+q}$ бит.

При числе состояний автомата $N > 32$ (разрядность кода памяти состояний $m = 6$) и числе логических условий $q = 16$ величина $V = 6 \cdot 2^{22} =$

= 24 мегабит. Поэтому все усилия теории автоматов при синтезе направлены на снижение сложности реализации F_1 за счёт минимизации системы булевых функций [1–5, 8, 9] или представления единой F_1 комплексом более простых комбинационных схем (декомпозиция) с меньшим числом логических переменных на входах [5, 10–12, 20, 22]. Минимизация булевых функций при q = 12–16 и m = 5–6 не даёт даже 10 % эффекта, а наиболее эффективные методы декомпозиции [10–12] позволяют снизить объём ПЗУ (ПЛМ) лишь в 1,5–1,7 раза. Принципиально новый метод синтеза автоматов со снижением объёма ПЗУ (ПЛМ) предложен в работах [11–15].

Снижение сложности реализации на БИС комбинационной схемы переходов F_1 достигается за счёт специальных преобразований заданной граф-схемы алгоритма управления. Преобразования дают возможность ввести мультиплексор для выбора единственного $\alpha_j \in \{\alpha\}$ по коду состояния a(t). В этом случае объём памяти ПЗУ или ПЛМ необходимый для реализации F_1 снизится с $V = m2^{m+q}$ до $W = m2^{m+1}$, где q – количество логических условий в конкатенации $\alpha_1,\alpha_2, \ldots, \alpha_q$, где m – разрядность кода a(t). Как видно объём БИС ПЗУ (ПЛМ) снижается в $Q = 2^{q-1}$ раз. Для q = 8, величина Q = 128, для q = 12 – Q = 2048, и для q = 16 – Q > 32 000 раз.

Здесь в автоматах Мура с мультиплексором снижается быстродействие в k раз, где $k = (N_1 + N_2)/N_1$. N_1 – число операторов действия на самом длинном пути, N_2 – число введённых пустых операторов при преобразовании граф–схемы алгоритма (ГСА). Для известных ГСА величина k = 1,2–1,8. Можно избежать столь значительного снижения быстродействия за счёт пропуска периода при фиксации кода пустого оператора.

Преимущества автомата Мура как управляющей подсистемы для управления технологическими системами заключаются в следующем:

1) возможность выбора в соответствии с характеристиками объекта управления ОУ (1), времени исполнения команды управления, равного $T - 2\tau$, где T – период следования импульсов синхронизации, τ – длительность импульса синхронизации. При использовании реле для исполнения микроопераций (включение и отключение двигателей и др. механизмов) значение $T = 1–4$ мс $= (1–4)\cdot10^{-3}$ с. Значение $\tau = 0{,}1–0{,}05$ мкс $= (1–0{,}5)\cdot10^{-7}$ с.
2) Наличие только одной сложной комбинационной схемы для реализации А-подсистемы. Вторая комбинационная схема F_2 – для формирования A_j реализуется с помощью дешифратора a(t) и набора элементов «ИЛИ», объединяющих те выходы дешифратора, которым соответствует одна и та же микрооперация при разных состояниях автомата.

Повышение быстродействия МПА по схеме Мура может быть осуществлено за счёт использования параллельной памяти [11] для кодов a(t), a(t + 1). Однако в ряде случаев и этих мер оказывается недостаточно для сверхбыстродействующих систем, применяемых для обработки радиосигналов в сверхскоростной связи, радиотехнических цифровых фильтрах и др. В таких системах требуется чтобы микрокоманда начала исполнятся сразу в начале перехода $a(t) \rightarrow a(t + 1)$ т. е. по переднему фронту импульса. В этом случае автоматы реализуются со структурной организацией Мили [1–5].

Автоматы Мили (рис. 1) имеют аналитическую зависимость вида

$$a(t + 1)=F_1(a(t), \alpha_1 \alpha_2 \ldots \alpha_q) \qquad (2)$$
$$A(t)=F_2(a(t)), \alpha_1 \alpha_2 \ldots \alpha_q)$$

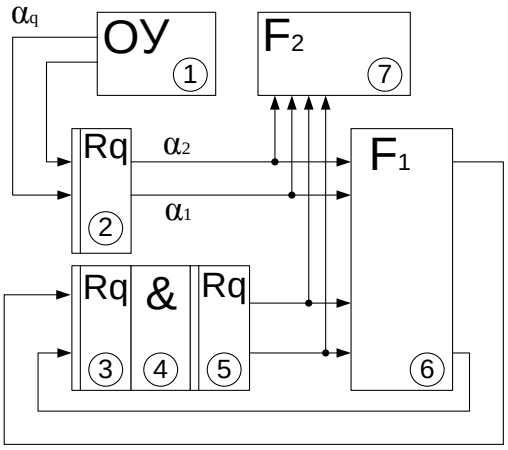


Рис. 1. Структурная схема автомата Мили

В работе [15] предлагается инженерная классификация МПА на сверхпростые (СП), простые автоматы (ПА), средней сложности (СС) и сложные автоматы (СА).

Оценка сложности F_1 и F_2 для них по формуле $V = m2^{m+q}$ приведена в табл. 1. Оценка дана для автоматов Мили, т. е. для 2V в килобитах объёма БИС ПЗУ при независимой реализации как F_1 так и F_2.

Зависимость от $\{\alpha\}$ как F_1, так и F_2 накладывает определенные ограничения на применение методики с мультиплексором к МПА Мили.

На рис. 2 представлена граф-схема алгоритма (ГСА) с разметкой для автомата Мили, выполненной по известной методике [4, 5].

Для перехода к структуре МПА с выделенным мультиплексором, так же как и для МПА Му-

Таблица 1

МПА	m	q	m+q	m+1	2V	2W
СП	3	4	7	4	0,768	0,182
ПА	4	8	12	5	9,182	0,256
СС	5	12	17	6	1 536	0.640
СА	6	16	22	7	24 000	1 536

ра, после каждого логического условия α_i введем пустой оператор, если от α_i идет непосредственная передача управления на α_j без промежуточного оператора действий $A_j \in \{A\}$. Заметим, что в отличие от методики [8, 9] для МПА Мили нет необходимости включения пустого оператора в том случае, если к $\alpha_j \in \{\alpha\}$ идет передача управления от нескольких операторов. Это определяется отличием формирования состояния в автоматах Мура и Мили.

Это же отличие определяет правило разметки ГСА для автоматов Мили. Номера состояний соответствующих переходам, необходимо расставить так, чтобы по каждому предыдущему состоянию осуществлялась проверка безусловного перехода или перехода по единственному $\alpha_j \in \{\alpha\}$.

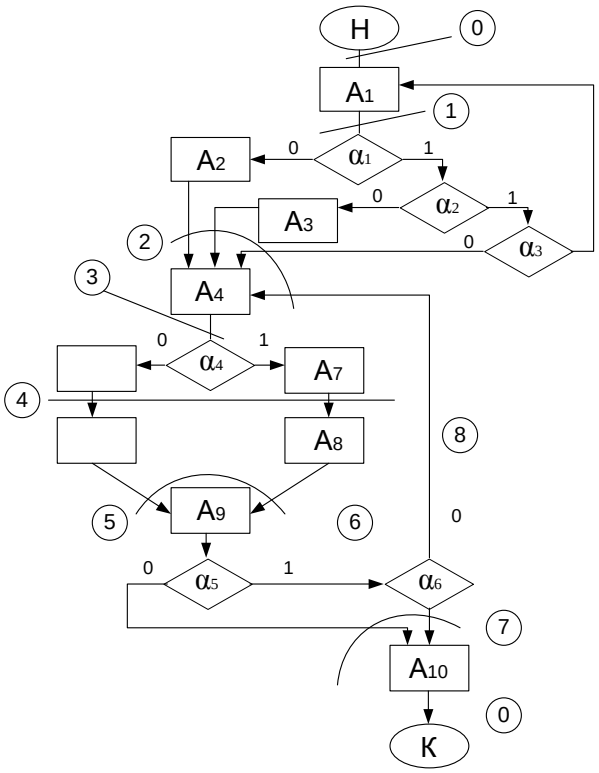


Рис. 2. Граф-схема алгоритма управления операционным устройством

Причем не может быть допущена ситуация, когда из одного и того же состояния имеются как условные, так и безусловный переход в следующие состояния. Например, в ГСА рис. 2 недопустимо объединение 3-го и 9-го переходов.

Объединение 5-го и 10-го состояний для этого примера возможно, но оно не выполнено, т. к. привело бы к усложнению графа переходов (рис. 4).

Как видно из графа переходов (рис. 4), в МПА Мили каждому состоянию a(t) приписано единственное $\alpha_j \in \{\alpha\}$ в отличие от классического варианта, в котором переходы $a(t) \rightarrow a(t + 1)$, осуществляются при проверке значений нескольких логических условий (рис. 2).

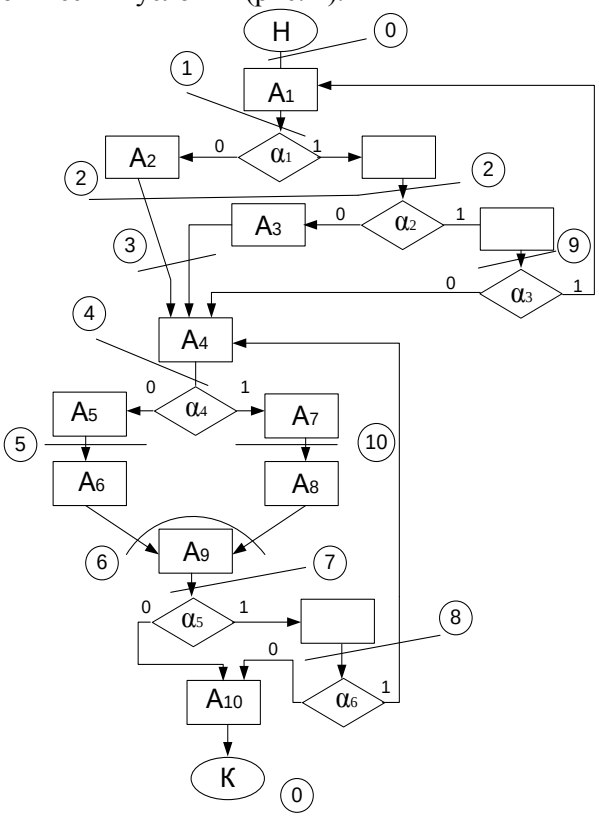


Рис. 3. Алгоритм управления для МПА с мультиплексором

Графу переходов (рис. 4) соответствует структурная схема МПА (рис. 5), где F_3 – кодирующая схема для текущего преобразования номера a(t) в номер выбираемого логического условия (перенумерация). В этом случае аналитическая запись работы МПА примет вид

$$a(t + 1) = F_1 (a(t), \alpha_j); A(t) = F_2 (a(t), \alpha_j); \quad (3)$$
$$j = F_3 (a(t)).$$

МПА с m > 64 целесообразно декомпозировать методом разделения ГСА на части [10–12]

либо выделением обобщённых операторов [20]. Тот или другой метод выбирается с учётом специфики ГСА.

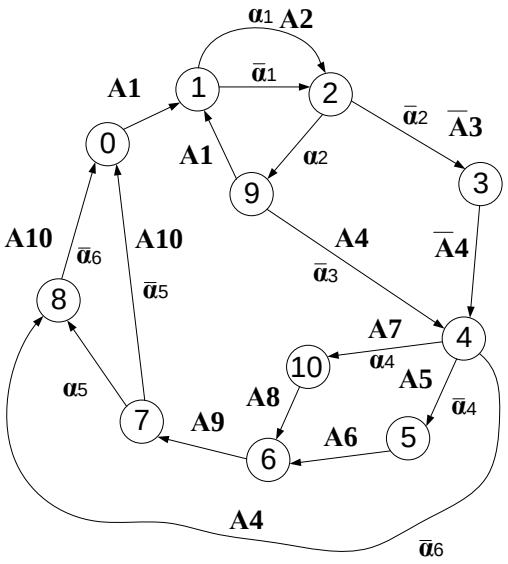


Рис. 4. Граф переходов МПА Мили

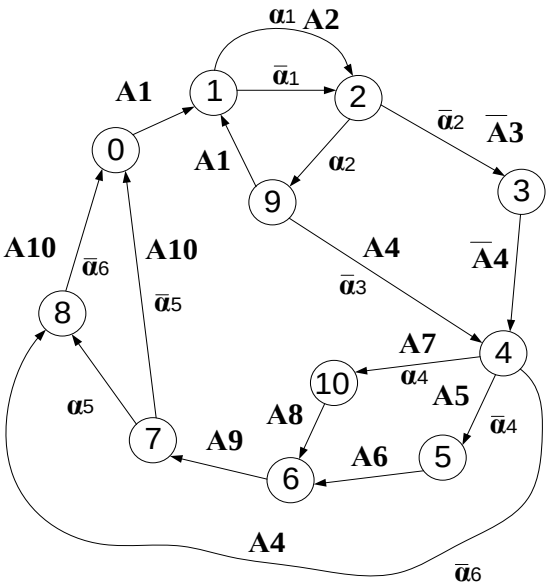


Рис. 5. Граф переходов МПА с мультиплексором

Возможна реализация МПА с мультиплексоров, но без схемы F_3, если перенумеровать α_j в соответствии предшествующей проверке α_j номеру состояния a(t). При этом потребуется специальное подсоединение α_j к информационным входам мультиплексора. Для рассматриваемого примера α_1 α_2 α_3 α_4 α_5 α_6 подсоединяются соответственно к информационным входам мультиплексора 1, 2, 9, 4, 6, 8 и $\alpha_0 = 0$ к остальным входам. Однако вариант без схемы применим лишь тогда, когда сумма затрат на F_3 с традиционным подключением мультиплексора больше затрат на сложный мультиплексор без F_3.

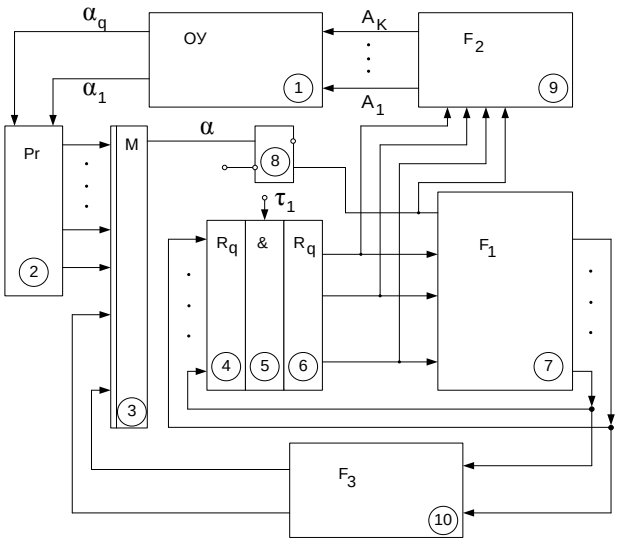


Рис. 6. Автомат Мили с мультиплексором

МПА с мультиплексором позволяют существенно упростить совместную реализацию схем F_1 и F_2. Действительно, поскольку каждому состоянию a(t) соответствует единственное $\alpha_j(t)$ или безусловный переход α_0, то функциональную схему F_1 и F_2 можно представить виде рис. 7.

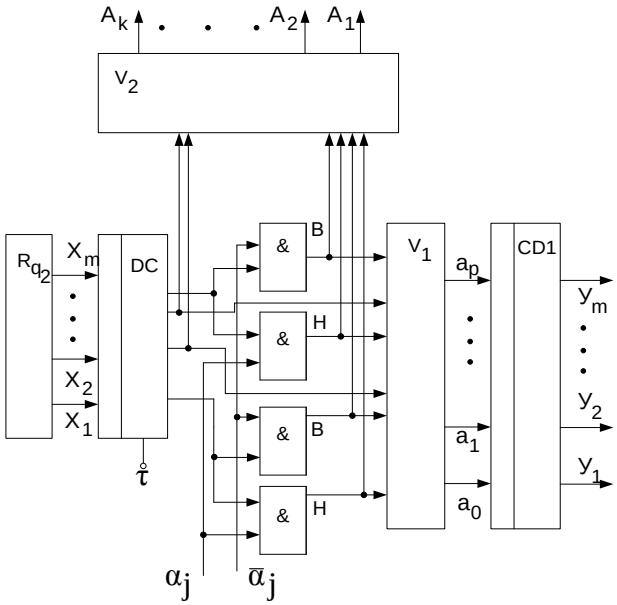


Рис. 7. Комбинационная схема автомата Мили с мультиплексором

Сигналы α_j (i = $\overline{1p}$) состояний a(t) разделяются схемами «И» на α_j a(t) и $\overline{\alpha}_j$ $a_i(t)$, которые соответствуют переходам $a(t) \rightarrow a(t+1)$. Переходы в одно состояние $a_j(t+1)$ объединяются в первом блоке схем ИЛИ1 и через дешифратор CD образуют выходы $y_1y_2\ldots y_n$, а через второй блок схем ИЛИ2 формируются выходные сигналы на основании графа переходов и выходных функций

рис. 5. Хотя в схеме рис. 6 α_j и $\overline{\alpha(t)} \in \{\alpha\}$ подаются одновременно на схемы «И» всех выходов a_1, a_2, …, a_p срабатывают лишь те, которым будет подан импульс $a_i(t)$ по сигналу синхронизации τ для дешифратора DC.

Конкретное подключение к выходам $a_i(t)$ и к выходам блоков схем ИЛИ1 и ИЛИ2 очевидно из анализа графа рис. 4. Количество пар схем «И» при a(t) определяется не числом всех состояний автомата, а числом тех состояний в графе переходов, выходы которых разделяются на два по условиям $\alpha_j \in \{\alpha\}$. В примере это пять вершин из одиннадцати, т. е. число таких пар всегда равно величине q.

Такая структурная организация блока F_1 и F_2 позволяет дополнительно уменьшать оборудование комбинационных схем автомата Мили с мультиплексором. Предложения авторов по структурной организации микропрограммных автоматов с применением мультиплексора для выбора единственного логического условия по коду состояния автомата применимы как к автоматам Мура, так и к автоматам Мили. Более того, такая структурная организация позволяет не только уменьшить объем комбинационных схем в 2^{q-1} раз, но и обеспечивает возможность существенного упрощения на функциональном уровне единой комбинационной схемы автомата.

Предложенные конструктивные методы декомпозиции граф-схем алгоритмов и методы модификации граф-схем с целью выбора единственного логического условия из заданного множества входных условий для автомата позволяют достичь существенного снижения затрат оборудования при реализации МПА. Как было показано, для автоматов средней и высокой сложности с числом логических условий 12–16 при числе состояний 32–64 удается упростить комбинационные схемы в сотни и даже в тысячи раз. А значит, можно выбирать БИС с меньшей степенью интеграции для реализации автоматов, что, безусловно, приведет к повышению надежности.

Сегодня уровень интеграции БИС не накладывает ограничений на реализацию МПА и по классическим схемам с числом комбинаций на входе $K = 2^{m+q}$. Однако, как известно, рассеиваемая мощность на кристалле БИС соответствует ~ ~ 4 мкВт на вентиль [7]. Для БИС, содержащей более 10 млн вентилей, рассеиваемая мощность может составлять единицы ватт. Имеются быстродействующие БИС с технологией ЭЛС, которые не могут быть применены без охлаждения, т. к. рассеиваемая мощность на кристалле доходит до 2–4 Вт. Использование БИС с меньшим уровнем интеграции для реализации МПА снимает проблему теплоперегрева и позволяет повысить надежность за счет значительного снижения количества вентилей.

В новой структурной организации МПА [13] более эффективно решаются как вопросы встроенного контроля [20, 21, 23], так и организации управления в специализированных вычислительных средах и системах [22, 24, 27–30].

Следует также отметить тот факт, что предлагаемые методики синтеза МПА дают возможность реализации сложных автоматов и в СВЧ-диапазоне [17], и в пневмоавтоматике [18], где до сих пор не достигнут уровень интеграции даже средних БИС.

Упрощаются методики моделирования МПА на персональных ЭВМ. Существующие методики [2–4] основаны на программных способах вычисления значений систем булевых функций (y_1, y_2, …, y_m) от конкатенации переменных (α_1, α_2, …, α_q, x_1, x_2, …, x_m). Даже для m = 5, q = 12 количество комбинаций которое необходимо учитывать для вычисления единственной y_j равно $K = 2^{17} \approx 130$ тыс. Такая программа сложна и практически нереализуема на микроконтроллерах. Для предложенной методики $K = 2^{m+1}$. Для того же примера m = 5, $K = 2^6 = 64$. Поэтому выходные значения y_1, y_2, …, y_m могут определяться на микроконтроллере методом простого считывания из заранее вычисленных таблиц.

Один из вариантов такой программы на языке Си приведен в работе [19]. Программа обладает не только простотой, но и относительно высоким быстродействием. Поэтому для автоматов Мура допустима реализация МПА программным методом на 8-разрядных логических (упрощенных) микроконтроллерах.

Заключение

Предложена новая эффективная методика синтеза автоматов управления, основанная на выборе через мультиплексор единственного логического условия из всего множества входных переменных. Методика синтеза позволяет применить метод прямого табличного считывания результата, как в аппаратной, так и в программной реализации автоматов, т. к. на входах комбинационных схем число переменных не превосходит 7 даже для сложных автоматов, независимо от числа логических условий. Реализация автоматов управления возможна на БИС с малым уровнем интеграции, что обеспечивает высокий уровень надежности и уход от проблем теплоперегрева.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Закревский А.Д. Анализ и синтез каскадных систем. М.: Наука, 1981. – 386 с.
2. Горбатов В.А., Горбатов А.В., Горбатов М.В. Теория автоматов. М.: Астрель, 2008. – 559 с.
3. Соловьев В.В., Климович А. Проектирование цифровых систем на ПЛИС. М.: Горячая линия Телеком, 2008. – 375 с.
4. Шалыто А.А. Логическое управление. Методы аппаратной и программной реализации алгоритмов управления СПб. : Наука, 2000.
5. Баранов С.И., Скляров В.А. Янцен Н.Я. Синтез автоматов на элементах с матричной структурой/ Проектирование функционально ориентированных вычислительных систем. – Л. : ЛГУ, 1990, – С. 90–108.
6. Карпов Ю.Г. Теория автоматов. СПб.: Питер, 2003. – 206 с.
7. Угргомов Е.П. Цифровая схемотехника. СПб.: БХВ. –Питер, 2010. – 797 с.
8. Ачасова Л.Б. Алгоритмы синтеза автоматов на ПЛМ. М.:Сов.радио., 1987. – 135 с.
9. Рыцар Б.Е., Кметь А.Б. Новый метод кодирования подфункций в задачах синтеза на ПЛМ. Кибернетика и системный анализ. – 2003. – №2, С. 63–89.
10. Мухопад Ю.Ф., Бадмаева Т.С. Синтез автоматов по декомпозированной схеме алгоритмов // Информационные системы контроля и управления. Иркутск. ИрИИТ, 2002. – С. 14–25.
11. Мухопад Ю. Ф. Теория дискретных устройств. Иркутск, ИрГУПС. – 2010, – 172 с.
12. Мухопад Ю. Ф. Микроэлектронные системы управления. – Братск, БрГУ, 2009. – 285 с.
13. Мухопад А. Ю. Мухопад Ю. Ф. Микропрограммный автомат. Патент полезн. модель РФ №82888 БИ №13. – 2009.
14. Мухопад А.Ю., Мухопад Ю.Ф. Метод синтеза сложных автоматов – Новосибирск: Научный вестник НГТУ, 2009. – №3(34). – С. 38–41.
15. Мухопад А. Ю. Структурный синтез автоматов управления системами обработки информации реального времени. – Автореферат канд. диссерт. Братск, БрГУ, 2010. – 19 с.
16. Mukhopad Yr. F. Mukhopad A. Yr. Microelectronic controlling of realtime complicated technical systems / International journal of applied and fundamental research (JSSN 1996–3955), 2009. – №2. – P. 26–29,
17. Мухопад Ю.Ф Накопитель для радиочастотного ПЗУ // Микропроцессорные системы контроля и управления на транспорте. –Иркутск; ИрИИТ, 2000. – С.129–135.
18. Мухопад Ю.Ф., Комков А.В., Бовкун А.Ф. Программная матрица для пневматических систем дискретного действия. Пат.полезн.модель №62717РФ БИ №12,2007, №64792 РФ БИ №19,2007, №63307 РФ БИ №15, 2007.
19. Мухопад Ю.Ф., Полетаев А.Ф., Мухопад А.Ю.Алгоритм моделирования автомата в системе управления операционным устройством. Свид.регистр.электр.ресурса №15737, ИНиМ-РАО 25.05.2010. – А.С. №1410101 СССР, 1988, БИ №26
20. Бадмаева Т.С., Деканова Н.П., Мухопад Ю.Ф. Синтез самоконтролируемых систем управления электроавтоматикой. – Иркутск : СЭИ СО-РАН, 2003. – С. 93–98.
21. Сапожников В. В. Кравцов Ю. М. Сапожников Вл. В. Теория дискретных устройств ж.д. автоматики, телемеханики и связи. М. : Транспорт, 2000. – 385 с.
22. Попков В.К., Мухопад Ю.Ф. Специализированные вычислительные среды. – Улан–Удэ: Бурятское книжное издательство, 1982. – 189 с.
23. Мухопад Ю.Ф., Мухопад А.Ю., Бадмаева Т.С. Самоконтролируемый автомат управления. Патент полезн.модель № 63588 БИ № 15, 2007.
24. Мухопад Ю.Ф., Пашков Н.Н., Пунсык–Намжилов Д.Ц. Ассоциативный автомат децентрализованного управления системой автономных вычислительных процессов. – Новосибирск: Научный вестник НГТУ, 2008, №4(33). – С. 61–64.
25. Мухопад А.Ю. Метод динамического контроля автоматов управления / Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте. – Иркутск: ИрГУПС, 2010. вып 17, С. 139–142.
26. Мухопад Ю.Ф. Системный анализ управляющих устройств дискретной автоматики. Там же. С. 79–91.
27. Попков В.К. Применение теории S–гиперсетей для моделирования сетевой структуры / Проблемы информатики. – Новосибирск: Ин–т вычислит.матем. и матем.геофизики СО РАН, 2010, вып. 4, С. 17–40.
28. Мухопад Ю.Ф., Пашков Н.Н., Сизых В.Н. Адаптивный подход к нейронному управлению абсолютно устойчивых систем/ Фундаментальные исследования. – М. : Изд–во РАЕ, 2010 №8, ч. 1. – С. 139–147.
29. Синтез управляющих устройств в однородных средах/ Ред. В.И. Сифоров. – М.: Наука, 1984. – 166 с.
30. Барский А.Б. Логические нейронные сети. – М. : Интернет–Университет Информационных технологий; БИНОМ, 2007. – 352 с.

УДК 621.311.1

Деканова Нина Петровна,
д. т. н., профессор, профессор кафедры информатики ИрГУПС,
тел. 8 (3952)-63-83-95, доб. (1-29), e-mail: dekanova_n@irgups.ru
Хан Вениамин Владимирович,
к. т. н., доцент кафедры городского строительства и хозяйства НИ ИрГТУ,
тел. 8 (3952)-40-52-17, e-mail: khan@istu.edu

ПОДХОДЫ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ В ЗАДАЧАХ ДИАГНОСТИКИ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ И ОБЪЕКТОВ ТЕПЛОПОТРЕБЛЕНИЯ

N.P. Dekanova, V.V. Khan

FUZZY SETS THEORY APPROACHES TO HEAT SUPPLY NETWORK AND HEAT CONSUMPTION OBJECT DIAGNOSTIC PROBLEM

Аннотация. *В статье представлен подход к решению задач идентификации моделей гидравлического и теплового состояния систем теплоснабжения на основе теории нечетких множеств. Предложены зависимости для функций принадлежности поправочных коэффициентов к оценкам теплопотребления объектов и других параметров их функционирования. Рассматриваются результаты диагностирования системы теплоснабжения г. Байкальска.*

Ключевые слова: *нечеткие множества, функции принадлежности, системы теплоснабжения, гидравлические и тепловые режимы.*

Abstract. *The fuzzy sets theory approaches to solve the problems of identification of hydraulic and thermo-regimes models of heat supply systems are presented in the paper. Membership functions for transformation factors of objects heat consumption and other parameters of network are suggested. Results of heat supply system of Baikalsk city diagnosis are discussed.*

Keywords: *fuzzy sets, membership functions, heat supply systems, hydraulic and thermo regimes models.*

Введение

Диагностика и определение путей снижения тепловых потерь относятся к числу важнейших факторов обеспечения экономической эффективности систем транспорта тепловой энергии и объектов теплопотребления. С математической точки зрения, факт возникновения нештатной ситуации (превышение нормативного уровня потерь) может быть представлен как выход вектора качества за пределы допустимой области [1, 2]. Компонентами вектора качества могут быть параметры, соблюдение которых определяет качество функционирования рассматриваемой системы (температура и давление рабочих сред в определенных зонах системы, на конкретном участке трубопровода; расход тепловой энергии и т. д.).

В общем случае задачу диагностирования теплового состояния зданий можно сформулировать следующим образом. Состояние объекта описывается вектором состояния, компонентами которого являются параметры функционирования системы: температура, расход и давление теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах на различных участках, теплопотери через ограждающие конструкции и с теплоносителем. Параметры функционирования являются функциями вектора внешних воздействий: (температуры, расхода и давления теплоносителя на входе в систему, температуры наружного воздуха); и параметров объекта (геометрические размеры и теплотехнические характеристики ограждающих конструкций, трубопроводных систем и т.д.).

Из множества параметров состояния выделяются параметры, характеризующие качество функционирования объекта. Выход вектора качества за границы допустимой области означает нештатное состояние (сверхнормативные утечки теплоносителя, снижение или повышение температуры воздуха в помещениях за пределы санитарных норм, сверхнормативный расход тепловой энергии). Такое событие должно распознаваться и регистрироваться системой. Границы допустимой области определяются из нормативных расчетов для параметров вектора качества.

Таким образом, задача диагностирования теплотехнического состояния состоит из подзадач определения фактических параметров функциони-

рования объекта и определения границ допустимой области. Решение подобных задач опирается на методы системного анализа, оптимизации и принятия решений [3].

1. Определение параметров функционирования

Рассмотрим задачу диагностирования на примере двухтрубной тепловой сети. Известны проектные характеристики сети: геометрические размеры, условия прокладки, проектные характеристики теплоизоляции, проектные или договорные значения нагрузок объектов теплопотребления, температурный график качественного регулирования тепловой сети.

Основные балансовые соотношения:

$$Q^0 = \sum_{i=1}^{N} Q_i^0 + Q^{0l},$$

$$G^{0w} = G^{01} - G^{02} = G^{0ws} + G^{0l},$$

где Q^0 – проектная тепловая нагрузка сети; Q_i^0 – проектные тепловые нагрузки объектов теплопотребления; Q^{0l} – нормативные потери тепловой энергии; G^{ow} – проектный расход сетевой воды на подпитку; G^{01} и G^{02} – расход теплоносителя по прямому и обратному трубопроводам соответственно; G^{0ws} – проектный расход сетевой воды на горячее водоснабжение; G^{0l} – нормативные потери (утечки) сетевой воды; N – общее число объектов теплопотребления.

В свою очередь, проектные тепловые нагрузки объектов теплопотребления Q_i^0 и проектный расход сетевой воды на горячее водоснабжение системы G^{0ws} определяются соотношениями:

$$Q_i^0 = q_i^0 \cdot V_i \cdot (T_i^{air} - T^{env}),$$

$$G^{0ws} = \sum_{i=1}^{N} g_i^{0ws}.$$

Здесь q_i^0 – удельная отопительная характеристика i-го объекта; V_i – объем i-го объекта; T_i^{air} – температура воздуха внутри i-го объекта; T^{env} – расчетная температура наружного воздуха; g_i^{0ws} – проектное (договорное) значение расхода сетевой воды на горячее водоснабжение i-го объекта.

После многих лет эксплуатации фактические параметры функционирования сетей значительно отличаются от проектных значений и подлежат определению в ходе обследования. Таким образом, требуется определить фактическое состояние сетей, в том числе фактическое распределение расхода тепловой энергии Q_i^f и теплоносителя G_i^f по объектам; фактические значения потерь тепловой энергии с теплоносителем и через теплоизоляцию Δq_j^f и напора Δh_j^f по j-м участкам сетей, $j = 1, ..., J$.

Предположим, что фактические значения нагрузок каждого i-го объекта можно выразить через договорные величины с помощью поправочных коэффициентов:

$$Q_i^f = k_i Q_i^0. \qquad (1)$$

$$g_i^{fws} = k_i^{ws} g_i^{0ws}.$$

Фактическое потребление тепловой энергии и расход теплоносителя, а значит, поправочные коэффициенты k_i и k_i^{ws} в основном зависят от температуры T_i, располагаемого напора поступающего теплоносителя Δp_i, качества ограждающих конструкций q_i и состояния и регулировки системы отопления R_i, т. е.

$$k_i = f_i(T_i, \Delta p_i, q_i, R_i),$$

$$k_i^{ws} = \varphi_i(T_i, \Delta p_i, R_i).$$

В идеальном случае задачу определения фактических параметров функционирования можно решить, оснастив все интересующие точки системы соответствующими датчиками расхода, температуры и давления. На практике применительно к эксплуатируемым тепловым сетям, системам отопления зданий и сооружений и других объектов теплопотребления такой подход в большинстве случаев возможен лишь в ограниченном количестве точек. Опыт обследования таких систем показывает, что из-за ограниченных сроков выполнения работ, ограниченных средств и недоступности многих зон для проведения измерений приходится ограничиваться относительно небольшим объемом измерений. В этих условиях важно максимальное использование всей доступной информации о функционировании обследуемого объекта, в том числе результатов опросов эксплуатационного персонала и/или жильцов зданий. Информация в таких случаях носит нечеткий характер: «тепло», «холодно», «жарко» и т. д. Часть информации является нечеткой по самой своей природе. Например, расход теплоносителя в открытых сетях теплоснабжения зависит от множества факторов и постоянно изменяется во времени. Во многих случаях разрегулированность тепловых сетей приводит к тому, что в периферийных объектах располагаемый перепад давления между подающим и обратным трубопроводами недостаточен для обеспечения нормальной циркуляции теплоносителя. Пользователи в таких

случаях зачастую прибегают к сливам теплоносителя в канализацию. Это, в свою очередь, влияет на распределение расходов по направлениям тепловых сетей и на гидравлические режимы их работы. Очевидно, что поведение пользователей можно описать только на основе подходов теории нечетких множеств.

В этих условиях для практического применения эффективным представляется комплексный подход, основанный на совместном применении результатов измерений, системного подхода, основанного на анализе балансовых соотношений объектов разных иерархических уровней, в сочетании с применением подходов, основанных на теории нечетких множеств [4–6].

Рассмотрим вариант, когда нам известны проектные характеристики тепловых сетей и объектов теплопотребления, договорные нагрузки объектов теплопотребления, доступны результаты измерений расхода и параметры теплоносителя на входе в тепловые сети, известны результаты измерений температуры теплоносителя по всем узлам тепловой сети, результаты измерения температуры и давления теплоносителя на вводах части объектов теплопотребления. Известно также, что фактические расходы тепловой энергии и теплоносителя значительно расходятся с проектными и договорными значениями, что к значительной части объектов теплопотребления теплоноситель проступает с низкими параметрами, значительно отличающими от проектных значений. Имеющейся информации недостаточно, чтобы можно было определить фактические тепловые и гидравлические режимы тепловых сетей, оценить фактические потери тепловой энергии и теплоносителя по каждому направлению.

Дополнительно к результатам измерений, имеются результаты опроса потребителей, а также результаты термографирования объектов теплопотребления.

Будем считать, что по оценкам обитателей *i*-го здания температуры воздуха в помещениях этого объекта («тепло», «холодно», «жарко») соответствуют функциям принадлежности поправочного коэффициента k_i^t к оценке фактического расхода тепловой энергии на отопление данного здания:

$$\mu_i^t\left(k_i^t\right)=exp\left[-\left(\frac{\left(k_i^t-a_i\right)ln(8)}{a_i^{gr}-a_i}\right)^2\right].$$

Поправочный коэффициент, учитывающий температуру внутреннего воздуха, можно оценить как

$$k_i^t=\frac{T_i^{air}-T^{env}}{20-T^{env}}. \qquad (2)$$

Здесь T_i^{air} – среднее значение оценки температуры внутреннего воздуха.

По результатам измерения температур теплоносителя в стояках можно дать оценку качества систем отопления объектов теплопотребления («хорошо сбалансированная система», «плохо сбалансированная система», «очень плохо сбалансированная система») с соответствующими функциями принадлежности для поправочного коэффициента k_i^R:

$$\mu_i^R\left(k_i^R\right)=exp\left[-\left(\frac{\left(k_i^R-b_i\right)ln(8)}{b_i^{gr}-b_i}\right)^2\right].$$

Эти оценки влияют на общий расход тепловой энергии и теплоносителя в данном объекте.

Дополнительно по результатам термографирования зданий можно вынести суждение о качестве ограждающих конструкций («хорошее состояние ограждающих конструкций $-q\le q^n$» – теплое здание; «плохое состояние ограждающих конструкций $q\le k_i^q q^n,\ \ k_i^q\in[1{,}1;1{,}5]$» – холодное здание; «очень холодное здание $q\le k_i^q q^n,\ \ k_i^q>1{,}5$» с соответствующими функциями принадлежности μ_i^q:

$$\mu_i^q\left(k_i^q\right)=exp\left[-\left(\frac{\left(k_i^q-c_i\right)ln(8)}{c_i^{gr}-c_i}\right)^2\right].$$

Здесь a_i, b_i и c_i – центры группирования, являющиеся центрами отрезков, моделирующих соответствующие нечеткие множества значений; a_i^{gr}, b_i^{gr} и c_i^{gr} – нижнее или верхнее граничное значение соответствующего параметра.

Далее, можно выразить функциональную зависимость поправочных коэффициентов k_i через частные поправочные коэффициенты k_i^t, k_i^R и k_i^q. Функцию принадлежности коэффициента k_i можно выразить через функции принадлежности частных коэффициентов следующим образом [4]:

$$\mu_i\left(k_i\right)=\bigvee_{k_i=f\left(k_i^t,k_i^R,k_i^q\right)}\left(\mu_i^t\left(k_i^t\right)\wedge\mu_i^R\left(k_i^R\right)\wedge\mu_i^q\left(k_i^q\right)\right),$$

$$\forall\, k_i^t,k_i^R,k_i^q,k_i\in R,$$

где символ $\vee$ означает объединение множеств на основе s-нормы; символ $\wedge$ означает пересечение множеств на основе t-нормы; области определения коэффициентов в общем случае принадлежат множеству вещественных чисел *R*.

Аналогично можно выразить функциональную зависимость поправочных коэффициентов k_i^{ws} через частные поправочные коэффициенты k_i^t, k_i^R и k_i^q и определить функцию принадлежности $\mu_i^{ws}\left(k_i^{ws}\right)$. Для оценки расходов используются поправочные коэффициенты как средние значения элементов ядра множества. Таким образом, можно оценить фактические расходы тепловой энергии и теплоносителя по каждому объекту и далее по всем участкам сети.

2. Результаты обследования тепловых сетей г. Байкальска

Применение подхода можно проследить на примере обследования тепловых сетей г. Байкальска. На рис. 1 представлена общая структура системы теплоснабжения г. Байкальска. Здесь можно выделить три основные подсистемы: микрорайоны Гагарина; мкр-н Южный с мкр-н Красный Ключ; поселок Строителей.

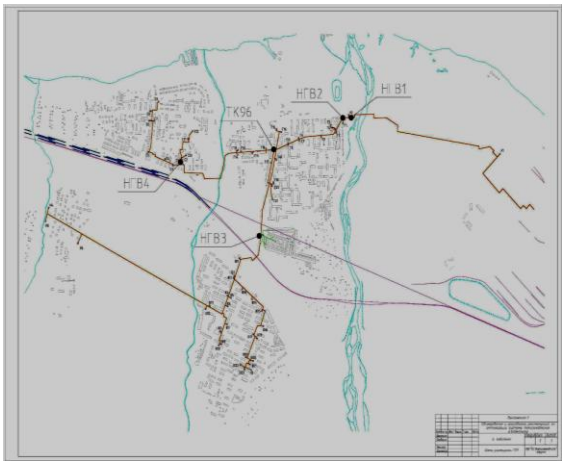


Рис. 1. Укрупненная схема тепловых сетей

Проблемы тепловых сетей этого города типичные, как у большинства других городов России: разрегулированность, высокая степень износа. Состояние тепловых камер и отборных устройств в опорных точках тепловых сетей не позволяет провести измерение давления и расхода. Приборы учета имеются только на входе в тепловые сети города и на ряде объектов теплопотребления.

Задача состоит в том, чтобы оценить фактическое состояние тепловых сетей, тепловые и материальные балансы сети в целом и отдельных участков, потери тепловой энергии с теплоносителем и через теплоизоляцию, определить пути снижения потерь и нормализации работы сетей.

По проекту предусмотрена работа тепловых сетей по температурному графику 130/70 °С. Фактические температурные графики внутри микрорайонов пос. Строителей и микрорайона Южный значительно отличаются от проектного и определяются, наряду с зависимостью от температуры наружного воздуха, необходимостью поддержания гидравлического режима и составляют приблизительно 85/65 °С для микрорайона Южный и 80/60 °С – для микрорайона Строителей. В целях обеспечения минимального напора у концевых абонентов на НГВ-2, НГВ-3 и НГВ-4 применяется подмешивание обратного теплоносителя в подающий трубопровод. Регулирование гидравлического режима осуществляется вручную.

Алгоритм решения задачи

1. Определение расчетных балансов на основе договорных нагрузок.

2. Уточнение расхода теплоносителя на подпитку на основе результатов измерений расходов на насосных станциях.

3. Предварительная оценка потерь тепловой энергии с теплоносителем.

4. Предварительная оценка распределения расхода теплоносителя по всем участкам тепловых сетей. На основе измерений температур теплоносителя, опросов эксплуатационного персонала и жильцов уточняются тепловые балансы объектов теплопотребления с учетом фактических температурных графиков. Для этого экспертным путем с учетом тепловых балансов зданий определены поправочные коэффициенты для нагрузок объектов теплопотребления внутри различных зон тепловых сетей. На основе результатов тепловизионных наблюдений определены показатели качества ограждающих конструкций.

5. Уточнение тепловых и гидравлических расчетов тепловых сетей и получение оценки тепловых потерь через теплоизоляцию.

6. Уточнение характеристики теплопроводности теплоизоляции и получение оценки фактических тепловых потерь с учетом результатов измерений температур на участках тепловых сетей.

7. Проверка сходимости «ключевых» балансов для отдельных объектов, по микрорайонам и по городу в целом. Если критерий сходимости выполняется, то процесс решения задачи завершен, иначе переход на шаг 3.

При оценке фактических расходов тепловой энергии и сетевой воды учитывались следующие факторы. Оценки фактических расходов тепловой энергии Q_i^f на период проведения измерений, пересчитанные для *i*-го объекта с учетом температуры наружного воздуха и с учетом экспертных оценок поправочных коэффициентов по формулам (1) и (2), при T^{air} – температуре внутреннего воздуха в помещениях в день проведения измерений,

°С; T^{env} – расчетная температура наружного воздуха для г. Байкальска –28 °С.

По полученным оценкам расходов тепловой энергии по каждому направлению расход теплоносителя G_i^f оценивается как

$$G_i^f = \frac{Q_i^f}{T_i^1 - T_i^2} + G_i^{ws} + G_i^l,$$

где Q_i^f – фактический расход тепловой энергии в *i*-м объекте; Гкал/ч; T_i^1 – температура теплоносителя в подающем трубопроводе *i*-го ответвления, °С; T_i^2 – температура теплоносителя в обратном трубопроводе *i*-го ответвления в день проведения измерений; G_i^{ws} и G_i^l – фактические расход сетевой воды на горячее водоснабжение и потери сетевой воды соответственно *i*-го объекта.

Расчетные оценки показывают, что фактическое распределение расходов теплоносителя по направлениям существенно отличается от проектных – в ответвлениях, расположенных в начальных участках тепловых сетей с большим располагаемым перепадом давления, расход теплоносителя в 2–3 раза превышает проектный уровень; в ответвлениях, расположенных в периферийных зонах тепловых сетей с минимальным располагаемым перепадом давления, расход теплоносителя не достигает проектного уровня.

Такое положение вызвано прежде всего разрегулированностью систем отопления у большинства потребителей. Кроме этого, в микрорайоне Гагарина в магистральных трубопроводах, по которым движется практически весь объем теплоносителя, предназначенный для всех зон г. Байкальска, скорости и начальные значения располагаемого напора теплоносителя повышенные (до 2 м/с), что также вызывает повышенный расход по ответвлениям и по абонентам, расположенным в этих зонах. В микрорайоне Южный из-за необходимости преодолеть гидростатическое давление более 60 метров водяного столба, вызванного перепадом высот, начальные значения абсолютного давления и располагаемого напора теплоносителя еще выше.

Разрегулированность систем отопления абонентов усиливает и без того значительные диспропорции в распределении расходов: по ответвлениям, близким к НГВ-3, расход теплоносителя еще более увеличивается. Это приводит к низким располагаемым напорам на вводах у периферийных абонентов. В целях обеспечения минимальной циркуляции абоненты, расположенные на периферии сетей, сливают теплоноситель в канализацию. Оценки баланса теплоносителя на основе результатов измерений показывают, что средний расход на подпитку по мкр-ну Южному составляет не менее 110 т/ч. Расход на ГВС, определенный по нормативам, составляет не более 45 т/ч. Это означает, что потери теплоносителя, вызванные утечками в сети и несанкционированными сливами у абонентов, составляют не менее 65 т/ч – больше половины всех потерь по г. Байкальску. Одной из основных причин повышенных потерь в мкр–не Южном является необходимость обеспечения высокого уровня начальных значений давления из-за значительного перепада высот (табл. 1, рис. 2).

Заключение

На основе разработанной методики получено фактическое распределение расходов тепловой энергии и теплоносителя по всем участкам тепловых сетей. Это позволило рассчитать фактические

Таблица 1

Сводные балансы расходов тепловой энергии

Микрорайон	По договорным нагрузкам, Гкал/час				По фактическим нагрузкам, Гкал/час					
	Отопление и вентиляция	ГВС	Всего	Доля, %	Отопление и вентиляция	ГВС	Потери с теплоносителем	Потери через теплоизоляцию	Всего	Доля, %
Гагарина	18,22	7,48	25,70	45,7 %	15,67	2,79	2,07	2,01	18,46	40,0 %
Южный	15,88	5,65	21,53	38,3 %	10,92	1,55	2,70	1,09	12,47	27,0 %
пос. Строителей	6,87	2,13	9,00	16,0 %	4,81	0,73	0,90	0,86	5,54	12,0 %
Потери				0,0 %			5,67	3,96	9,63	20,9 %
Всего	40,96	15,27	56,23	100 %	31,39	5,07	5,67	3,96	46,10	100,0 %

гидравлические и тепловые режимы работы тепловых сетей, оценить потери напора по участкам сетей, потери тепловой энергии с теплоносителем и через теплоизоляцию для всех участков сетей, то есть провести диагностику их состояния. Фактические потери теплоносителя с утечками в сетях и сливами теплоносителя у потребителей составляют от 100 т/ч до 120 т/ч. Потери тепловой энергии с теплоносителем составляют около 6 Гкал/ч. Общая сумма потерь не менее 10,79 Гкал/ч – 23,4 % от общего объема потребления.

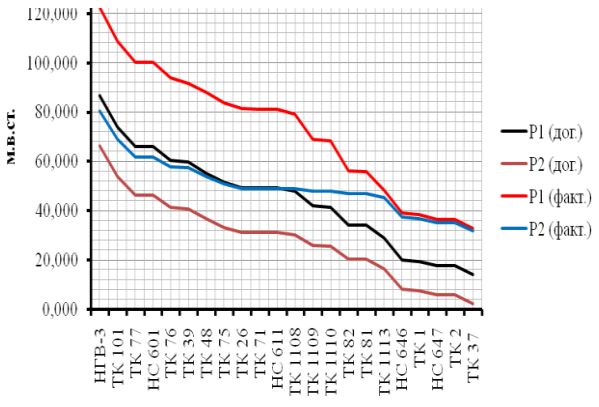


Рис. 2. Пьезометрический график участка тепловой сети НГВ-3 – ТК-37 с учетом геодезических отметок местности «Н»

В целом выполненные исследования показывают возможность диагностики фактического состояния сложных объектов в условиях неопределенности и нечеткости информации. Количественные оценки теплотехнических характеристик по объектам теплопотребления и участкам сетей необходимы для идентификации моделей теплового состояния установок. Это обеспечивает возможность выбора способов проведения и экономической оценки мероприятий по оптимизации режимов работы системы и снижению потерь.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Толстой М.Ю., Хан В.В., Ильин А.Н. Использование современных информационных технологий в автоматизированных системах оперативной диагностики теплотехнического состояния зданий. Проблемы и опыт создания // Информационные и математические технологии в науке и управлении / Труды XII Байкальской Всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении». – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2007. – Ч. II – С. 78–85.
2. Деканова Н.П., Качин А.С., Хан ВВ. Программно–аппаратный комплекс диагностики и управления в системе учета энергии // Информационные и математические технологии в науке и управлении / Труды XIV Байкальской Всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении». Том 3. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2009. – С. 63–67.
3. Козлов В.Н. Системный анализ, оптимизация и принятие решений. – М. : Проспект, 2010. – 176 с.
4. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. – М. : Бином. Лаборатория знаний, 2009. – 798 с.
5. Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения. Под ред. Р. Ягера. – М. : изд–во «Радио и связь », 1986. – 408 с.
6. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л., Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. – М. : Телеком, 2008. – 462 с.

УДК 62–501.12

Огородников Юрий Иннокентьевич,
к. т. н., доцент кафедры «Управление техническими системами» ИрГУПС
тел.: 89834011463, e-mail: ogorodnikov_yi@irgups.ru

РАСЧЁТ ДОПУСКОВ НА РЕАЛИЗАЦИЮ ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ В СТАЦИОНАРНЫХ НЕПРЕРЫВНЫХ СИСТЕМАХ

Yu. I. Ogorodnikov

COMPUTATION OF TOLERANCES FOR IMPLEMENTATION OF PROGRAM CONTROL IN THE TIME-INVARIANT CONTINUOUS SYSTEMS

Аннотация. *В статье получены оценки допусков на реализацию программного управления в стационарных непрерывных системах и рассмотрены вычислительные аспекты получения этих оценок в линейных стационарных системах.*

Ключевые слова: *стационарные непрерывные системы, программное управление, переходная матрица системы, матричная экспонента.*

Abstract. *The paper deals with assessment of tolerances for implementation of program control in the time-invariant continuous systems and considers computational aspects of getting those estimates in the linear time-invariant systems.*

Keywords: *time-invariant continuous systems, program control, transition matrix of a system, matrix exponent.*

Введение

В реальной системе автоматического управления управляющее устройство реализует расчётное программное управление с некоторой погрешностью. Инженеру необходимо оценить степень соответствия между математической моделью и реальной системой заранее, уже на стадии синтеза. В связи с этим возникает задача нахождения допусков на реализацию управления, при которых гарантируется отклонение возмущённой фазовой траектории от номинальной в заданных пределах.

Постановка задачи

Предположим, что поведение системы управления во времени определяется векторным дифференциальным уравнением

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)),\ x(t_0) = x_0,$$
$$t \in T = [t_0, t_1] \subset R^1, \qquad (1)$$

где $x(t) \in R^n$ – n-мерный вектор состояния системы;

$u(t) \in R^m$ – m-мерный вектор управления;

$x(\cdot) \in D(T)$, $D(T)$ – пространство абсолютно непрерывных на T функций;

$u(\cdot) \in L_r(T)$, $L_r(T)$ – пространство m-мерных векторных функций с нормой

$$\|u(\cdot)\|_r = \left[\int_T \sum_{j=1}^{m} |u_j(t)|^r \, dt\right]^{1/r},\ r \in [1, \infty]; \qquad (2)$$

$f(x, u)$ – известная n-мерная вектор-функция;

$u(\cdot)$, $x(\cdot)$ – символы функций, рассматриваемых как точки функциональных пространств.

Опыт решения содержательных задач оптимального управления показал, что их решения в подавляющем большинстве – сравнительно просто устроенные функции, имеющие разве лишь разрывы первого рода, а между точками разрывов – достаточно гладкие. Этим можно обосновать выбор в качестве основного функционального класса, из которого разрешается выбирать $u(t)$, класса кусочно-непрерывных на T функций с нормой

$$\|u(\cdot)\|_\infty = \max_{i=1,2,\ldots,m} \max_{t \in T} |u_i(t)|. \qquad (3)$$

Допустим, что вектор-функция $f(x, u)$ непрерывна по совокупности аргументов вместе с якобианами $\partial f/\partial x$ и $\partial f/\partial u$ и все требования существования и единственности решения уравнения (1) при заданных начальных условиях выполнены [1].

Пусть номинальному управлению $u^0(\cdot)$ соответствует некоторая «невозмущённая» траектория системы $x^0(\cdot)$. Пусть управление $u^0(\cdot)$ возмущено малой функцией $\delta u(\cdot) \in L_r(T)$, следствием чего будет малое возмущение фазовой траектории: $x^0(\cdot) \to x^0(\cdot) + \delta x(\cdot)$.

Поставим задачу нахождения допусков на отклонение программного управления от номинального: найти $\gamma > 0$, такое, что при заданном вещественном $\beta > 0$ и выполнении условия на конечном интервале времени $T = [t_0, t_1]$ обеспечивается неравенство

$$\|\delta u(\cdot)\|_r \le \gamma \ \ (r \in [1, \infty]), \qquad (4)$$

$$\left\|\delta x(\cdot)\right\| = \max_{i=1,2,...,n} \max_{t\in T} \left|\delta x_i(t)\right| \le \beta. \qquad (5)$$

Использование уравнения в вариациях первого порядка

Связь между $\delta x(t)$ и $\delta u(t)$ определяет известное уравнение в вариациях [2]. В теории первого порядка оно имеет вид

$$\delta\dot{x}(t) = f_x(t)\delta x(t) + f_u(t)\delta u(t),$$
$$\delta x(t_0) = 0,\ t \in T = [t_0, t_1]. \qquad (6)$$

В (6) элементами на пересечении i-й строки и j-го столбца матриц $f_x(t)$ и $f_u(t)$ служат частные производные $\partial f_i/\partial x_j$ и $\partial f_i/\partial u_j$, соответственно, вычисленные в точке (u^0, x^0).

Уравнение (6) является точным для систем вида (1), линейных относительно x и u. В общем случае $\delta x(t)$ отличается от точной разности между возмущённой и невозмущённой траекториями на величину более высокого порядка малости, чем норма от δu.

В рамках сделанных предположений сформулируем следующий результат.

Утверждение 1. *Для того чтобы на интервале времени $T = [t_0, t_1]$ для систем вида $\dot{x}(t) = f(x(t), u(t))$, линейных относительно $x(t)$ и $u(t)$, выполнялось соотношение*

$$\left\|\delta x(\cdot)\right\| = \max_{i=1,2,...,n} \max_{t\in T} \left|\delta x_i(t)\right| \le \beta,$$

где β – произвольное вещественное положительное число, достаточно, чтобы выполнялось условие

$$\left\|\delta u(\cdot)\right\|_r \le \frac{\beta}{\max\limits_{i=1,2,...,n}\left[\int_T \sum_{j=1}^{m}\left|\sum_{k=1}^{n} g_{ik}(t_1,t)\left(f_u(t)\right)_{k,j}\right|^q dt\right]^{1/q}}. \qquad (7)$$

В (7) $g_{i,k}(t_1,t)$ – элементы матрицы Коши уравнения в вариациях (6);

$f_u(t)$ – якобиан для дифференциальной системы (1), связывающей вектор состояния $x(t)$ размерности n и вектор управления $u(t)$ размерности m;

r и q – сопряженные показатели (вещественные положительные числа), связанные соотношением $1/r + 1/q = 1$.

Доказательство утверждения 1 основано на технике оценки нормы решения уравнений возмущённого движения с применением интегральных неравенств Гёльдера.

В практических приложениях наиболее часто употребляемыми являются нормы (2) для значений $r = 1, 2$ и ∞. Оценки (7) в этих случаях имеют вид

$$\left\|\delta u(\cdot)\right\|_1 \le \frac{\beta}{\max\limits_{i=1,2,...,n}\max\limits_{j=1,2,...,m}\max\limits_{t\in T}\left|\sum_{k=1}^{n} g_{ik}(t_1,t)\left(f_u(t)\right)_{kj}\right|}; \qquad (8)$$

$$\left\|\delta u(\cdot)\right\|_2 \le \frac{\beta}{\max\limits_{i=1,2,...,n}\left[\int_T \sum_{j=1}^{m}\left|\sum_{k=1}^{n} g_{ik}(t_1,t)\left(f_u(t)\right)_{kj}\right|^2 dt\right]^{1/2}}; \qquad (9)$$

$$\left\|\delta u(\cdot)\right\|_\infty \le \frac{\beta}{\max\limits_{i=1,2,...,n}\sum_{j=1}^{m}\int_T\left|\sum_{k=1}^{n} g_{ik}(t_1,t)\left(f_u(t)\right)_{kj}\right| dt}. \qquad (10)$$

Оценки (7), точные для систем вида (1), линейных относительно $x(t)$ и $u(t)$, для нелинейных систем могут быть улучшены. Далее предлагается схема улучшения оценок, использующая технику оценивания, основанную на интегральных неравенствах Гёльдера, с учётом уравнения в вариациях в теории второго порядка.

Использование уравнения в вариациях второго порядка

Вышеизложенную постановку задачи переформулируем следующим образом.

Предположим, что $u(\cdot) \in CR(T)$, $CR(T)$ – пространство кусочно-непрерывных на T функций с нормой:

$$\left\|u(\cdot)\right\|_\infty = \max_{i=1,2,...,n} \max_{t\in T} \left|u_i(t)\right|. \qquad (11)$$

Поставим задачу: найти $\gamma > 0$, такое, что при заданном вещественном $\beta > 0$ и выполнении условия на конечном интервале времени $T = [t_0, t_1]$ обеспечивается неравенство

$$\left\|u(\cdot)\right\|_\infty =\le \gamma, \qquad (12)$$

$$\max_{t\in T}\left|\delta x_i(t)\right| \le \beta \ \ , \ \ i \in [1, n]. \qquad (13)$$

Выпишем для (1) уравнение в вариациях второго порядка.

Разложим в ряд Тейлора нелинейные правые части системы (1) в окрестности невозмущённого движения, ограничивая ряд членами второго порядка включительно:

$$\begin{aligned} f_i(x_1, x_2, ..., x_n, u_1, u_2, ..., u_m) &= f_i(x^0, u^0) + \\ &+ \sum_{j=1}^{n}\frac{\partial f_i(x^0,u^0)}{\partial x_j}(x_j - x_j^0) + \sum_{j=1}^{m}\frac{\partial f_i(x^0,u^0)}{\partial u_j}\times \\ &\times(u_j - u_j^0) + \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{n}\frac{\partial^2 f_i(x^0,u^0)}{\partial x_j \partial x_k}\delta x_j \delta x_k + \\ &+ \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{m}\frac{\partial^2 f_i(x^0,u^0)}{\partial u_j \partial u_k}\delta u_j \delta u_k + \\ &+ \sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{m}\frac{\partial^2 f_i(x^0,u^0)}{\partial x_j \partial u_k}\delta x_j \delta u_k, \quad i = 1, 2, ..., n. \end{aligned} \qquad (14)$$

Подставляя (14) в векторное выражение (1), расписанное поэлементно, имеем

$$
\begin{aligned}
\delta\dot{x}_1 &= \sum_{j=1}^{n}\frac{\partial f_1}{\partial x_j}\delta x_j + \sum_{j=1}^{m}\frac{\partial f_1}{\partial u_j}\delta u_j + \\
&+ \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{n}\frac{\partial^2 f_1}{\partial x_j \partial x_k}\delta x_j\,\delta x_k + \\
&+ \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{m}\frac{\partial^2 f_1}{\partial u_j \partial u_k}\delta u_j\,\delta u_k + \\
&+ \sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{m}\frac{\partial^2 f_1}{\partial x_j \partial u_k}\delta x_j\,\delta u_k, \\
\delta\dot{x}_2 &= \sum_{j=1}^{n}\frac{\partial f_2}{\partial x_j}\delta x_j + \sum_{j=1}^{m}\frac{\partial f_2}{\partial u_j}\delta u_j + \\
&+ \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{n}\frac{\partial^2 f_2}{\partial x_j \partial x_k}\delta x_j\,\delta x_k + \\
&+ \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{m}\frac{\partial^2 f_2}{\partial u_j \partial u_k}\delta u_j\,\delta u_k + \\
&+ \sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{m}\frac{\partial^2 f_2}{\partial x_j \partial u_k}\delta x_j\,\delta u_k, \\
\delta\dot{x}_n &= \sum_{j=1}^{n}\frac{\partial f_n}{\partial x_j}\delta x_j + \sum_{j=1}^{m}\frac{\partial f_n}{\partial u_j}\delta u_j + \\
&+ \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{n}\frac{\partial^2 f_n}{\partial x_j \partial x_k}\delta x_j\,\delta x_k + \\
&+ \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{m}\frac{\partial^2 f_n}{\partial u_j \partial u_k}\delta u_j\,\delta u_k + \\
&+ \sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{m}\frac{\partial^2 f_n}{\partial x_j \partial u_k}\delta x_j\,\delta u_k,
\end{aligned}
\tag{15}
$$

или в более компактной форме

$$
\begin{aligned}
\delta\dot{x}_i &= \sum_{j=1}^{n}\frac{\partial f_i}{\partial x_j}\delta x_j + \sum_{j=1}^{m}\frac{\partial f_i}{\partial u_j}\delta u_j + \\
&+ \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{n}\frac{\partial^2 f_i}{\partial x_j \partial x_k}\delta x_j\,\delta x_k + \\
&+ \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{m}\frac{\partial^2 f_i}{\partial u_j \partial u_k}\delta u_j\,\delta u_k + \\
&+ \sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{m}\frac{\partial^2 f_i}{\partial x_j \partial u_k}\delta x_j\,\delta u_k, \quad i=\overline{1,n}.
\end{aligned}
\tag{16}
$$

Вводя скалярное произведение векторов

$$(x,y)=\sum_{i=1}^{n}x_i y_i; \quad (Ax,x)=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}a_{ij}x_i x_j$$

и обозначая

$$
f_x^i = \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_1} \quad \frac{\partial f_i}{\partial x_2} \quad \dots \quad \frac{\partial f_i}{\partial x_n}\right)^{\mathrm{T}},
$$

$$
f_{xx}^i = \begin{pmatrix}
\frac{\partial^2 f_i}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f_i}{\partial x_1 \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f_i}{\partial x_1 \partial x_n} \\
\frac{\partial^2 f_i}{\partial x_1 \partial x_2} & \frac{\partial^2 f_i}{\partial x_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 f_i}{\partial x_2 \partial x_n} \\
\vdots & \vdots & \dots & \vdots \\
\frac{\partial^2 f_i}{\partial x_1 \partial x_n} & \frac{\partial^2 f_i}{\partial x_2 \partial x_n} & \dots & \frac{\partial^2 f_i}{\partial x_n^2}
\end{pmatrix},
$$

где f_{xx}^i – симметричная матрица Гессе, (16) можно записать в виде

$$
\begin{aligned}
\delta\dot{x}_i &= \left(f_x^i,\delta x\right)+\left(f_u^i,\delta u\right)+\frac{1}{2}\left(f_{xx}^i\delta x,\delta x\right)+ \\
&+\frac{1}{2}\left(f_{uu}^i\delta u,\delta u\right)+\left(f_{xu}^i\delta x,\delta u\right), \\
&\delta x_i(t_0)=0, \quad i=\overline{1,n}.
\end{aligned}
\tag{17}
$$

Учитывая, что δx и δu являются малыми величинами, решение системы нелинейных дифференциальных уравнений (17) можно осуществить методом итераций: сначала найти $\delta\hat{x}(t)$ решением системы линейных дифференциальных уравнений (СЛДУ) вида (6), а затем это первое приближение подставить в квадратичные члены уравнения (17) и найти следующее приближение $\delta\hat{x}(t)$ решением СЛДУ

$$
\begin{aligned}
\delta\dot{x}_i &= \left(f_x^i,\delta x\right)+\left(f_u^i,\delta u\right)+\frac{1}{2}\left(f_{xx}^i\delta\hat{x},\delta\hat{x}\right)+ \\
&+\frac{1}{2}\left(f_{uu}^i\delta u,\delta u\right)+\left(f_{xu}^i\delta\hat{x},\delta u\right), \\
&\delta x_i(t_0)=0, \quad i=\overline{1,n}.
\end{aligned}
\tag{18}
$$

Дальнейших итераций можно не проводить, поскольку они дают поправки к δx, имеющие формально третий порядок малости.

Решение СЛДУ (18) имеет вид

$$
\delta x_i(t)=\int_{t_0}^{t}\left\{\begin{aligned}
&\left[\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{n}g_{ik}\frac{\partial f_k}{\partial u_j}\delta u_j\right]+ \\
&+\left[\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{n}g_{ik}\left(\sum_{l=1}^{n}\frac{\partial^2 f_k}{\partial x_l \partial x_j}\right)\delta\hat{x}_l\,\delta\hat{x}_j\right]+ \\
&+\left[\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{n}g_{ik}\left(\sum_{l=1}^{m}\frac{\partial^2 f_k}{\partial u_l \partial u_j}\right)\delta u_l\,\delta u_j\right]+ \\
&+\left[\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{n}g_{ik}\left(\sum_{l=1}^{n}\frac{\partial^2 f_k}{\partial x_l \partial u_j}\right)\delta\hat{x}_l\,\delta u_j\right]
\end{aligned}\right\}d\tau,
\tag{19}
$$

где

$$\delta\hat{x}_l(t)=\int_{t_0}^{t}\left[\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{n}g_{lk}\frac{\partial f_k}{\partial u_j}\delta u_j\right]d\tau,$$

$$\delta\hat{x}_j(t)=\int_{t_0}^{t}\left[\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{n}g_{jk}\frac{\partial f_k}{\partial u_j}\delta u_j\right]d\tau.$$

В (19) $g_{ik}(t, \tau)$, $k = 1, 2,\ldots, n$; $i = 1, 2, \ldots, n$ – элементы матрицы Коши уравнения в вариациях первого порядка (6).

Обозначив подынтегральное выражение, стоящее в фигурных скобках в правой части уравнения (19), через $Y(\tau)$ и учитывая, что

$$\max_{t\in[t_0,t_1]}\int_{t_0}^{t}|Y(\tau)|d\tau=\int_{t_0}^{t_1}|Y(\tau)|d\tau=\int_{T}|Y(\tau)|d\tau, \quad (20)$$

имеем

$$\max_{t\in T}|\delta x_i(t)|\le\int_{T}|Y(\tau)|d\tau\le\beta. \quad (21)$$

Применяя к левой части (21) технику оценивания, основанную на интегральных неравенствах Гёльдера, приходим к следующему неравенству:

$$\eta_i\|\delta u\|_\infty+\frac{1}{2}\mu\eta^2\|\delta u\|_\infty^2+\frac{1}{2}\theta\|\delta u\|_\infty^2+\nu\eta\|\delta u\|_\infty^2\le\beta, \quad (22)$$

где

$$\eta_i=\int_{T}\sum_{j=1}^{m}\left|\sum_{k=1}^{n}g_{ik}\frac{\partial f_k}{\partial u_j}\right|d\tau, \quad (23)$$

$$\eta=\max_{i=1,2,\ldots,n}\eta_i, \quad (24)$$

$$\mu=\int_{T}\sum_{j=1}^{n}\left|\sum_{k=1}^{n}g_{ik}\left(\sum_{l=1}^{n}\frac{\partial^2 f_k}{\partial x_l\partial x_j}\right)\right|d\tau, \quad (25)$$

$$\nu=\int_{T}\sum_{j=1}^{m}\left|\sum_{k=1}^{n}g_{ik}\left(\sum_{l=1}^{n}\frac{\partial^2 f_k}{\partial x_l\partial u_j}\right)\right|d\tau, \quad (26)$$

$$\theta=\int_{T}\sum_{j=1}^{m}\left|\sum_{k=1}^{n}g_{ik}\left(\sum_{l=1}^{m}\frac{\partial^2 f_k}{\partial u_l\partial u_j}\right)\right|d\tau. \quad (27)$$

Из (22) следует результат.

Утверждение 2. *Для того чтобы на интервале времени $T = [t_0, t_1]$ для нелинейных систем вида $\dot{x}(t)=f(x(t),u(t))$, где $x(t) \in R^n$ – n-мерный вектор состояния системы, $u(t) \in R^m$ – m-мерный вектор управления, $f(x, u)$ – известная n-мерная вектор-функция, при возмущении управления $\delta u(\cdot)$ от номинального для возмущения фазовой траектории $\delta x(\cdot)$ выполнялось соотношение $|\delta x_i(t)|\le\beta$, $t\in T$, $i\in[1, n]$, β – положительная константа, достаточно, чтобы выполнялось условие*

$$\|\delta u(\cdot)\|_\infty\le\gamma, \text{ где } \gamma=\frac{-\eta_i+\sqrt{\eta_i^2+2\sigma\beta}}{\sigma}, \quad (28)$$

$$\sigma=\mu\eta^2+2\nu\eta+\theta, \quad (29)$$

η_i, η, μ, ν, θ *определяются соответственно выражениями (23)–(27).*

Уточнение утверждения 1 на случай линейных стационарных систем

Линейными стационарными системами принято называть такие системы, поведение которых вполне удовлетворительно описывается линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами.

Пусть структура модели динамического объекта задана линейной стационарной системой (ЛСС)

$$\dot{x}(t)=Ax(t)+Bu(t),\ x(t_0)=x_0,\ t\in[t_0,t_1]\subset R^1, \quad (30)$$

где $x(t)\in R^n$ – n–мерный вектор состояния системы;

$u(t)\in R^m$ – m-мерный вектор управления;
A – матрица системы размерности $n \times n$;
B – матрица входа размерности $n \times m$;

Пусть номинальному управлению $u^0(\cdot)$ соответствует некоторая «невозмущённая» траектория системы $x^0(\cdot)$. Пусть управление $u^0(\cdot)$ возмущено малой функцией $\delta u(\cdot)\in L_r(T)$, следствием чего будет малое возмущение фазовой траектории: $x^0(\cdot)\to x^0(\cdot)+\delta x(\cdot)$.

Связь между $\delta x(t)$ и $\delta u(t)$ для исходной ЛСС имеет вид

$$\delta\dot{x}(t)=A\delta x(t)+B\delta u(t),\ \delta x(t_0)=0,\ t\in T=[t_0,t_1].$$

Утверждение 1 для систем вида (30) можно переформулировать следующим образом.

Утверждение 3. *Для того чтобы на интервале времени $T = [t_0, t_1]$ для систем вида $\dot{x}(t)=Ax(t)+Bu(t)$ выполнялось соотношение $\|\delta x(\cdot)\|=\max\limits_{i=1,2,\ldots,n}\max\limits_{t\in T}|\delta x_i(t)|\le\beta$, $t\in T$, $i\in[1, n]$, β – произвольная положительная константа, достаточно, чтобы выполнялось условие*

$$\|\delta u(\cdot)\|_r\le\frac{\beta}{\max\limits_{i=1,2,\ldots,n}\left[\int_{T}\sum_{j=1}^{m}\left|\sum_{k=1}^{n}\left(e^{A(t_1-t)}\right)_{ik}b_{kj}\right|^q dt\right]^{1/q}}.$$

Оценки (8)–(10) в данном случае будут иметь вид

$$\left\|\delta u(\cdot)\right\|_1 \le \frac{\beta}{\max\limits_{i=1,2,\dots,n}\max\limits_{j=1,2,\dots,m}\max\limits_{t\in T}\left|\sum\limits_{k=1}^{n}\left(e^{A(t_1-t)}\right)_{ik} b_{kj}\right|}, \quad (31)$$

$$\left\|\delta u(\cdot)\right\|_2 \le \frac{\beta}{\max\limits_{i=1,2,\dots,n}\left[\int\limits_T \sum\limits_{j=1}^{m}\left|\sum\limits_{k=1}^{n}\left(e^{A(t_1-t)}\right)_{ik} b_{kj}\right|^2 dt\right]^{1/2}}, \quad (32)$$

$$\left\|\delta u(\cdot)\right\|_\infty \le \frac{\beta}{\max\limits_{i=1,2,\dots,n}\sum\limits_{j=1}^{m}\int\limits_T\left|\sum\limits_{k=1}^{n}\left(e^{A(t_1-t)}\right)_{ik} b_{kj}\right| dt}. \quad (33)$$

Вычислительные аспекты получения оценок допусков на реализацию программного управления для линейных стационарных систем

Экспоненциал квадратной матрицы A определяется как ряд

$$e^A = I + \frac{1}{2!}A^2 + \frac{1}{3!}A^3 + \dots,$$

который сходится для всех A.

Матрица $G(t,t_0) = e^{A(t-t_0)}$ носит название переходной матрицы. Математики предпочитают пользоваться термином *фундаментальная матрица Коши.* Название «переходная матрица состояния» в определенном смысле указывает на характер ее применения. Этому названию обычно отдают предпочтение в инженерных кругах.

Переходная матрица состояния определяет движение конца вектора состояния в пространстве состояний из некоторого начального положения, таким образом определяя и изменение (переход) состояния системы. В связи с тем, что вектор $x(t)$ описывает все функции времени $x_1(t)$, $x_2(t)$, ..., $x_n(t)$, он несёт в себе большую информацию. Следует отметить, что объём вычислений при определении переходной матрицы состояния обычно больше, чем при разрешении линейного дифференциального уравнения относительно зависимой переменной. Однако имеющаяся дополнительная информация позволяет проектировщику системы управления использовать более совершенные методы проектирования.

В общем случае вычисление переходной матрицы состояния может выполняться несколькими различными путями. Основные подходы базируются на теореме Сильвестра и методе Кэли – Гамильтона, методе разложения в бесконечный ряд, методе частотной области и методе передаточной функции.

Наличие программы для вычисления матричного экспоненциала необходимо каждому исследователю, моделирующему линейные стационарные системы. Существуют и многочисленные работы по вычислению матричного экспоненциала и моделированию линейных систем, в частности можно рекомендовать работы [3–8].

В программной системе MATLAB вычисление матричной экспоненты осуществляется с помощью функций expm, expm1, expm2 и expm3.

Функция Y = expm(A) является встроенной и использует разложение Паде матрицы A [9]. Функцию матричной экспоненты expm(A) не следует путать с функцией exp(A), которая вычисляет экспоненту от каждого элемента массива A. Функция expm1(A) является *M*-файлом, который полностью соответствует встроенной функции expm(A) и располагается в файле expm1.m. Функция Y = expm2(A) для вычисления матричной экспоненты использует разложение Тейлора матрицы A [10] и находится в файле expm2.m. Метод Тейлора не рекомендуется применять как основной, так как он зачастую бывает относительно медленным и неточным. Этот метод имеет меньшую скорость сходимости по сравнению с разложением Паде. Функция Y = expm3(A) для вычисления матричной экспоненты находится в файле expm3.m и использует спектральное разложение матрицы A

$$Y = R * \text{diag}(\exp(\text{diag}(D))) / R,$$

которое, строго говоря, справедливо только для случая различных собственных значений. Этот метод неудачен, если входная матрица не имеет полного набора линейно независимых собственных векторов.

Выводы

В предположении, что поведение системы управления во времени определяется системой нелинейных дифференциальных уравнений в нормальной форме Коши, получены оценки на норму Гёльдера с показателем $r \in [1, \infty]$ вектора вариаций управления, при которых гарантируется отклонение возмущённой фазовой траектории от номинальной в заданных пределах. Сфера приложения полученных оценок не ограничивается задачей нахождения допусков на реализацию программного управления. По мнению автора, эти оценки можно использовать в задачах назначения допусков на параметры динамических систем при синтезе робастных систем управления в случае, когда номинальное значение параметра можно считать неслучайным. На практике ему соответствует ситуация, когда технологический разброс па-

раметров пренебрежимо мал (элементы высокого класса точности) или же начальное значение параметра устанавливается точно в процессе настройки (регулировки) или подбора элементов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алексеев В.М., Тихомиров В.М., Фомин С.В. Оптимальное управление. – М.: Наука, 1979. – 430 с.
2. Справочник по теории автоматического управления. Под редакцией Красовского А.А. – М.: Наука, 1987.– 711 с.
3. Bickart T.A. Matrix exponential: Approximation by truncated power series // Proc. IEEE. – 1968. – V. 56. – № 5. – P. 872–873.
4. Everling W. On the evalution of e^{At} by power series // Proc. IEEE. – 1967. – V. 55. – № 3. – P. 413.
5. Fath F.F. Evalution of a matrix polynomial // IEEE Trans. Autom. Control. – 1968. – V. 13. – № 2. – P. 220–221.
6. Krouse C.L., Ward E.D. Improved linear system simulation by matrix exponentiation with generalized order hold // Preprints, 11th Joint Automatic Control Conference. – 1970. – P. 794–802.
7. Levis A.H. Some computational aspects of the matrix exponential // IEEE Trans. Autom. Control. – 1969. –V. 14. – № 4. – P. 410–411.
8. Melsa J.L. Computer Programs for Computational Assistance in the Study of Linear Control Theory. – New York: Mc Graw–Hill. – 1970.
9. Golub G.H., Van Loan. Matrix Computation. – Oxford: John Hopkins University Press. – 1983.
10. Moler C.B., Van Loan. Nineteen Dubious Ways to Compute the Exponential of a Matrix // SIAM Review. – 1979. – Vol. 20. – P. 801–836.

УДК 629.4.027

Матафонов Алексей Андреевич,
аспирант кафедры «Безопасность жизнедеятельности и экология»
Иркутского государственного университета путей сообщения, тел.:63–83–52

ОПЫТНО-СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ СВАРОЧНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ

A.A. Matafonov

EXPERIMENTAL-COMPARATIVE DATA OF SPOT WELDING ELECTRODES

Аннотация. *Проведены опытно-сравнительные испытания сварочных электродов, покрытия которых получены на основе использования компонентов минерального сырья Восточной Сибири, с серийными электродами марки АНП-13. Показано, что механические характеристики и износ поверхностей корпусов букс, наплавленных электродами ВСЭ, соответствуют нормативно-технической документации по сварке и наплавке при ремонте грузовых вагонов, а также удовлетворяют требованиям, предъявляемым, к электродам АНП-13.*

Ключевые слова: *электроды, испытания, технологические характеристики, сварка.*

Abstact. *The experimental-comparative data of spot welding electrode ESE which obtained on Eastern Siberia mineral row material with standard electrode ANP-13 are presented. It is presented that mechanical characteristics and deterioration surface axis bearing built in up by spot welding electrodes ESE conform to specifications.*

Keywords: *spot welding electrodes, the experimental-comparative data, technological characteristics, welding.*

Методы и способ получения наплавочных электродов для восстановления узлов и деталей железнодорожного транспорта на основе использования определенных компонентов из минерального сырья Восточной Сибири детально рассмотрены в работе [1].

В целях проверки сварочно-технологических характеристик полученных электродов изготовлена серия опытных электродов ВСЭ со стержнями из проволоки марки Св-08А диаметром 4 мм.

В состав покрытия этих электродов входят: магнезит из Савинского месторождения, мрамор – карьера «Перевал» (г. Слюдянка), плавиковый шпат – Абагайтуйского месторождения, периклазовый концентрат – ОАО «Сибирские порошки» (пос. Михайловка), ферросилиций – ОАО «Братский завод ферросплавов» (г. Братск), ферромарганец – ООО «Химико-марганцевая компания» (г.

Ангарск), алюминиевый порошок – Иркутский алюминиевый завод.

Во всех случаях наплавка электродами выполнялась постоянным током обратной полярности на режиме: $I_{св}$ = 160…180А; $U_д$ = 26…29 В. Скорость наплавки была одинаковой и составляла ≈ 8 м/ч.

Поростойкость оценивалась при визуальном осмотре наплавок в один, два и три слоя до и после их зашлифовок. Твердость наплавленного металла определялась по Бринеллю в верхнем слое трехслойной наплавки на пластину из стали Ст3 размером 150×80×20 мм.

Присутствие водорода в наплавленном металле сварного соединения отрицательно сказывается на свойствах последнего, а именно способствует появлению пор в металле шва, образованию холодных трещин в металле шва и в околошовной зоне, развитию «рыбьих глаз», снижению сопротивляемости металла хрупкому разрушению.

Для определения содержания диффузионно-подвижного водорода в металле шва при сварке покрытыми электродами применяют несколько методик. Принципиальное различие состоит в образце, применяемом для анализа, и в способе сбора водорода. Образцы, применяемые для анализа, представляют собой либо отливку в медный кокиль, либо пластинку из основного металла с наплавленным на нее валиком. По способу сбора водорода методики можно разделить на две группы.

К первой группе методических приемов относятся те, в которых сбор водорода осуществляется улавливанием выделяющегося из образца водорода после барботирования его в виде пузырьков через запирающую жидкость. В качестве запирающей жидкости используются этиловый спирт, парафиновое масло, глицерин, ртуть.

Ко второй группе относятся методики, в которых водород собирается в вакуумированном объеме.

Содержание диффузионного водорода в наплавленном металле определяли методом «карандашных проб».

Для этого в водоохлаждаемую медную изложницу наплавлялся образец, который сразу после наплавки охлаждался в воде и помещался в эвдиометр с 80 % смесью глицерина и дистиллированной воды с последующим подогревом её до 40…45 °С. Весь газ, выделившийся в эвдиометре в течении 3…4 суток, считался диффузионным водородом. За критерий брался выделившийся водород ($H_{диф}$), отнесенный к 100 г наплавленного металла.

$$[H]=\left(\frac{V}{p}\right)\cdot 100,\ \text{см}^3/100\ \text{гр}, \qquad (1)$$

где V – объем газа в пробирке, см^3; P – вес «карандашной пробы», г.

Сварочно-технологические свойства серийных электродов АНП-13 и опытных ВСЭ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сварочно-технологические свойства серийных электродов АНП-13 и опытных ВСЭ

Марка электродов	АНП-13	ВСЭ
Отделимость шлаковой корки	отличная	отличная
Ширина валиков, мм	36	35
Формирование поверхности валиков	Мелкочешуйчатая	Мелкочешуйчатая
Поростойкость	Пор нет	Пор нет
Твердость наплавленного металла, НВ	276	273
Содержание $H_{диф}$ в наплавленном металле, см^3/100 г	2,5	3,2

Образцы для изучения механических характеристик вырезались из наплавленного металла на пластину из стали Ст3 по ГОСТ 6996.

Механические испытания проводили на универсальной испытательной машине LF 300, копер маятниковый «Walter + Bai AG», твердомер ТШ-2М. На рис. 1 представлена торцевая часть образца, вырезанного из наплавленного металла электродами ВСЭ, и результаты измерения твердости.

Внешний вид образцов после испытаний на растяжение и ударную вязкость представлены на рис. 2 и 3. Результаты механических испытаний представлены в табл. 2.

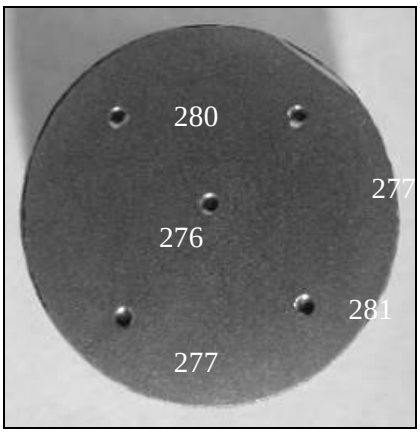
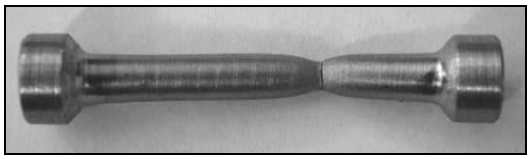


Рис. 1. Поперечное сечение образца с замерами твёрдости



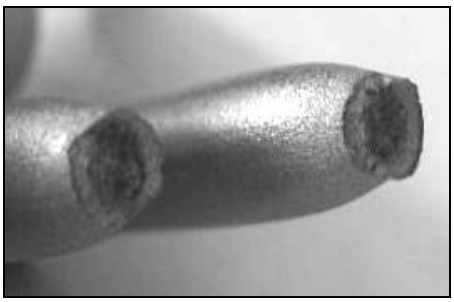


Рис. 2. Образец после испытания на растяжение

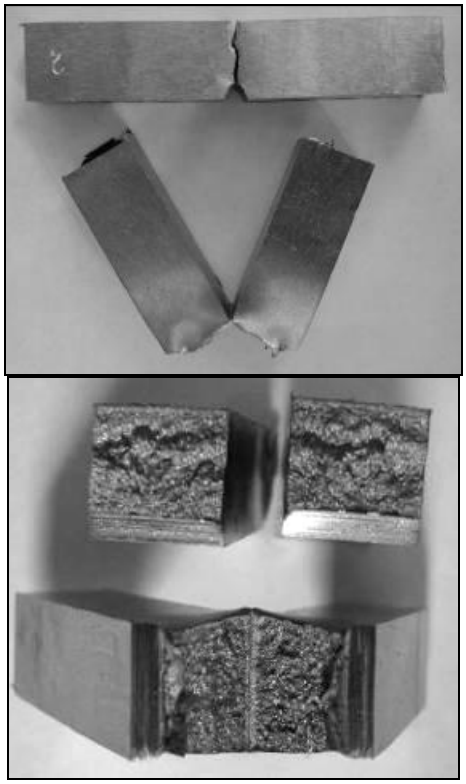


Рис. 3. Внешний вид образцов после испытания на ударный изгиб

Экспериментальные работы по наплавке изношенных поверхностей проводились на корпусах букс колесных пар тележек грузовых вагонов магистральных железных дорог согласно «Инструкции по сварке и наплавке при ремонте грузовых вагонов» ЦВ-201-98.

Электроды АНП-13 и ВСЭ диаметром 4 мм перед сваркой прокаливались в печи 2 часа при температуре 380 ºС. Перед наплавкой корпуса букс опорные поверхности Б и направляющие поверхности А (рис. 4) зачищались до металлического блеска. Наплавка выполнялась на постоянном токе обратной полярности при $I_{св}$ = 140…160 А, U = 24…26.

Таблица 2

Механические характеристики металла при наплавке электродами АНП-13 и ВСЭ

Марка электрода	АНП-13	ВСЭ
Твердость наплавленного металла, НВ	260–296	255–290
Предел текучести $\sigma_т$, МПа	960,8	932,6
Предел прочности $\sigma_т$, МПа	1086	1048
Относительное удлинение, δ_5, %	12,6	13,2
Относительное сужение ψ, %	34,5	36,3
Ударная вязкость $a_н$, Дж/см^2	112,4	110,2

Наплавку опорных поверхности Б производили в 2 слоя с припуском на механическую обработку 2 мм. Восстановление поверхностей А производили «крест-накрест», при этом производили проковку каждого слоя металла для релаксации внутренних напряжений сразу после завершения наплавки. После выполнения последнего прохода корпус буксы оставляли в нагруженном состоянии до полного охлаждения. В табл. 3 приведены геометрические параметры букс до и после наплавки.

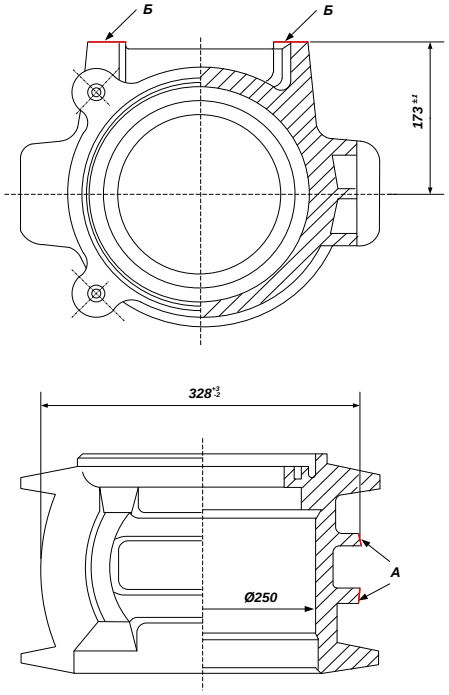


Рис. 4. Корпус буксы:
А – направляющие поверхности, Б – опорная поверхность

Таблица 3

Геометрические параметры букс до и после наплавки, параметры твердости

Номер буксы	Опорная поверхность, мм		Направляющие, мм		Твердость, НВ
	до	после	до	после	
1	166	176	322	326	268
2	165	175	317	327	264
3	166	176	316	326	267
4	164	175	323	326	266
5	167	175	316	326	270
6	166	176	322	327	272
7	165	175	323	326	273
8	167	175	317	327	270

Контроль и оценка качества наплавленных поверхностей корпусов букс производились следующими методами:

– внешним осмотром – после наплавки и остывания и после механической обработки с использованием лупы х5;

– шаблоном для контроля расстояния между челюстями вдоль оси вагона (328,2°);

– шаблоном для контроля расстояния от оси буксы до опорной поверхности (173±1);

– электронным прибором для контроля размеров и формы внутренней части корпуса буксы модель БВ-7588;

– замеры твердости обработанных поверхностей производили переносным твердомером ТЭМП-3.

После проведенных испытаний наплавленные буксы установлены на грузовой вагон и направлены в эксплуатацию. На момент проведения последующих замеров пробег вагона составил 68000 км. Результаты измерений приведены в табл. 4.

В результате опытно-сравнительных испытаний электроды марки ВСЭ показали хорошие сварочно-технологические свойства при наплавке: стабильное горение дуги, хорошее формирование валика, ровную и хорошо отделяющуюся шлаковую корку при низком разбрызгивании метала. Износ наплавленных поверхностей практически не отличается от износа поверхностей, наплавленных серийными электродами АНП-13.

Таблица 4

Геометрические параметры букс и замеры твердости

Номер буксы	Опорная поверхность, мм	Направляющие, мм	Твердость, НВ
1	172,6	323,5	274
2	173,2	323	274
3	172,5	323	275
4	173	323	273
5	173,5	324	279

Из приведенных данных следует, что средняя твердость восстановленных поверхностей корпусов букс, наплавленных электродами ВСЭ и АНП-13, составила 274 НВ и 279 НВ соответственно. Средний износ опорных поверхностей составил 2,67 мм и 2,34 мм, направляющих – 3,13 мм и 3,0 мм.

Опытно-сравнительные испытания показали, что механические характеристики и износ поверхностей корпусов букс, наплавленных электродами ВСЭ, соответствуют нормативно-технической документации по сварке и наплавке при ремонте грузовых вагонов, а также удовлетворяют требованиям, предъявляемых к электродам АНП-13.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Матафонов А.А, Бычинский В.А., Руш Е.А. Оптимизация состава сварочных электродов на основе физико–химического моделирования // Вестник ИрГТУ. – 2010. – № 4.

УДК 681.516.3

Куцый Николай Николаевич,
д. т. н., проф. кафедры «Автоматизированные системы»
Иркутского государственного технического университета,
тел.: (3952)38-35-85, e-mail: kucyinn@mail.ru
Осипова Елизавета Алексеевна,
аспирант кафедры «Автоматизированные системы»
Иркутского государственного технического университета,
тел.: 89501204839, e-mail: osipovaelizaveta@yandex.ru

АНАЛИЗАТОРЫ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КАСКАДНОЙ СИСТЕМЫ С ДВУМЯ ИНТЕГРАЛЬНЫМИ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНЫМИ РЕГУЛЯТОРАМИ СТАБИЛИЗАЦИИ ТОЛЩИНЫ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЯ

Kucyi N.N., Osipova E.A.

THE SENSITIVITY ANALYZERS OF CASCADE CONTROL SYSTEM WITH TWO INTEGRAL PULSE-DURATION CONTROLLERS OF CABLE INSULATION THICKNESS STABILIZATION

Аннотация. *Получены уравнения чувствительности для каскадной системы с двумя интегральными широтно-импульсными регуляторами стабилизации толщины изоляции кабеля. Сформированы на их основе анализаторы чувствительности, позволяющие перейти к реализации алгоритмов параметрической оптимизации (АПО).*

Ключевые слова: *интегральная широтно-импульсная модуляция, автоматическая параметрическая оптимизация, анализаторы чувствительности.*

Abstract. *The sensitivity equations for cascade automatic control system with two integral pulse-duration controllers of cable insulation thickness stabilization have been obtained. The sensitivity analyzers have been built on basis of these equations. Thereby resulted functions play an important role in implementation of automatic parametric optimization algorithms.*

Keywords: *integral pulse-duration modulation, automatic parametric optimization, sensitivity analyzers.*

При автоматизации технологических процессов (в том числе на кабельном производстве) многие объекты регулирования характеризуются большим временем запаздывания и значительными возмущениями. Эти обстоятельства снижают быстродействие и ограничивают коэффициенты усиления регуляторов одноконтурных автоматических систем регулирования (АСР), что, в свою очередь, не обеспечивает приемлемого качества регулирования сложных объектов по одноконтурным схемам. В таких ситуациях естественным является стремление повысить качество регулирования за счет получения своевременной информации о действующих на объект возмущениях по добавочным информационным каналам. Одним из наиболее распространенных вариантов таких систем являются каскадные системы (или системы подчиненного регулирования) [1].

В настоящей статье рассматривается возможность использования в схемах каскадного регулирования импульсных элементов (ИЭ), осуществляющих интегральную широтно-импульсную модуляцию (ИШИМ), в качестве корректирующего (главного) и стабилизирующего (вспомогательного) регуляторов. При этом объектом исследования послужила система стабилизации толщины изоляции при наличии детерминированных ступенчатых возмущающих воздействий со стороны исполнительного механизма – электропривода тянущего устройства (рис. 1).

Одной из важных задач исследования данной АСР является определение оптимальных настроек ИЭ при помощи алгоритмов АПО, ориентированных на современную вычислительную технику. Среди них выделяют беспоисковые алгоритмы оптимизации, основанные на градиентной итеративной процедуре, в которых приближенные значения составляющих градиента вычисляются

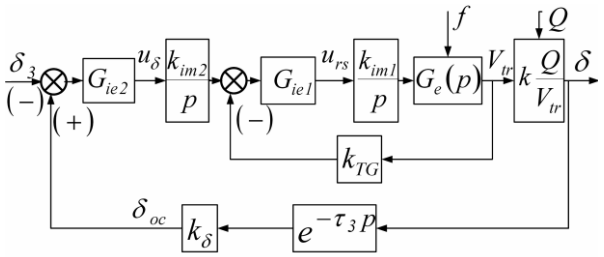


Рис. 1.

с использованием функций чувствительности [2]. Интерес к такого рода беспоисковому градиентному алгоритму применительно к системам с ИШИМ объясняется наличием достаточно развитой теоретической базы; существованием практических правил, позволяющих строить уравнения и анализаторы чувствительности для импульсных систем, в том числе многоконтурных, содержащих сложные перекрестные нелинейные связи; положительный опыт применения беспоисковых градиентных методов для решения задач адаптации и идентификации при построении самонастраивающихся систем с ШИМ [3–5]; наличие публикаций, направленных на изучение связи, существующей между чувствительностью и устойчивостью по Ляпунову [6].

В известных публикациях изложены методики применения данного алгоритма для решения вышеозначенной задачи в двухкаскадных системах, когда один регулятор представляет собой ИЭ, осуществляющий модуляцию первого рода, а другой – ПИ-регулятор [7] или когда оба контура снабжены амплитудно-импульсным регулятором первого рода [8]. Правомерность создания этих методик объясняется тем, что каждый класс импульсных АСР имеет свои отличия, которые в контексте исследования каскадных систем не позволяют осуществить формальный перенос результатов решения задачи параметрической оптимизации в системах одного класса на решение аналогичных задач в системах другого класса [3]. Очевидно, что задача синтеза параметров регуляторов каскадных импульсных систем, которые имеют нелинейный ИЭ, в числе которых системы с ИШИМ, включает разработку методик, пригодных для всего класса систем с ШИМ или его подклассов. Переходя к описанию методики параметрической оптимизации каскадных систем с ИШИМ, отметим, что важным остается получить выражения, благодаря которым впоследствии строятся анализаторы чувствительности. А последние, в свою очередь, дают возможность вычислить функции чувствительности и в конечном счете реализовать алгоритм АПО.

На рис. 1 представлена структурная схема АСР толщины изоляции с обратной связью по толщине изоляции δ_{oc}, базирующаяся на математической модели, представленной в [9]. Откуда видно, что результат сравнения сигнала требуемой толщины изолирующей оболочки δ_3 с отрицательным знаком и сигнала датчика толщины k_δ после выхода кабельного изделия из охлаждающей ванны $e^{-\tau_3 p}$ подается на вход регулятора толщины G_{ie2}.

Объект регулирования нелинейный и на структурной схеме представлен в виде

$$\delta = k\frac{Q}{V_{tr}}.$$

При этом именно гиперболическая зависимость между выходной и входной величинами объекта предопределила положительный знак обратной связи внешнего контура. Такая обратная связь обеспечивает работоспособность рассматриваемой АСР, позволяя при увеличении δ_{oc} сформировать команду на увеличение линейной скорости протяжки V_{tr}, а при уменьшении δ_{oc} – на уменьшение V_{tr}. Объемная производительность Q, отрабатываемая электроприводом экструдера, постоянна.

Для измерения V_{tr} используется тахогенератор, напряжение u_{TG} которого пропорционально V_{tr}

$$u_{TG} = k_{TG}V_{tr};$$

где k_{TG} – коэффициент преобразования линейной скорости протяжки кабельного изделия в напряжение.

В роли исполнительного механизма объекта регулирования выступает электропривод тянущего устройства $G_e(p)$. Возмущение f, идущее со стороны этого электропривода в виде изменения нагрузки на валу, принято в данной работе за возмущающее воздействие характерного вида. Ясно, что такое возмущение оказывает непосредственное влияние на скорость протяжки кабельного изделия по всей длине экструдерной линии. Однако если поддерживать только заданную скорость протяжки, то в случае появления иных возмущений толщина изоляции готового кабельного изделия может оказаться за пределами требуемой точности. Поэтому целесообразно использовать двухкаскадную схему регулирования, которая позволяет осуществлять быструю компенсацию возмущений f в самом начале их появления, предотвращая возникновение больших колебаний δ_{oc}.

В рассматриваемой схеме регулятор скорости G_{ie1} оказывает быстрое стабилизирующее действие благодаря тому, что запаздывание и инерционность вспомогательной величины (V_{tr}) по отношению к регулирующему воздействию u_δ значительно меньше, чем у основной регулируемой величины δ_{oc}. Именно это явилось решающим фактором при выборе точки измерения вспомогательной регулируемой величины в данной каскадной системе [10].

Как известно, задачу регулирования объектов с большим запаздыванием, т. е. при выполнении неравенства $\tau_3 / T_{ob} > 1$, где τ_3 – время запаздывания; $T_{ob} = max\left[T_{ob1},...,T_{obn}\right]$ – инерционность объекта, можно достаточно успешно решить в классе импульсных регуляторов [10]. Исходя из этого с целью облегчения процесса согласования АСР, представленной на рис. 1, с цифровыми вычислительными устройствами и повышения показателей качества стабилизации предлагается в качестве корректирующего (главного) и стабилизирующего (вспомогательного) регуляторов использовать ИЭ, осуществляющие ИШИМ и имеющие m настраиваемых параметров.

Уравнения для двухкаскадной АСР (рис. 1) могут быть записаны в операторной форме:

$$
\begin{aligned}
&V_{tr}(t,\boldsymbol{q}) = \frac{k_{im1}}{p} G_e(p) u_{rs}(t,\boldsymbol{q}),\\
&u_{rs}(t,\boldsymbol{q}) = G_{ie1}(\varepsilon_1(t,\boldsymbol{q}),\boldsymbol{q}_1,t),\\
&\varepsilon_1(t,\boldsymbol{q}) = \frac{k_{im2}}{p} u_\delta(t,\boldsymbol{q}) - k_{TG} V_{tr}(t,\boldsymbol{q}),\\
&\delta_{oc}(t,\boldsymbol{q}) = k_\delta e^{-\tau_3 p} \frac{kQ}{V_{tr}(t,\boldsymbol{q})},\\
&\varepsilon(t,\boldsymbol{q}) = \delta_{oc}(t,\boldsymbol{q}) - \delta_3(t),\\
&u_\delta(t,\boldsymbol{q}) = G_{ie2}(\varepsilon(t,\boldsymbol{q}),\boldsymbol{q}_2,t),
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

с начальными условиями установившегося режима экструдерной линии для электропривода тянущего устройства

$$V_{tr}(0) = V_{tr}^0,\ \ Q(0) = Q_0,\ \ \delta(0) = \delta_0,$$

где $\boldsymbol{q} = \left(q_{11},...,q_{1m_1},q_{21},...,q_{2m_2}\right)'$ – вектор настраиваемых параметров внутреннего и внешнего контуров («штрих» здесь и ниже означает транспонирование).

Излагаемая методика разработана применительно к каскадным системам с сосредоточенными параметрами с запаздыванием. При этом предполагается, что динамические свойства объектов регулирования сохраняются неизменными, а возмущения носят детерминированный характер и имеют скачкообразную форму. В связи с этим в основу разработанной методики положен следующий критерий оптимального качества регулирования: минимальное значение интегральной квадратичной оценки динамики регулирования по величине ошибки:

$$I = \int_0^\infty \left(\delta_3(t) - \delta_{oc}(t,\boldsymbol{q})\right)^2 dt. \qquad (2)$$

Характеристика ИЭ, осуществляющего ИШИМ, G_{ie1} во внутреннем контуре может быть представлена как

$$u_{rs}(\varepsilon_1(t,\boldsymbol{q}),\boldsymbol{q}_1,t) = \begin{cases} \theta_{k_1} & \text{при } k_1T_1 < t \le k_1T_1 + t_{k_1},\\ 0 & \text{при } k_1T_1 + t_{k_1} < t \le (k_1+1)T_1, \end{cases}$$

$$\theta_{k_1} = sign\,\varepsilon_1[k_1T_1],\ \ k_1 = 0,1,2,... .$$

Здесь T_1 – период цикла работы ИЭ во внутреннем контуре; t_{k_1} – времени действия k_1-го импульса, для определения которого предлагается в тактовый момент времени измерять ошибку регулирования $\varepsilon_1[k_1T_1]$, а затем в зависимости от измеренного значения ошибки выполнять следующее. Если $|\varepsilon_1[k_1T_1]| > 0$, то t_{k_1} – наименьший положительный на $(0,T_1)$ корень уравнения

$$S(\varepsilon_1(t,\boldsymbol{q}),\boldsymbol{q}_1) = \Phi(t_{u_1}),$$

иначе $t_{k_1} = 0$ и $u_{rs}(\varepsilon_1(t,\boldsymbol{q}),\boldsymbol{q}_1,t) = 0$ при $k_1T_1 \le t < (k_1+1)T_1$. В случае отсутствия такого корня $t_{k_1} = T_1$.

$S(\varepsilon_1(t,\boldsymbol{q}),\boldsymbol{q}_1)$ определяется исходя из

$$S(\varepsilon_1(t,\boldsymbol{q}),\boldsymbol{q}_1) = q_{11} \int_{k_1T_1}^{k_1T_1+t_{u_1}} |\varepsilon_1(t,\boldsymbol{q})| dt + q_{12} \int_{k_1T_1}^{k_1T_1+t_{u_1}} |\varepsilon_1(t,\boldsymbol{q})|^2 dt + ... =$$

$$= \int_{k_1T_1}^{k_1T_1+t_{u_1}} \sum_{j_1=1}^{m_1} q_{1j_1} |\varepsilon_1(t,\boldsymbol{q})|^{j_1} dt,$$

где t_{u_1} – время, отсчитываемое внутри периода T_1. Опорный сигнал $\Phi(t_{u_1})$. может быть реализован в виде параболы второй степени: $\Phi(t_{u_1}) = t_{u_1}^2$.

Характеристика ИЭ, осуществляющего ИШИМ, G_{ie2} во внешнем контуре может быть представлена

$$u_\delta(\varepsilon(t,\boldsymbol{q}),\boldsymbol{q}_2,t) = \begin{cases} \theta_{k_2} & \text{при } k_2T_2 < t \le k_2T_2 + t_{k_2},\\ 0 & \text{при } k_2T_2 + t_{k_2} < t \le (k_2+1)T_2, \end{cases}$$

$$\theta_{k_2} = sign\,\varepsilon[k_2T_2],\ \ k_2 = 0,1,2,... .$$

Здесь T_2 – период цикла работы ИЭ во внешнем контуре; t_{k_2} – времени действия k_2-го импульса, для определения которого предлагается в такто-

вый момент времени измерять ошибку регулирования $\varepsilon[k_2T_2]$, а затем в зависимости от измеренного значения ошибки выполнять следующее. Если $|\varepsilon[k_2T_2]|>0$, то t_{k_2} – наименьший положительный на $(0,T_2)$ корень уравнения

$$S(\varepsilon(t,\boldsymbol{q}),\boldsymbol{q}_2)=\Phi(t_{u_2}),$$

иначе $t_{k_2}=0$ и $u_\delta(\varepsilon(t,\boldsymbol{q}),\boldsymbol{q}_2,t)=0$ при $k_2T_2\le t<(k_2+1)T_2$. В случае отсутствия такого корня $t_{k_2}=T_2$.

$S(\varepsilon(t,\boldsymbol{q}),\boldsymbol{q}_2)$ определяется исходя из

$$S(\varepsilon(t,\mathbf{q}),\ \mathbf{q}_2)=q_{21}\int\limits_{k_2T_2}^{k_2T_2+t_{u2}}|\varepsilon(t,\mathbf{q})|dt+q_{22}\int\limits_{k_2T_2}^{k_2T_2+t_{u2}}|\varepsilon(t,\mathbf{q})|^2dt+\ldots=$$
$$=\int\limits_{k_2T_2}^{k_2T_2+t_{u2}}\sum_{j_2=1}^{m_2}q_{2j_2}|\varepsilon(t,\mathbf{q})|^{j_2}dt,$$

где t_{u_2} – время, отсчитываемое внутри периода T_2. Опорный сигнал $\Phi(t_{u_2})$. может быть реализован в виде параболы второй степени: $\Phi(t_{u_2})=t_{u_2}^2$.

В случае определения оптимальных параметров с помощью беспоискового градиентного алгоритма с его известными преимуществами:

$$\boldsymbol{q}[l+1]=\boldsymbol{q}[l]-\alpha[l]\,grad\,I(\boldsymbol{q}[l]).$$

Здесь $l=1,2,...$ – номер итерации; $grad\,I(\boldsymbol{q}[l])$ обозначает градиент показателя качества (2), определяемый как вектор-столбец

$$grad\,I(\boldsymbol{q}[l])=\left(\frac{\partial I(\boldsymbol{q}[l])}{\partial q_{11}},\frac{\partial I(\boldsymbol{q}[l])}{\partial q_{12}},...,\frac{\partial I(\boldsymbol{q}[l])}{\partial q_{1m_1}},\frac{\partial I(\boldsymbol{q}[l])}{\partial q_{21}},...,\right.$$
$$\left.\frac{\partial I(\boldsymbol{q}[l])}{\partial q_{2m_2}}\right)';$$

$\alpha[l]$ – коэффициент, определяющий величину шага спуска по направлению с наибыстрейшим убыванием критерия оптимизации.

Оценивая чувствительность интегральной оценки (2) к вариациям настраиваемых параметров, имеем

$$\frac{\partial I}{\partial q_{11}}=-2\int_0^L(\delta_3(t)-\delta_{oc}(t,\boldsymbol{q}))\frac{\partial\delta_{oc}(t,\boldsymbol{q})}{\partial q_{11}}dt,$$
...
$$\frac{\partial I}{\partial q_{1m_1}}=-2\int_0^L(\delta_3(t)-\delta_{oc}(t,\boldsymbol{q}))\frac{\partial\delta_{oc}(t,\boldsymbol{q})}{\partial q_{1m_1}}dt, \quad (3)$$
$$\frac{\partial I}{\partial q_{21}}=-2\int_0^L(\delta_3(t)-\delta_{oc}(t,\boldsymbol{q}))\frac{\partial\delta_{oc}(t,\boldsymbol{q})}{\partial q_{21}}dt,$$
...
$$\frac{\partial I}{\partial q_{2m_2}}=-2\int_0^L(\delta_3(t)-\delta_{oc}(t,\boldsymbol{q}))\frac{\partial\delta_{oc}(t,\boldsymbol{q})}{\partial q_{2m_2}}dt.$$

Учитывая, что для рассматриваемого случая двух контуров элементы матрицы функций чувствительности

$\Xi(t)=\left\|\xi_{ij_i}(t)\right\|, i=1,2;\ j_1=\overline{1,m_1};\ j_2=\overline{1,m_2}$, могут быть записаны как

$$\Xi(t)=\left\|\begin{matrix}\frac{\partial V_{tr}}{\partial q_{11}} & \ldots & \frac{\partial V_{tr}}{\partial q_{1m_1}} & \frac{\partial V_{tr}}{\partial q_{21}} & \ldots & \frac{\partial V_{tr}}{\partial q_{2m_2}}\\ \frac{\partial\delta_{oc}}{\partial q_{11}} & \ldots & \frac{\partial\delta_{oc}}{\partial q_{1m_1}} & \frac{\partial\delta_{oc}}{\partial q_{21}} & \ldots & \frac{\partial\delta_{oc}}{\partial q_{2m_2}}\end{matrix}\right\|,$$

а координаты $V_{tr}(t,\boldsymbol{q})$ и $\delta_{oc}(t,\boldsymbol{q})$ связаны между собой, найдем элементы второй строки матрицы

$$\xi_{2j_i}(t)=k_\delta e^{-\tau_э p}\left(-k\frac{Q(t)}{V_{tr}^2(t,\boldsymbol{q})}\frac{\partial V_{tr}(t,\boldsymbol{q})}{\partial q_{ij_i}}\right),\ i=1,2;\quad (4)$$
$$j_1=\overline{1,m_1};\ j_2=\overline{1,m_2}.$$

Уравнения (4) показывают, что, зная $\xi_{1j_i}(t),\ j_1=\overline{1,m_1},\ j_2=\overline{1,m_2}$, можно достаточно легко вычислить составляющие $grad\,I(\boldsymbol{q}[l])$ (3).

Для внутреннего контура, содержащего ИЭ с ИШИМ, применив обобщенное дифференцирование [11], получим уравнения чувствительности

$$\xi_{1j_1}(t)=\frac{k_{im1}}{p}G_e(p)\frac{Du_{rs}(t,\boldsymbol{q})}{\partial q_{1j_1}},\ j_1=\overline{1,m_1},\quad (5)$$

где $D/\partial q_{1j_1}$ – оператор обобщенного дифференцирования по настраиваемому параметру q_{1j_1}.

Выражение для

$$\frac{Du_{rs}(t,\boldsymbol{q})}{\partial q_{1j_1}}=\left(\frac{Du_{rs}(t,\boldsymbol{q})}{\partial q_{11}},...,\frac{Du_{rs}(t,\boldsymbol{q})}{\partial q_{1m_1}}\right)$$

представляет собой вектор с элементами [11]

$$\frac{Du_{rs}(t,\mathbf{q})}{\partial q_{1j_1}}=-\sum_{k_1}\Delta u_{rs}^{t_{k_1}}\frac{dt_{k_1}(\varepsilon_1(t,\mathbf{q}),\mathbf{q}_1)}{dq_{1j_1}}\delta\left(t-\left(k_1T_1+t_{k_1}\right)\right),\quad (6)$$
$$k_1=0,\ 1,\ 2,\ ...;\ j_1=\overline{1,\ m_1},$$

где t_{k_1}, $(k_1=0,1,2,...)$ – k_1-й разрыв регулирующего воздействия $u_{rs}(t,\boldsymbol{q})$ в момент времени $(k_1T_1+t_{k_1})$; $\Delta u_{rs}^{t_{k1}}=u_{rs}(k_1T_1+t_{k_1}+0)-u_{rs}(k_1T_1+t_{k_1}-0)$ – скачок регулирующего воздействия в моменты его разрыва $(k_1T_1+t_{k_1})$; $\delta(t-(k_1T_1+t_{k_1}))$ – смещённая дельта-функция.

Производные по настраиваемым параметрам q_{1j_1} $\dfrac{dt_{k1}}{dq_{1j_1}}\left(k_1=0,1,2,...;\ j_1=\overline{1,m_1}\right)$ вычисляются исходя из равенства

$$\int_{k_1T_1}^{k_1T_1+t_{k_1}} \sum_{j_1=1}^{m_1} q_{1j_1}\left|\varepsilon_1(t,\boldsymbol{q})\right|^{j_1} dt = t_{k_1}^2, \qquad (7)$$

которое выполняется в моменты $t = k_1T_1 + t_{k_1}(\varepsilon_1(t,\boldsymbol{q}),\boldsymbol{q}_1)$, $(k_1 = 0,1,2,...)$, как

$$\frac{dt_{k_1}}{dq_{1j_1}} = \int_{k_1T_1}^{k_1T_1+t_{k_1}} \left(\left|\varepsilon_1(t,\mathbf{q})\right|^{j_1} + \left(\sum_{j_1=1}^{m_1} j_1 q_{1j_1} \left|\varepsilon_1(t,\mathbf{q})\right|^{j_1-1} \right) \left(\frac{\partial\left|\varepsilon_1(t,\mathbf{q})\right|}{\partial q_{1j_1}} \right) \right) dt : \\ : \left(2t_{k_1} - \left(\sum_{j_1=1}^{m_1} q_{1j_1} \left|\varepsilon_1\left(k_1T_1 + t_{k_1}\right)\right|^{j_1} \right) \right), \\ \left(j_1 = \overline{1,m_1}\right). \qquad (8)$$

Проблема вычисления $\frac{\partial\left|\varepsilon_1(t,\boldsymbol{q})\right|}{\partial q_{1j_1}}$ решается следующим образом:

$$\frac{\partial\left|\varepsilon_1(t,\boldsymbol{q})\right|}{\partial q_{1j_1}} = \begin{cases} \dfrac{\partial\varepsilon_1(t,\boldsymbol{q})}{\partial q_{1j_1}} \ при\ \varepsilon_1(t,\boldsymbol{q}) \ge 0, \\ -\dfrac{\partial\varepsilon_1(t,\boldsymbol{q})}{\partial q_{1j_1}} \ при\ \varepsilon_1(t,\boldsymbol{q}) < 0,\ j_1 = \overline{1,m_1}. \end{cases} \qquad (9)$$

Входящие в (9) производные $\frac{\partial\varepsilon_1(t,\boldsymbol{q})}{\partial q_{1j_1}}$, $j_1 = \overline{1,m_1}$, определяются из третьего уравнения системы (1):

$$\frac{\partial\varepsilon_1(t,\boldsymbol{q})}{\partial q_{1j_1}} = \frac{k_{im2}}{p}\frac{Du_\delta(t,\boldsymbol{q})}{\partial q_{1j_1}} - k_{TG}\cdot\xi_{1j_1},\ j_1 = \overline{1,m_1}, \qquad (10)$$

подставляя результат дифференцирования шестого уравнения этой же системы

$$\frac{Du_\delta(t,\boldsymbol{q})}{\partial q_{1j_1}} = \left(\frac{Du_\delta(t,\boldsymbol{q})}{\partial q_{11}},...,\frac{Du_\delta(t,\boldsymbol{q})}{\partial q_{1m_1}} \right),$$

который представляет собой вектор с элементами [11]

$$\frac{Du_\delta(t,\boldsymbol{q})}{\partial q_{1j_1}} = -\sum_{k_2}\Delta u_\delta^{t_{k_2}} \frac{dt_{k_2}(\varepsilon(t,\boldsymbol{q}),\boldsymbol{q}_2)}{dq_{1j_1}}\delta\left(t-\left(k_2T_2+t_{k_2}\right)\right), \\ k_2 = 0,1,2,...;\ j_1 = \overline{1,m_1}, \qquad (11)$$

где t_{k_2} $(k_2 = 0,1,2,...)$ – k_2-й разрыв регулирующего воздействия $u_\delta(t,\boldsymbol{q})$ в момент времени $\left(k_2T_2+t_{k_2}\right)$; $\Delta u_\delta^{t_{k_2}} = u_\delta\left(k_2T_2+t_{k_2}+0\right) - u_\delta\left(k_2T_2+t_{k_2}-0\right)$ – скачок регулирующего воздействия в моменты его разрыва $\left(k_2T_2+t_{k_2}\right)$; $\delta\left(t-\left(k_2T_2+t_{k_2}\right)\right)$ – смещённая дельта-функция.

Из равенства

$$\int_{k_2T_2}^{k_2T_2+t_{k_2}} \sum_{j_2=1}^{m_2} q_{2j_2}\left|\varepsilon(t,\boldsymbol{q})\right|^{j_2} dt = t_{k_2}^2,$$

которое выполняется в моменты времени $\left(k_2T_2+t_{k_2}\right)$, получим

$$\frac{dt_{k_2}}{dq_{1j_1}} = \int_{k_2T_2}^{k_2T_2+t_{k_2}} \left(\left(\sum_{j_2=1}^{m_2} j_2 q_{2j_2} \left|\varepsilon(t,\boldsymbol{q})\right|^{j_2-1} \right) \left(\frac{\partial\left|\varepsilon(t,\boldsymbol{q})\right|}{\partial q_{1j_1}} \right) \right) dt : \\ : \left(2t_{k_2} - \left(\sum_{j_2=1}^{m_2} q_{2j_2} \left|\varepsilon\left(k_2T_2+t_{k_2}\right)\right|^{j_2} \right) \right), \qquad (12)$$

$$\frac{\partial\left|\varepsilon(t,\boldsymbol{q})\right|}{\partial q_{1j_1}} = \begin{cases} \dfrac{\partial\varepsilon(t,\boldsymbol{q})}{\partial q_{1j_1}} \ при\ \varepsilon(t,\boldsymbol{q}) \ge 0, \\ -\dfrac{\partial\varepsilon(t,\boldsymbol{q})}{\partial q_{1j_1}} \ при\ \varepsilon(t,\boldsymbol{q}) < 0,\ j_1 = \overline{1,m_1}. \end{cases} \qquad (13)$$

$$\frac{\partial\varepsilon(t,\boldsymbol{q})}{\partial q_{1j_1}} = \frac{\partial\delta_{oc}(t,\boldsymbol{q})}{\partial q_{1j_1}} = \xi_{2j_1}(t),\ j_1 = \overline{1,m_1}. \qquad (14)$$

Выражения (5)–(14) позволяют сформировать анализаторы чувствительности для внутреннего контура. Схема анализатора представлена на рис. 2.

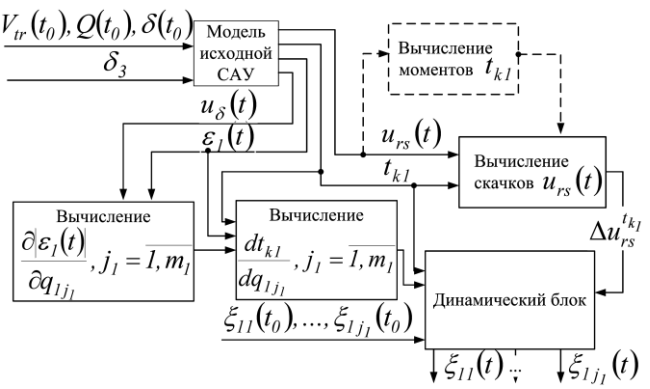


Рис. 2.

При реализации на средствах вычислительной техники сформированного анализатора чувствительности необходимо моделировать смещенные дельта-функции $\delta\left(t-\left(k_1T_1+t_{k_1}\right)\right)$, $k_1 = 0,1,2,....$ Во избежание искажения результатов вычисления функций чувствительности, связанных с дополнительными погрешностями при аппроксимации дельта-функции непрерывными функциями, избран подход [3], позволяющий заменить

$$\xi_{1j_1}(t) = \frac{k_{im1}}{p}G_e(p)\left(-\sum_{k_1}\Delta u_{rs}^{t_{k_1}} \frac{dt_{k_1}}{dq_{1j_1}}\,\delta\left(t-\left(k_1T_1+t_{k_1}\right)\right)\right)$$

на

$$\xi_{1j_1}(t)=k_{im1}G_e(p)\left(-\sum_{k_1}\Delta u_{rs}^{t_{k_1}}\frac{dt_{k_1}}{dq_{1j_1}}1\left(t-\left(k_1T_1+t_{k_1}\right)\right)\right),$$

$$k_1=0,1,2,...;\ j_1=\overline{1,m_1},$$

ввиду линейности оператора $\frac{k_{im1}}{p}\cdot G_e(p)$.

Также благодаря этому подходу способ вычисления j_1-й компоненты вектора $\left(\frac{\partial|\varepsilon_1(t,\boldsymbol{q})|}{\partial q_{11}},...,\frac{\partial|\varepsilon_1(t,\boldsymbol{q})|}{\partial q_{1m_1}}\right)$, согласно выражениям (9)–(14), может быть представлен схемой на рис. 3.

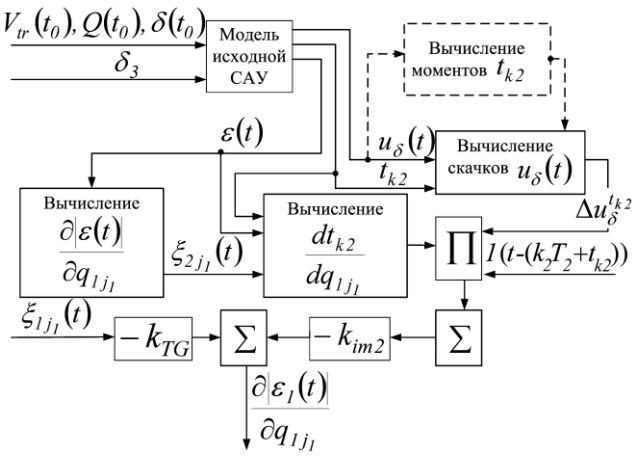


Рис. 3

Аналогичным образом формируются анализаторы чувствительности координаты $V_{tr}(t,\boldsymbol{q})$ объекта регулирования по отношению к вариациям параметров ИЭ внешнего контура $\boldsymbol{q}_2$ на основании полученных ниже выражений.

Выражения для анализаторов чувствительности по настраиваемым параметрам G_{ie2} могут быть получены из (1):

$$\xi_{1j_2}(t)=\frac{\partial V_{tr}(t,\boldsymbol{q})}{\partial q_{2j_2}}=\frac{k_{im1}}{p}G_e(p)\frac{Du_{rs}(t,\boldsymbol{q})}{\partial q_{2j_2}},$$

$$\frac{Du_{rs}(t,\mathbf{q})}{\partial q_{2j_2}}=-\sum_{k_1}\Delta u_{rs}^{t_{k_1}}\frac{dt_{k_1}\left(\varepsilon_1(t,\mathbf{q}),\mathbf{q}_1\right)}{dq_{2j_2}}\delta\left(t-\left(k_1T_1+t_{k_1}\right)\right),$$

$$k_1=0,\ 1,\ 2,\ ...;\ j_2=\overline{1,\ m_2}.$$

Дифференцируя по q_{2j_2} равенство (7), осуществим вывод формулы для вычисления $\frac{dt_{k_1}}{dq_{2j_2}}\left(k_1=0,1,2,...;\ j_2=\overline{1,m_2}\right)$:

$$\frac{dt_{k_1}}{dq_{2j_2}}=\int_{k_1T_1}^{k_1T_1+t_{k_1}}\left(\left(\sum_{j_1=1}^{m_1}j_1q_{1j_1}\left|\varepsilon_1(t,\mathbf{q})\right|^{j_1-1}\right)\left(\frac{\partial\left|\varepsilon_1(t,\mathbf{q})\right|}{\partial q_{2j_2}}\right)\right)dt:$$

$$:\left(2t_{k_1}-\left(\sum_{j_1=1}^{m_1}q_{1j_1}\left|\varepsilon_1\left(k_1T_1+t_{k_1}\right)\right|^{j_1}\right)\right).$$

При этом

$$\frac{\partial|\varepsilon_1(t,\boldsymbol{q})|}{\partial q_{2j_2}}=\begin{cases}\frac{k_{im2}}{p}\frac{Du_\delta(t,\boldsymbol{q})}{\partial q_{2j_2}}-k_{TG}\cdot\xi_{1j_2}(t)\ npu\,\varepsilon_1(t,\boldsymbol{q})\ge 0,\\ -\frac{k_{im2}}{p}\frac{Du_\delta(t,\boldsymbol{q})}{\partial q_{2j_2}}+k_{TG}\cdot\xi_{1j_2}(t)\,npu\,\varepsilon_1(t,\boldsymbol{q})<0,\end{cases}$$

$$j_2=\overline{1,m_2},$$

где вектор $\frac{Du_\delta(t,\boldsymbol{q})}{\partial q_{2j_2}}=\left(\frac{Du_\delta(t,\boldsymbol{q})}{\partial q_{21}},...,\frac{Du_\delta(t,\boldsymbol{q})}{\partial q_{2m_2}}\right)$.

Причём

$$\frac{Du_\delta(t,\mathbf{q})}{\partial q_{2j_2}}=-\sum_{k_2}\Delta u_\delta^{t_{k_2}}\frac{dt_{k_2}\left(\varepsilon(t,\mathbf{q}),\mathbf{q}_2\right)}{dq_{2j_2}}\delta\left(t-\left(k_2T_2+t_{k_2}\right)\right),$$

$$k_2=0,\ 1,\ 2,\ ...;\ j_2=\overline{1,\ m_2}.$$

Из равенства

$$\int_{k_2T_2}^{k_2T_2+t_{k_2}}\sum_{j_2=1}^{m_2}q_{2j_2}\left|\varepsilon(t,\mathbf{q})\right|^{j_2}dt=t_{k_2}^2,$$

которое выполняется в моменты времени $\left(k_2T_2+t_{k_2}\right)$, получим

$$\frac{dt_{k_2}}{dq_{2j_2}}=\int_{k_2T_2}^{k_2T_2+t_{k_2}}\left(\left|\varepsilon(t,\mathbf{q})\right|^{j_2}+\left(\sum_{j_2=1}^{m_2}j_2q_{2j_2}\left|\varepsilon(t,\mathbf{q})\right|^{j_2-1}\right)\left(\frac{\partial\left|\varepsilon(t,\mathbf{q})\right|}{\partial q_{2j_2}}\right)\right)dt:$$

$$:\left(2t_{k_2}-\left(\sum_{j_2=1}^{m_2}q_{2j_2}\left|\varepsilon\left(k_2T_2+t_{k_2}\right)\right|^{j_2}\right)\right),$$

$$\left(j_2=\overline{1,m_2}\right).$$

$$\frac{\partial|\varepsilon(t,\boldsymbol{q})|}{\partial q_{2j_2}}=\begin{cases}\frac{\partial\varepsilon(t,\boldsymbol{q})}{\partial q_{2j_2}}\ \ npu\ \ \varepsilon(t,\boldsymbol{q})\ge 0,\\ -\frac{\partial\varepsilon(t,\boldsymbol{q})}{\partial q_{2j_2}}\ \ npu\ \ \varepsilon(t,\boldsymbol{q})<0,\ j_2=\overline{1,m_2}.\end{cases}$$

$$\frac{\partial\varepsilon(t,\boldsymbol{q})}{\partial q_{2j_2}}=\frac{\partial\delta_{oc}(t,\boldsymbol{q})}{\partial q_{2j_2}}=\xi_{2j_2}(t),j_2=\overline{1,m_2}.$$

Полученные выше выражения и сформированные на их основе анализаторы чувствительности позволяют реализовать алгоритм АПО для таких сложных систем, как каскадные системы стабилизации толщины изоляции кабельных изделий, и в конечном итоге решить задачу их параметрической оптимизации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ротач В. Я., Фыонг Н. З. К расчёту каскадных систем автоматического регулирования // Теплоэнергетика. – 1999. – № 10. – С. 10–16.
2. Розенвассер Е. Н., Юсупов Р. М. Чувствительность систем управления. – М. : Наука, 1981. – 464 с.
3. Куцый Н. Н. Автоматическая параметрическая оптимизация дискретных систем регулирования: автореферат дис. … д–ра техн. наук : 05.13.07. – Москва, 1997. – 44 с.
4. Маланова Т. В. Алгоритмическое обеспечение автоматической параметрической оптимизации систем с широтно–импульсной модуляцией: автореферат дис. … канд. техн. наук : 05.13.01. – Иркутск, 2010. – 18 с.
5. Высотская О. В. Разработка и исследование алгоритма автоматической параметрической оптимизации для систем с широтно–импульсной модуляцией: автореферат дис. … канд. техн. наук : 05.13.06. – Иркутск, 2003. – 17 с.
6. Гумовский И. Анализ чувствительности и устойчивость по Ляпунову // Чувствительность автоматических систем. – М.: Наука, 1968. – С. 3–25.
7. Широков Л. А., Петров И. К., Куцый Н. Н. Автоматическая оптимизация параметров многоконтурных систем с импульсным регулятором // Труды Всесоюзной школы–семинара по теории чувствительности систем управления и её применению «Чувствительность систем управления». – Владивосток. – 1976. – Т. I.– С. 279–289.
8. Куцый Н. Н., Нгуен Дык Тханг Автоматическая параметрическая оптимизация двухконтурных систем с двумя амплитудно–импульсными регуляторами // Сборник трудов IV Всероссийской научно–практической конференции «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов». – Томск. – 2010. – С. 132–142.
9. Иванов Г. М., Левин Г. М., Хуторецкий В.М. Автоматизированный многодвигательный электропривод постоянного тока. – М. : Энергия, 1978. – 160 с.
10. Стефани Е. П. Основы расчёта настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. – 2–е изд., перераб. – М. : Энергия, 1972. – 376 с.
11. Гельфанд И. М., Шилов Г. Е. Обобщенные функции и действия над ними. – 2–е изд., перераб. – М. : Физматгиз, 1959. – 470 с.

УДК 622.349.5:622.619.4

Тюпин Владимир Николаевич,
д. т. н., профессор каф. БЖДиЗС ЗабИЖТ ИрГУПС
тел. 89144408282, e–mail:bzhd@zab.megalink.ru
Горковенко Николай Александрович,
советник генерального директора ОАО ППГХО
тел. 8–30–245–3–50–72
Алексеев Олег Николаевич,
зам. главного инженера ремонтно–механического завода ОАО ППГХО
тел. 8–30–245–3–20–52

ТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТНОЙ ВЫЕМКИ МАЛОМОЩНЫХ УРАНОВЫХ РУДНЫХ ТЕЛ С ПРИМЕНЕНИЕМ УЗКОЗАХВАТНОЙ ПОГРУЗОЧНО-ДОСТАВОЧНОЙ ТЕХНИКИ

V.N. Tyupin, N.A. Gorkovenko, O.N. Alexseyev

SEWAGE CUTTING TECHNOLOGY OF LOW-CAPACITY URANIUM MINERAL ORES WITH AN APPLICATION OF DOMESTIC NARROW-CLAMP LOAD-DELIVERY TECHNIQUE

Аннотация. *Изложены актуальные проблемы применения в технологии очистной выемки при доставке руды узкозахватной отечественной погрузочно-доставочной машины для отработки маломощных рудных тел. Представлены результаты производственных испытаний ПДМ ПД-1Э и Microscoop-100E. Приведен сравнительный анализ технико-экономических показателей отечественной и зарубежной горной техники. Сделаны выводы на предмет применения узкозахватной горной машины ПД-1Э в технологии очистной*

выемки маломощных рудных тел и постановки ее в серийное производство.

Ключевые слова: *система разработки, погрузочно-доставочная машина, промышленные испытания, отработка.*

Abstract. *The article considers the actual problems of application of narrow-clamp domestic load-delivery machine for the developing of low-capacity mineral ores in the sewage cutting technology. The production trials results of ПДМ ПД-1Э (PDM PD-1E) and Microscoop 100E are presented. The comparative analysis of technical and economical indices of domestic and foreign mining technique is given. The conclusions on the application of narrow–clamp mining machine PD-1E in the sewage cutting technology of low-capacity mineral ores and its putting into a serial production are drawn.*

Keywords: *development system, load-delivery machine, industrial trials, developing.*

В настоящее время мировых объемов добычи урановых руд недостаточно для удовлетворения потребности действующих АЭС. Поэтому дефицит покрывается складскими запасами. В соответствии с этим цены на закись-окись урана (U_3O_8) на мировом рынке в настоящее время достигают более 190 долларов США за 1 кг по спотовым контрактам.

России в полной мере присущи мировые проблемы: повышение потребности урана над его производством, быстрое исчерпание складских запасов природного урана, которых должно хватить на 10–15 лет, и отсутствие достаточного объема подготовленных для рентабельного освоения геологических запасов в недрах. За последние 30–40 лет доля богатых руд в недрах урановых месторождений РФ уменьшилась с 45–60 % до 15–20 %, а качество добываемых товарных руд снизилось почти в 10 раз. Прогнозируемое снижение качества руд месторождений до 2020 года составит более 35 %.

В структуре себестоимости урана растут удельные капиталовложения, в связи с этим значимость таких показателей, как ущерб от разубоживания, коэффициент использования рудной площади, качество выдаваемой товарной руды и охрана окружающей среды, начинают играть определяющую роль в стратегии развития горного производства.

В настоящее время месторождения Стрельцовского рудного поля представляют основные промышленные запасы урановых руд России. ОАО «Приаргунское производственное горно-химическое объединение» (ППГХО) на протяжении 40 лет успешно добывает и перерабатывает урановые руды, выпускает высококачественную продукцию в виде U_3O_8 [1].

Существенное наращивание объемов добычи природного урана на территории РФ в ближайшее время возможно в основном за счет увеличения производительности действующего урандобывающего комплекса.

На месторождениях Стрельцовского рудного поля, находящихся в эксплуатации, большинство запасов богатых руд отработано, и в добычу вовлекают все более бедные и маломощные (мощностью до 3 м) рудные тела. В итоге за последние пять лет содержание урана в погашаемых запасах уменьшилось на 20 %. На предприятии за этот период для обеспечения требуемого выпуска продукции объем добычи руды вырос более чем в 1,5 раза, в основном за счет ввода новых мощностей – очистных блоков. Если в 2003 г. добыча велась в 36 блоках, то в 2010 г. в работе находилось 65 блоков.

При ожидаемом снижении качества руд ОАО ППГХО предстоит продолжить наращивание объемов добычи и достигнуть в течение ближайших 5 лет производительности 2,5 млн т U_3O_8 в год.

Для месторождений Стрельцовского рудного поля в качестве основной была принята система разработки нисходящими горизонтальными слоями с твердеющей закладкой, которая по сравнению с другими имеет очевидное преимущество: при проходке очистных заходок наблюдается только конструктивное разубоживание руды, зависящее от мощности, выдержанности рудных тел и ширины очистных выработок. Дальнейшее развитие предприятия возможно только при условии концентрации горных работ и интенсификации подземного производства на базе эффективного использования современной техники и технологии, модернизации и технического переоснащения производства.

В настоящей статье рассматривается целесообразность использования узкозахватной техники отечественного производства при подземной геотехнологии маломощных урановых рудных тел.

Одним из пунктов «Программы развития ОАО «ППГХО» на период до 2025 г.» является замена малопроизводительной техники на современное оборудование. До 2005 г. в технологии очистной выемки на доставке горной массы использовали пневматические погрузочно-доставочные машины МПДН-1М и электрогидравлические ПД-2Э. Необходимо отметить, что машины МПДН-1М малопроизводительны, морально устарели и не отвечают современным требованиям промышленной безопасности, их выпуск прекра-

щен. Из-за большой ширины машин (1,89 м) при отработке маломощных рудных тел происходит разубоживание руды в целом до 38 % за счет большой ширины заходки – до 3,5 м. На основании «Программы развития ОАО «ППГХО» на период до 2025 г.» предусматривается замена всех погрузочно-доставочных машин (35 шт.) МПДН-1М на современную высокопроизводительную технику до 2012 г.

В качестве базовой погрузочно-доставочной машины (ПДМ) для отработки маломощных урановых тел в ОАО «ППГХО» была принята Microscoop-100E. Эти машины имеют высокую производительность и при габаритной ширине 1,05 м обеспечивают снижение разубоживания руды до 22 % и менее (рис. 1).

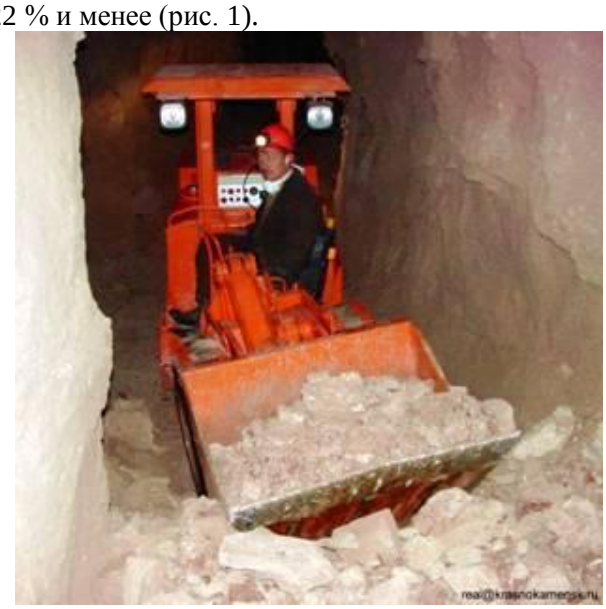


Рис. 1. Отгрузка руды из забоя погрузочно-доставочной машиной «Microscoop-100E» в блоке рудника № 1, УГРУ

На рис. 2 приведены зависимости разубоживания руды от мощности рудных тел при использовании различных типов ПДМ. Ширина очистной выработки для всех типов применяемых погрузочно-доставочных машин указана при креплении очистного пространства рамами НДО (неполный дверной оклад), что требует увеличения ширины очистной выработки на 0,5 м [2].

В целях совершенствования технологии слоевой системы разработки планируется максимальное применение узкозахватных погрузочно-доставочных машин (ПДМ) Microscoop-100E. Практика эксплуатации базовой узкозахватной ПДМ Microscoop-100E на рудниках ОАО «ППГХО» показала следующие конструктивные недостатки: конструкция крыши не имеет достаточной жесткости при работе, так как выполнена по схеме консоли; джойстик управления ходом выходит из строя вследствие попадания влаги на контакты; конструкция токосъемника блочного типа одноразового использования, при выходе из строя ремонту не подлежит. Учитывая высокую стоимость зарубежной машины (4800 тыс. руб.), а также высокие эксплуатационные затраты на ремонт и обслуживание, ОАО «ППГХО» принимает решение на разработку и изготовление отечественной узкозахватной ПДМ.

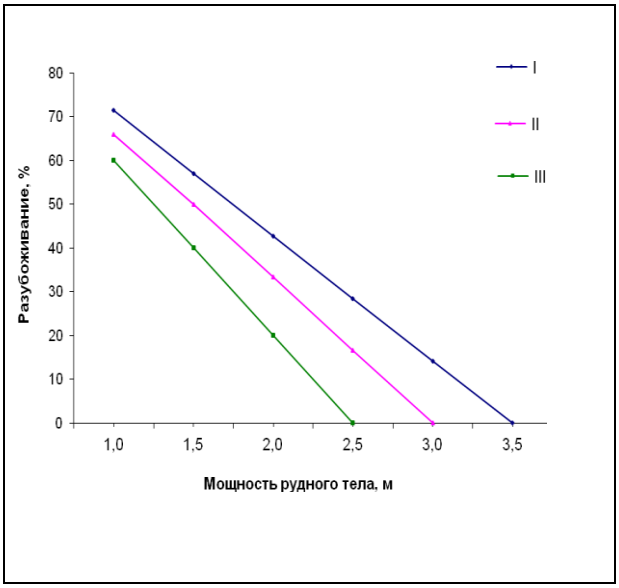


Рис. 2. Изменение разубоживания руды от мощности рудного тела при использовании: I – МПДН-1М – ширина заходки 3,5 м, II – ПД-2Э – ширина заходки 3 м, III – Microscoop-100E – ширина заходки 2,5 м

В 2009 г. на Урановом горнорудном управлении ОАО «ППГХО» прошли производственные испытания машины ПД-1Э (изготовитель ООО «Ремонтно-механический завод» (РМЗ)) (рис. 3).

Рис. 3. Погрузочно-доставочная машина ПД-1Э

Испытания опытного образца горной машины имели своей целью проверку ее работоспособности и определение показателей надежности [3]. Технические характеристики погрузочно-доста-

вочной машины, рекомендуемой для отработки маломощных урановых рудных тел, приведены в табл. 1 [4].

По итогам промышленных испытаний машины ПД-1Э проведен анализ ее работы. За время эксплуатации ПД-1Э отработала 720 моточасов. Недостатки, выявленные во время испытаний:

– зазор между колесом и корпусом составляет 8 мм, что приводит к повышенному износу автошины вследствие попадания в зазор кусков горной массы;

– имела место деформация проушины крепления гидроцилиндра подъема стрелы от нагрузки;

– манометр указания давления масла в гидросистеме расположен на близком расстоянии (100 мм) к сиденью оператора, что создает неудобство для горнорабочего очистного забоя при выполнении его функциональных обязанностей.

Выявлены и достоинства ПД-1Э за счет внедрения новых технических решений, а именно:

1. Система управления машиной ПД-1Э (движение «вперед-назад», внедрение) имеет классический вариант – управление механическое, через систему рычагов. Достоинства системы управления ПДМ ПД-1Э: удобство управления, ремонтопригодность, безотказность (сохранение работоспособности в течение заданной наработки).

2. Компоновка узлов и агрегатов в моторной тележке машины ПД-1Э обеспечивает доступность силовой установки, гидросистемы, трансмиссии для проведения профилактических и ремонтных работ.

3. Простота проведения технического обслуживания.

На основании данных промышленных испытаний ПДМ ПД–1Э и Microscoop-100E установлены их технические показатели при отработке маломощных рудных тел на рудниках ОАО «ППГХО», которые приведены в табл. в соответствии с данными [5, 6].

Анализ данных табл. 2 показывает, что техническая, эксплуатационная производительность и коэффициент внутрисменного использования ПДМ ПД-1Э незначительно ниже чем у Microscoop-100E, – на 6,9 %, 12,5 % и 10,7 % соответственно. Однако средняя наработка на отказ у ПДМ ПД-1Э больше, чем у зарубежных, на 9,0 %, а удельная трудоемкость

Таблица 1

Технические характеристики погрузочно-доставочной машины ПД-1Э, рекомендуемой для отработки маломощных урановых рудных тел

№ п/п	Наименование параметра	Ед. изм.	Номер и количество
1	Тип электрического двигателя		4А180М4УЗ
2	Мощность двигателя	кВт	30
3	Геометрические параметры:		
	длина	мм	5290
	ширина	мм	1000
	высота	мм	1950
4	Емкость ковша	$м^3$	0,5
5	Масса:		
	порожняя	кг	2950
	груженая	кг	3950
6	Ходовые характеристики:		
	скорость передвижения машины	м/с	1,06
	радиус поворота (наружный)	мм	3250
	максимально преодолеваемый уклон	град	15
7	Длина электрического кабеля	м	100
8	Техническая производительность при длине доставки 100 м	т/ч	11
9	Стоимость	тыс. руб.	859

Таблица 2

Основные технические показатели испытаний ПДМ ПД-1Э и Microscoop-100E

№ п/п	Показатели	Условные обозначения	Ед. изм.	Среднее значение	
				ПД-1Э	Microscoop 100E
1.	Общий объем работ, произведенных за время испытаний	$Q_{исп.}$	$м^3$	2700	2340
2.	Количество рабочих смен с фото-хронометражными наблюдениями	$N_{хр}$	смена	10	8
3.	Объем работ, произведенный за период фотохронометражных наблюдений	$Q_{хр}$	$м^3$	268	242
4.	Техническая производительность ПДМ	$Q_{тех}$	$м^3$/мин	0,083	0,089
			$м^3$/ч	4,98	5,34
5.	Эксплуатационная производительность	$Q_э$	$м^3$/ч	4,44	5,08
6.	Коэффициент использования оперативного времени работы ПДМ	$К_{оп}$	доли ед.	0,95	1
7.	Коэффициент внутрисменного использования ПДМ	$К_{см}$	доли ед.	0,5	0,56
8.	Средняя наработка на отказ	$Т_{отк}$	ч	90	82,5
9.	Среднее время восстановления (одной неисправности)	$Т_{восст}$	мин	105	150
10.	Коэффициент готовности	$К_г$	доли ед.	0,63	0,54
11.	Удельная трудоемкость восстановления и текущий ремонт	$С_{уд.тр.}$	чел.-час	0,06	0,1

восстановления и текущий ремонт на 40 % меньше. Кроме того, учитывая, что стоимость Microscoop-100E (4,8 млн руб.) в 5,5 раза больше чем ПД-1Э (859 тыс. руб.), можно сделать вывод о технико–экономической целесообразности применения машин производства ООО «РМЗ», ОАО «ППГХО».

Таким образом, разработанная машина ПД-1Э может быть использована в технологии очистной выемки на доставке руды при отработке любых маломощных рудных тел. После устранения недостатков, выявленных при приёмочных испытаниях опытного образца ПДМ ПД-1Э, возможно решение на выпуск установочной серии. Широкомасштабное внедрение данных машин позволит эффективно отрабатывать маломощные рудные тела при использовании технологии слоевой системы разработки на рудниках в соответствии с «Программой развития ОАО «ППГХО» на период до 2025 г.» [7].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Оптимизация разработки сложно–структурных урановых месторождений/ Авт. В.Г. Иванов, В.И. Култышев, В.Б. Колесаев и др. – М : Издательство «Горная книга». – 2007. – 265с.
2. Култышев В.И., Решетников А.А. Система разработки горизонтальными слоями с нисходящим порядком и твердеющей закладкой. – СТП 0106–120–2000. – Краснокаменск, АООТ «ППГХО», 2001. – 45с.
3. Кальницкий Я.Б., Филимонов А.Т. Самоходное погрузочное и доставочное оборудование на подземных рудниках. – М. : Недра. – 1974. – 304 с.
4. ТУ 3143–069–07621060–2007. Машина шахтная погрузочно-доставочная ПД–1Э. – Краснокаменск, ОАО «ППГХО». – 2007 – 35с.
5. Именитов В.Р., Процессы подземных горных работ при разработке рудных месторождений. – М.: Недра. – 1984. – 504с.
6. Тихонов Н.В., Рысев Г.С. Шахтные погрузочно-транспортные машины. – М : Недра. – 1976. – 224 с.
7. Программа развития ОАО «ППГХО» на период до 2025 г. – Краснокаменск. ОАО «ППГХО». – 2010. – 106с.

УДК 621.311

Туйгунова Альбина Григорьевна,
ст. преподаватель кафедры «Транспортные системы»,
Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал ИрГУПС в г. Красноярске,
тел. (8391)248-16-44, e-mail: tuigunova@krsk.irgups.ru

О НЕОБХОДИМОСТИ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

A.G. Tuigunova

ABOUT NECESSITY OF MONITORING OF THE CONDITION OF ISOLATION OF POWER TRANSFORMERS OF TRACTION SUBSTATIONS TAKING INTO ACCOUNT INFLUENCE OF CLIMATIC FACTORS

Аннотация. *В статье приводится анализ состояния трансформаторного парка Красноярской железной дороги, предлагается классификация климатических факторов, оказывающих существенное влияние на состояние изоляции силовых трансформаторов и обосновывается необходимость диагностики состояния с учетом этого влияния.*

Ключевые слова: *силовые маслонаполненные трансформаторы тяговых подстанций, климатические факторы, повреждаемость трансформаторов, техническая жесткость климата, районирование по зонам климатической адаптивности.*

Abstract. *In the article, the analysis of a condition of transformer park of the Krasnoyarsk railway is resulted, climatic factors classification is offered, making essential impact on a condition of isolation of power transformers and necessity of diagnostics of a condition taking into account this influence is proved.*

Keywords: *power transformers of traction substations, climatic factors, damageability of transformers, technical rigidity of a climate, division into districts on climatic adaptability zones.*

В соответствии с Правилами технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации, устройства электроснабжения должны обеспечивать надежное электроснабжение электроподвижного состава для движения поездов с установленными весовыми нормами, скоростями и межпоездными интервалами при требуемых размерах движения [1]. В системе тягового электроснабжения силовые маслонаполненные трансформаторы тяговых подстанций (СМТ ТП, или трансформаторы) – наиболее ответственное и дорогостоящее оборудование, от которого зависит пропускная способность участков железной дороги, безопасность движения поездов, надежность электроснабжения тяговой нагрузки, железнодорожных узлов и сторонних потребителей.

Мировая статистика показывает, что основным критерием общей оценки предельного состояния трансформаторов тяговых подстанций является техническое состояние обмоток (рис. 1). Анализ повреждаемости трансформаторного парка Красноярской железной дороги (КрасЖД) показал, что основной причиной является витковое замыкание обмотки (половина отказов), износ и старение, дефекты монтажа, заводской брак (рис. 2). Все эти трансформаторы находятся в эксплуатации более 25 лет.

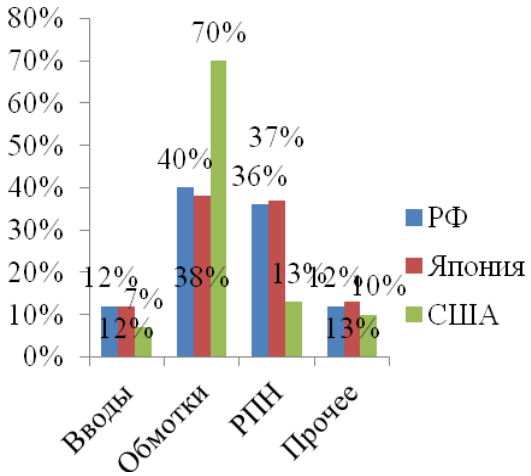


Рис. 1. Мировая статистика отказов элементов трансформатора

Рис. 2. Диаграмма причин повреждаемости трансформаторов КрасЖД

В эксплуатации находится 46 % трансформаторов со сроками службы, превышающими нормативные (рис. 3). В течение 5 лет количество трансформаторов, выработавших нормативный срок службы, увеличится еще на 20 %. Это вызывает необходимость обоснованного продления срока службы трансформаторов с целью дальнейшей эксплуатации их в системе тягового электроснабжения.

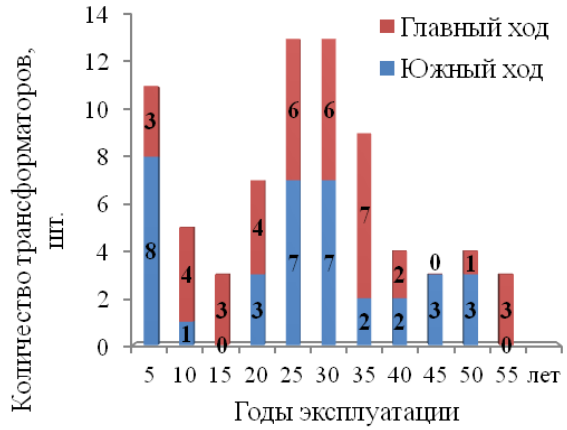


Рис. 3. Распределение трансформаторного парка КрасЖД по годам эксплуатации

Существенное влияние на надежность изоляции трансформаторов оказывают климатические условия эксплуатации, важнейшими из которых являются: перепады температуры воздуха, низкие и высокие температуры, переход через 0 ºС, осадки и атмосферные (грозовые) перенапряжения. Поскольку изоляционная система трансформаторов является композиционной, климатические факторы в первую очередь оказывают влияние на жидкую изоляцию (трансформаторное масло), а в результате тепломассообмена – и на твердую (бумажную) изоляцию обмоток [2].

Морозы на участках эксплуатации достигают значений –45 ºС и ниже, перепады температуры в течение суток могут составлять 20–35 ºС, иногда до 50 ºС; продолжительность работы при отрицательной температуре окружающей среды составляет более шести месяцев в году.

Эти обстоятельства вызывают необходимость совершенствования содержания изоляции СМТ ТП с учетом климатических условий.

На сети дорог Российской Федерации для поддержания электрооборудования тяговых подстанций, в том числе парка силовых трансформаторов, в исправном техническом состоянии действовала планово-предупредительная система технического обслуживания и ремонта (ППР), которая регламентировалась на основании «Инструкции по техническому обслуживанию и ремонту оборудования тяговых подстанций электрифицированных железных дорог» и предусматривала следующие виды ремонтов: осмотр; текущий ремонт; капитальный ремонт без смены обмоток; капитальный ремонт с расшихтовкой стали сердечника и сменой обмоток; межремонтные испытания.

В 2007 г. введен стандарт СТО РЖД «Устройства электрификации и электроснабжения. Техническое обслуживание и ремонт. Общие требования», а в 2008 г. – СТО РЖД «Устройства электрификации и электроснабжения. Порядок продления назначенного срока службы», которые предполагают обслуживание трансформаторов тяговых подстанций по техническому состоянию.

На основании анализа состояния трансформаторного парка КрасЖД установлено, что одним из существенных факторов, определяющих актуальность проблемы, является изношенность трансформаторов (рис. 3). На диаграмме представлено распределение СМТ ТП КрасЖД по годам эксплуатации, повреждаемость по напряжению (220, 110 кВ), повреждаемость по Главному и Южному ходам КрасЖД (рис. 4, 6).

Анализ состояния трансформаторного парка КрасЖД показал, что на Главном ходу повреждаемость трансформаторов в 5 раз выше, чем на Южном, что можно объяснить различными значениями напряжений от энергосистемы.

Как показывают исследования, в результате изменения погодно-климатических факторов может происходить изменение в изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов тяговых подстанций, следовательно, отклонение фактических сроков их эксплуатации от нормативных, согласно ГОСТ 14209–97.

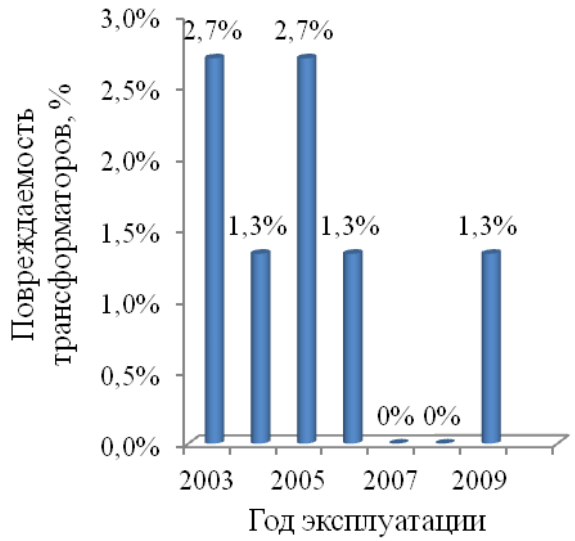


Рис. 4. Удельная повреждаемость трансформаторов КрасЖД по годам эксплуатации

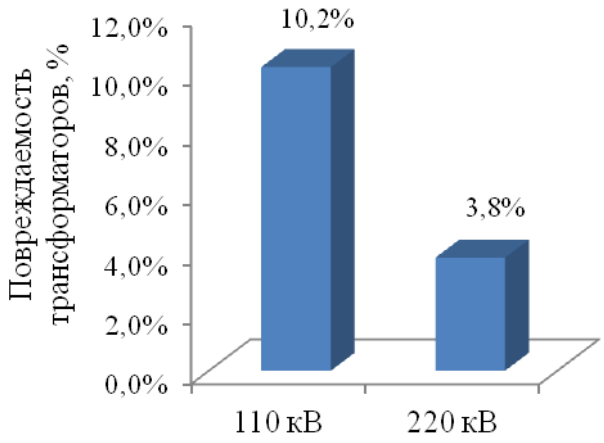


Рис. 5. Удельная повреждаемость трансформаторов КрасЖД по напряжению

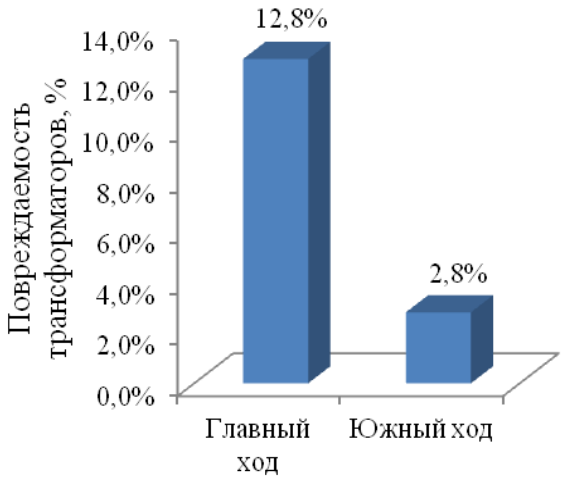


Рис. 6. Удельная повреждаемость трансформаторов по ходу КрасЖД

Воздействие климатических факторов на бумажно-масляную изоляцию носит разнообразный и неуправляемый характер, поэтому математическим аппаратом исследования этого влияния является метод дисперсионного анализа, в частности метод ранговой корреляции. С привлечением экспертной оценки [3] предлагается классификация климатических факторов, влияющих на параметры надежности СМТ ТП: атмосферные перенапряжения – α, кВ; температура воздуха – T, ºС; средняя амплитуда суточных колебаний температуры воздуха – σ, ºС; переход через 0 ºС – θ, ºС; относительная влажность воздуха – γ, %; осадки – φ, мм; время действия анализируемых показателей влияния климатических факторов в течение года – t, мин.

В общем виде модель влияния климатических факторов на параметры надежности трансформатора может быть представлена как функция следующего вида:

$$S = f(\alpha(t), T(t), \sigma(t), \theta(t), \gamma(t), \varphi(t), t), \quad (1)$$

где S – обобщенный показатель влияния климатических факторов, являясь интегральным показателем, оценивается баллом влияния климата.

Для оценки влияния климатических факторов внешней среды на техническое состояние объекта исследования В.М. Кудрявцев и А.Т. Осяев предложили использовать два показателя, учитывающие воздействие климатических факторов регионов эксплуатации, значения которых определяются в баллах «технической жесткости»: $N_{тж}$ –

«техническая жесткость» холодного климата, $S_{тж}$ – «техническая жесткость» жаркого климата [4].

Предлагается использование этих показателей с некоторыми изменениями для оценки влияния климатических факторов на состояние изоляции трансформаторов, находящихся в эксплуатации сверх нормативного срока службы:

$$N_{\text{ТЖ}} = \left(0,75 \cdot t_{\text{mincp}} + 0,25 \cdot t_{\text{maxcp}}\right) \cdot \left(1 + 0,015 \cdot \sigma_x\right) \cdot \cdot \left(1 + 0,26 \cdot \varphi_x\right) \cdot \left(1 + 0,022 \cdot \tau_x\right), \quad (2)$$

$$S_{\text{ТЖ}} = \left(0,55 \cdot t_{\text{min абс}} + 0,20 \cdot t_{\text{max абс}}\right) \cdot \left(1 + 0,0075 \cdot \sigma_{ж}\right) \cdot \cdot \left(1 + \frac{0,08}{\varphi_{ж}}\right) \cdot \left(1 + 0,12 \cdot \tau_{ж}\right), \quad (3)$$

где t_{mincp}, t_{maxcp} – соответственно средние значения минимальных и максимальных температур атмосферного воздуха за три наиболее холодных и жарких месяца; $t_{\text{minабс}}$, $t_{\text{maxабс}}$ – соответственно средние значения абсолютного минимума и максимума температур атмосферного воздуха за три наиболее холодных и жарких месяца; σ_x, $\sigma_ж$ – соответственно средние амплитуды суточных колебаний температуры воздуха за три наиболее холодных и жарких месяца; φ_x, $\varphi_ж$ – соответственно средние значения относительной влажности воздуха за три наиболее холодных и жарких месяца (в долях единицы); τ_x, $\tau_ж$ – продолжительность действия в месяцах средней температуры воздуха ниже и выше 0 ºС.

Территория Российской Федерации расположена в макроклиматических районах с умеренным и холодным климатом, и ее разделение на климатические зоны и климатические условия эксплуатации в этих зонах определены соответствующими ГОСТами. Для технических целей осуществлено районирование территории страны с использованием среднемесячной температуры и относительной влажности воздуха на пять зон «технической жесткости» климата (зоны климатической адаптивности).

Опыт ученых Красноярского аграрного университета под руководством профессора Н.В. Цугленка позволил разработать уровни климатической адаптивности Красноярского края (районирование территории Красноярского края) [5] по степени климатической адаптивности технического объекта исследования (рис. 7).

Установленные баллы влияния климата Красноярского края на техническое состояние объекта исследования находятся в пределах 2–97, выделены зоны климатической адаптивности технического объекта исследования на территории края. Как видим, Главный ход Красноярской железной дороги находится в основном в зоне кли-

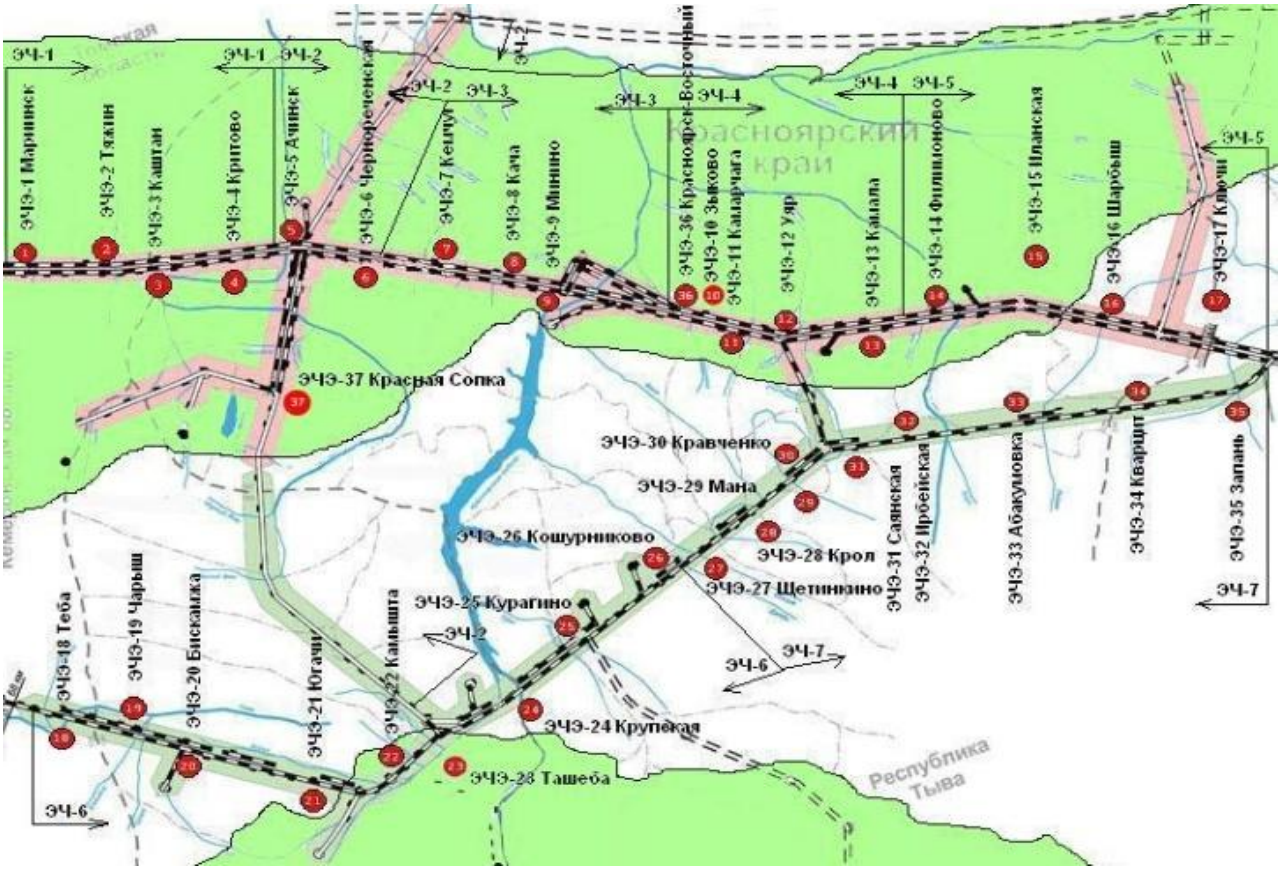


Рис. 7. Районирование КрасЖД по зонам климатической адаптивности

матической адаптивности в границах 0–15 баллов, что соответствует в условиях воздействия низких температур маложесткому климату, а в условиях воздействия высоких температур – маложесткому и умеренно–жесткому климату, а Южный ход – в основном в зоне климатической адаптивности в границах 15–25 баллов, что соответствует в условиях воздействия низких температур умеренно-жесткому климату, а в условиях воздействия высоких температур – жесткому и очень жесткому климату.

Выполнено исследование изменения температуры и выпадения осадков по Главному и Южному ходам КрасЖД за период 2005–2009 годы. На рис. 8–11 показаны изменения температуры окружающей среды и выпадения осадков за 2009 год по Главному и Южному ходам.

Выполненные исследования изменения климатических условий подтверждают резко континентальный климат КрасЖД и необходимость учета их влияния на состояние изоляции трансформаторов тяговых подстанций [6].

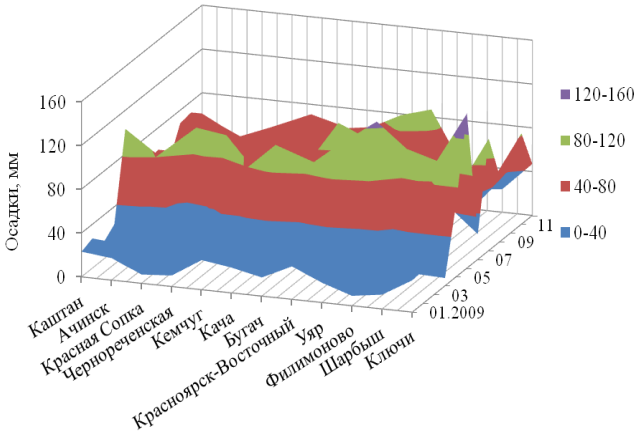


Рис. 8. Изменение выпадения осадков по Главному ходу КрасЖД

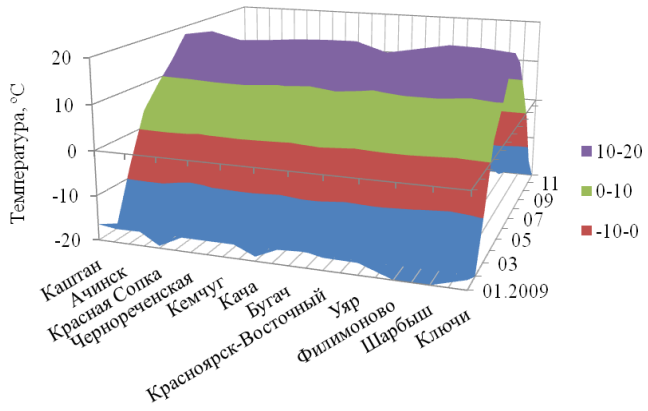


Рис. 9. Изменение температуры окружающей среды по Главному ходу КрасЖД

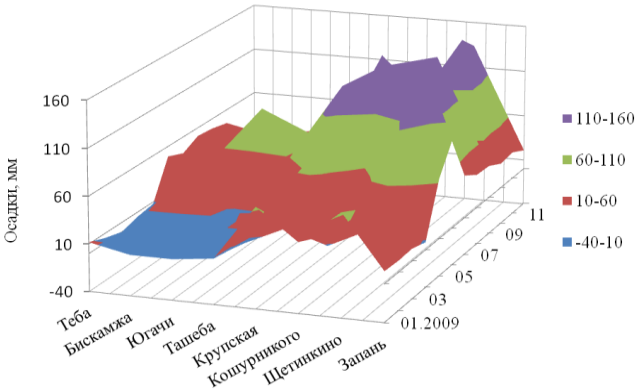


Рис. 10. Изменение выпадения осадков по Южному ходу КрасЖД

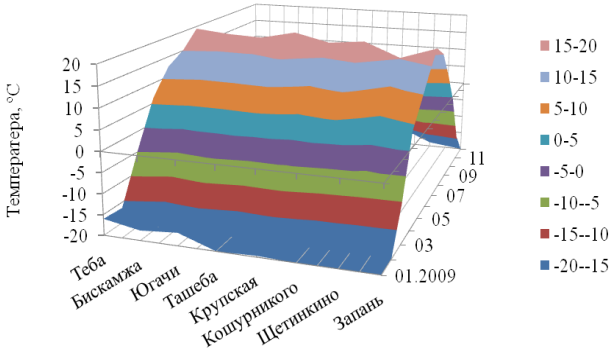


Рис. 11. Изменение температуры окружающей среды по Южному ходу КрасЖД

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации с изм. и доп., внесенными приказами МПС России: от 24.04.1995г. №7Ц, от 06.03.1996г №6Ц, от 15.04.1997г №7Ц, от 20.08.1997г №21Ц, от 03.03.1998г №5Ц, от 20.07.1998г №14Ц, от 29.03.1999г №17Ц, – М.: Транспорт, 1990. – 12 с.
2. Туйгунова, А.Г. Климатические воздействия на надежность изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов тяговых подстанций [Текст] / А.Г. Туйгунова // Электрическая изоляция – 2010. Сб. научн. трудов V Международной научно–технической конференции 1–4 июня 2010 г. – Санкт–Петербург: Изд–во Политехн. университет СПбГПУ, 2010. – С. 206–208.
3. Попов, Г. В. Экспертная поддержка при диагностике состояния силовых трансформаторов [Текст] / Г.В. Попов, А.В. Ватлецов, С. Аль–Хамри // Электротехника. – 2003. – № 8. – С. 5–11.
4. Осяев, А.Т. Повышение эффективности эксплуатации магистральных электровозов методами управления их техническим состоянием

[Текст] : дис. д–ра техн. наук / А.Т. Осяев. – М. : 2002. – 371 с.
5. Дмитриенко, Е.Н. Моделирование влияния климатических факторов на эксплуатационные свойства машинных агрегатов [Текст] / Е.Н. Дмитриенко. Вестн. КрасГАУ. – 2009. – №5. – С. 152–156.
6. Туйгунова, А.Г. Совершенствование содержания изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов тяговых подстанций с учетом климатических условий: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.14.02 / А.Г. Туйгунова. – Красноярск, 2011. – 22 с.

УДК 656.222.3: 65.011.56

Гозбенко Валерий Ерофеевич,
заведующий лабораторией «Динамика транспортных систем»
Иркутского государственного университета путей сообщения, д. т. н., профессор
тел.: 89149516021, e-mail: vgozbenko@yandex.ru
Иванков Алексей Николаевич,
к. т. н., доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» ИрГУПС
тел.: 89148939774, e-mail: aivankov@mail.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ВНУТРИДОРОЖНОГО ПЛАНА ФОРМИРОВАНИЯ ПОЕЗДОВ

V.E. Gozbenko, A.N. Ivankov

AUTOMATION OF CALCULATION OF THE INTRAROAD PLAN OF FORMATION OF TRAINS

Аннотация. *Приведена методика расчета внутридорожного плана формирования с учетом выделения отправительских маршрутов и местных поездов. Ввиду многоэкстремальности задачи предлагается для ее решения использовать генетический алгоритм.*

Ключевые слова*: сортировочные станции, полигон, вагонопоток, затраты на накопление и переработку вагонов.*

Abstract. *The design procedure of the intraroad plan of formation taking into account allocation of shipper trains and local trains is resulted. In view of multiextremeness of a problem it is offered to use genetic algorithm for its decision.*

Keywords: *switchyards, range, traffic volume, expenses for accumulation and processing of cars.*

Изменившиеся условия эксплуатационной работы на сети железных дорог, связанные с большим количеством собственников подвижного состава, недостаточной емкостью сортировочных парков, отменой регулировки порожних вагонов, требуют выработки новых подходов к организации вагонопотоков на полигоне дорог.

Колебания мощности струй вагонопотков, изменение структуры грузопотоков, проведение мероприятий по реконструкции инфраструктуры железнодорожного транспорта приводит к необходимости неоднократной корректировки плана формирования.

Согласно [1], необходим учет переменных нормативов затрат на накопление и переработку вагонов на попутных технических станциях. Поэтому нахождение оптимального плана формирования поездов является многоэкстремальной задачей [2]. Использование аналитических методов для ее решения не гарантирует получение действительно оптимального варианта, а лишь одного из близких к нему по критерию эффективности.

Алгоритм поиска оптимальных решений по организации вагонопотоков на сети железных дорог, регламетрированный [1], на наш взгляд, не является строго формализованным. Он предполагет при получении базового варианта прокладку отсортированных по мощности вагонопотоков по сети возможных назначений с учетом минимальных затрат на переработку и накопление, однако в процессе наложения струй вагонопотоков единичные расходы меняются нелинейно, что требует их корректировки. Изменение единичных расходных ставок выполняется после наложения очередной струи, а для получения действительно оптимального плана струи необходимо накладывать одновременно в несколько этапов, постепенно увеличивая их мощности.

В дальнейшем предполагается корректировка базового варианта с удалением «слабых» назначений и разукрупнение назначений с мощностью, превышающей заданную технологом, с выделением «удлиненных» специализаций поездов. Все вышесказанное еще больше удаляет полученный вариант от оптимального.

Алгоритм и методика, предложенные в [3], также имеют ряд недостатков. При формировании множества допустимых вариантов отбраковываются струи, которые впоследствии могут быть усилены за счет смежных струй.

Существующие в настоящее время методики не предполагают совместный расчет отправительской маршрутизации и плана формирования технических станций.

В настоящей статье авторами предложены алгоритмы и методы совместного автоматизированного расчета отправительской и технической маршрутизации, а также формирования местных поездов.

Ввиду нелинейности единичных расходных ставок на переработку и накопление предлагается использование генетического алгоритма [4, 5].

1. Математическая постановка задачи расчета передаточных поездов в железнодорожном узле

Порядок организации вагонопотоков в передаточные поезда предусматривается внутриузловым планом формирования. Устанавливается, какие станции узла и из вагонов каких назначений формируют внутриузловые передаточные поезда, как организуются отправительские и порожняковые маршруты, где объединяются ступенчатые маршруты.

План формирования передаточных поездов в первую очередь зависит от схемы узла. При попутном расположении грузовых станций возможны как одногруппная, так и групповая система формирования передаточных поездов.

Количество назначений внутриузлового плана формирования может составить $K_{\text{ст}}^{\text{пер}}\left(K_{\text{ст}}^{\text{пер}}-1\right)$, где $K_{\text{ст}}^{\text{пер}}$ – число станций в узле, между которыми курсируют передаточные поезда.

Так, при пяти станциях в узле может быть 20 назначений внутриузловых передач. Формирование такого числа назначений связано с большим простоем вагонов под накоплением. Групповые поезда позволяют сократить простой под накоплением, но увеличивают пробег передаточных поездов. В групповом передаточном поезде, следующем с сортировочной на грузовые станции, количество групп может быть равно числу грузовых станций по пути следования поезда. В отдельные группы могут подбираться вагоны, следующие на отдельные подъездные пути. Размещение групп в таких поездах определяется местными условиями и указывается во внутриузловом плане формирования, являющемся частью комплексного технологического процесса работы железнодорожного узла.

Требуется составить такой план организации вагонопотоков в передаточные поезда, при котором все вагоны были бы доставлены с сортировочной станции на грузовые станции, при этом общая стоимость перевозок была бы минимальной. С учетом возможности совместного расчета плана формирования одногруппных и групповых передаточных поездов постановка задачи выглядит следующим образом:

минимизировать

$$z=\sum_q (R_q^{\text{эн}}+R_q^{\text{пч}}+R_q^{\text{вч.форм}}+R_q^{\text{лч.ман}}+R_q^{\text{лч}}+$$

$$+R_q^{\text{брч}}+R_q^{\text{лкм}}+R_q^{\text{вч.нак}}+R_q^{\text{э,т}}+R_q^{\text{ткм}})y_q\to\min,$$

где $R_q^{\text{эн}}$ – энергетические расходы, связанные с остановками передаточных поездов на попутных грузовых станциях;

$R_q^{\text{пч}}$ – временные расходы, связанные с остановками передаточных поездов на попутных грузовых станциях для выполнения отцепки вагонов;

$R_q^{\text{вч.форм}}$ – расходы, связанные с вагоно-часами формирования местных поездов;

$R_q^{\text{лч.ман}}$ – расходы, связанные с локомотиво-часами маневровой работы на формирование передаточных поездов;

$R_q^{\text{лч}}$ – расходы, связанные с локомотиво-часами работы поездных локомотивов по доставке передаточных поездов;

$R_q^{\text{брч}}$ – расходы, связанные с бригадо-часами работы локомотивных бригад;

$R_q^{\text{лкм}}$ – расходы, связанные с локомотиво-километрами пробега поездных локомотивов;

$R_q^{\text{вч.нак}}$ – расходы, связанные с вагоно-часами накопления на сортировочной станции;

$R_q^{\text{э,т}}$ – расходы, связанные с расходом электроэнергии и топлива на тягу поездов;

$R_q^{\text{ткм}}$ – расходы, связанные с тонно-километровой работой по пробегу поездов;

y_q – булева переменная, являющаяся признаком выделения назначения q в план формирования.

Накладываются следующие ограничения:

ограничения по условиям доставки струй

$$\sum_q \delta_{pq} y_q = 1, \quad \forall p,$$

где

$$\delta_{pq} = \begin{cases} 1, \text{если поезд назначения } q \text{ включает группу} \\ \text{вагонов, следующих на станцию } p, \\ 0, \text{в противном случае;} \end{cases}$$

ограничение по количеству формируемых назначений (количеству сортировочных путей, выделяемых для формирования передаточных поездов)

$$\sum_q y_q \le k_{\text{назн}},$$

где $k_{\text{назн}}$ – количество путей сортировочного парка, выделяемых для накопления передаточных поездов.

Так как расходы, связанные с вагоно-километрами пробега, тонно-километровой работой, и расходы электроэнергии на перемещение вагонов во всех вариантах плана формирования передаточных поездов идентичны, то они в сравнении вариантов не участвуют.

Энергетические расходы, связанные с остановками передаточных поездов назначения q на попутных грузовых станциях, определяются по формуле

$$R_q^{\text{эн}} = \sum_s \delta_{sq} N_q \cdot 3{,}8 v_{\text{т}}^2 \left(P + Q_{\text{бр}}\right) \cdot e_{\text{э}} 10^{-6},$$

где

$$\delta_{sq} = \begin{cases} 1, \text{если поезд назначения } q \text{ имеет остановку} \\ \text{по станции } s, \\ 0, \text{в противномслучае.} \end{cases}$$

N_q – количество поездов назначения q;

$v_{\text{т}}$ – техническая скорость поездов на участке, км/час;

P – вес локомотива, т;

$Q_{\text{бр}}$ – средний вес передаточного поезда брутто, т;

$e_{\text{э}}$ – расходная ставка на 1 ткм механической работы, руб.

Временные расходы по простою передаточных поездов назначения q на попутных технических станциях при выполнении операций по отцепке вагонов рассчитываются по формуле

$$R_q^{\text{пч}} = \sum_s \delta_{sq} N_q t_{\text{отц}} C_{\text{пч}},$$

где $t_{\text{отц}}$ – продолжительность выполнения операций по отцепке вагонов, час;

$C_{\text{пч}}$ – стоимость поездо-часа простоя передаточных поездов, руб.

Расходы, связанные с вагоно-часами формирования местных поездов назначения q:

$$R_q^{\text{вч.форм}} = N_q m_q t_{\text{форм}}^q e_{\text{вч}},$$

где m_q – состав поездов назначения q при отправлении с сортировочной станции, ваг;

$t_{\text{форм}}^q$ – продолжительность формирования поезда назначения q, час;

$e_{\text{вч}}$ – расходная ставка на 1 вагоно-час простоя, руб.

Расходы, связанные с локомотиво-часами маневровой работы на формирование передаточных поездов:

$$R_q^{\text{лч.ман}} = N_q t_{\text{форм}}^q e_{\text{лч}}^{\text{ман}},$$

где $e_{\text{лч}}^{\text{ман}}$ – расходная ставка на 1 локомотиво-час маневровой работы, руб.

Расходы, связанные с локомотиво-часами работы поездных локомотивов по доставке передаточных поездов:

$$R_q^{\text{лч}} = \frac{2 \cdot l_q}{v_{\text{уч}}} N_q e_{\text{лч}},$$

где $v_{\text{уч}}$ – участковая скорость движения поездов, км/час;

$e_{\text{лч}}$ – расходная ставка на 1 локомотиво–час поездной работы, руб.

Расходы, связанные с локомотиво-часами работы поездных локомотивов по доставке передаточных поездов:

$$R_q^{\text{брч}} = \frac{2 \cdot l_q}{v_{\text{уч}}} N_q e_{\text{брч}},$$

где $e_{\text{лч}}$ – расходная ставка на 1 бригадо-час работы локомотивной бригады, руб.

Расходы, связанные с локомотиво-километрами пробега поездных локомотивов:

$$R_q^{\text{лкм}} = 2 \cdot N_q l_q e_{\text{лкм}},$$

где l_q –расстояние пробега поезда назначения q, км;

$e_{\text{лкм}}$ –расходная ставка на 1 локомотиво-километр пробега поездных локомотивов, руб.

Расходы, связанные с вагоно-часами накопления вагонов назначения q на сортировочной станции:

$$R_q^{\text{вч.нак}} = cm_q e_{\text{вч}},$$

где cm_q –вагоно-часы накопления вагонов назначения q, в-час.

Описанная модель является задачей целочисленного программирования с булевыми переменными.

Разработка плана формирования передаточных поездов в узлах включает в себя следующие этапы:

– установление полигона обращения передаточных поездов и локомотивов по географическому признаку расположения станций и соединительных ветвей в узле и условиям их обслуживания локомотивами;

– установление возможных вариантов плана формирования и размеров вагонопотоков между станциями;

– составление варианта плана формирования передаточных поездов для каждого внутриузлового направления, ограниченного сортировочной станцией и последней грузовой станцией, обслуживаемой передаточными поездами.

Предлагаемая методика учитывает все требования действующей Инструкции [1] и позволяет вести одновременный расчет плана формирования одногруппных и групповых передаточных поездов в узле по всем примыкающим к узлу направлениям с учетом ограничения по путевому развитию сортировочной станции. Учет последнего фактора особенно важен при решении вопроса о специализации путей сортировочного парка.

Вышеизложенная методика базируется на строгой математической формулировке задачи плана формирования. Преимущества выбранной постановки задачи перед другими возможными заключается в том, что ограничения представлены минимальным количеством уравнений и неравенств, а это имеет большое значение для сокращения объема вычислений.

2. Методика составления оптимального плана формирования для сборных, участковых и одногруппных сквозных поездов

Организация вагонопотоков в районах местной работы является сложной многовариантной задачей, включающей в себя установление числа и эффективности применения вывозных, сборных и передаточных поездов, диспетчерских локомотивов; раздельного и объединенного формирования участкового и сборного вагонопотока.

В классической теории плана формирования обязательно должны присутствовать участковые назначения. После расчета сквозных назначений переходят к расчету плана формирования поездов в районе местной работы. Струи вагонопотока, не удовлетворяющие необходимому условию, не могут быть выделены в самостоятельные назначения плана формирования поездов, а должны объединяться с более короткими струями вагонопотока и направляться в переработку на попутные технические станции. При малом участковом вагонопотоке самостоятельное формирование участковых поездов приводит к значительному увеличению вагоно-часов накопления. Для сокращения времени на накопление участковый вагонопоток может быть включен в сборные поезда, хотя в этом случае замедляется его продвижение по участку. Ситуации, когда отсутствуют достаточные вагонопотоки для участковых назначений плана формирования, часто имеют место при расчете внутридорожного плана формирования и особенно на транзитных железнодорожных ходах.

Таковыми являются многие участки Западно-Сибирской, Красноярской, Восточно-Сибирской, Забайкальской, Дальневосточной железных дорог.

При расчетах междудорожного плана формирования такие ситуации являются лишь редким исключением, и поэтому в методиках расчета целесообразность выделения в самостоятельные назначения таких струй вагонопотока не рассматривается.

Таким образом, при слабом сквозном и мощном участковом назначении сквозное назначение сливается с участковым, а при слабом сквозном и слабом участковом назначении сквозное выделяется в самостоятельную струю, а участковое – объединяется с потоком сборных поездов.

Задачу одновременного расчета одногруппных сквозных, участковых и сборных поездов на ограниченном полигоне выделенных станций можно описать следующей моделью.

Минимизировать

$$\sum_{i\in K_{\text{ф}}^{\text{скв}}}\sum_{j\in K_{\text{н}}^{\text{скв}}} cm_{ij}x_{ij} + \sum_{p\in n_{\text{з}}}\sum_{q\in n_{\text{п}}}\sum_{K\in K_{\text{п}}} n_{qp}t_{\text{эк}}^{K}y_{pq}^{K} +$$

$$+ \sum_{i\in K_{\text{ф}}^{\text{уч}}}\sum_{j\in K_{\text{н}}^{\text{уч}}}\left(cm_{ij} + c'\frac{n_{ij}^{\text{сб}}}{N'_{\text{сб}}}\right)x_{ij} +$$

$$+ \sum_{i\in K_{\text{ф}}^{\text{уч}}}\sum_{j\in K_{\text{н}}^{\text{уч}}}\left(\frac{c'}{N''_{\text{сб}}}\left(n_{ij}^{\text{уч}} + n_{ij}^{\text{сб}}\right) + n_{ij}^{\text{уч}}\Delta t_{\text{сб}}\right)\left(1 - x_{ij}\right),$$

где $K_{\text{ф}}^{\text{скв}}$ – множество станций формирования сквозных поездов; $K_{\text{н}}^{\text{скв}}$ – множество станций назначения сквозных поездов; $K_{\text{ф}}^{\text{уч}}$ – множество станций формирования участковых поездов; $K_{\text{н}}^{\text{уч}}$ – множество станций назначения участковых поездов; $K_{\text{п}}$ – множество станций переработки вагонопотоков; x_{ij} – булева переменная, отражающая возможность выделения струи вагонопотока со станции i на станцию j в самостоятельное назначение; cm_{ij} – вагоно-часы накопления на-

значения *ij*, в-ч; $n_з$ – множество станций зарождения вагонопотока; $n_п$ – множество станций погашения вагонопотока; y_{pq}^{K} – булева переменная, характеризующая возможность переработки струи *pq* на станции *K*; $n_{pq}t_{эк}$ – вагоно-часы, связанные с переработкой струи *pq*, в–ч; c' – параметр накопления для составов сборных поездов; $N'_{сб}, N''_{сб}$ – количество сборных поездов при наличии и отсутствии участковых поездов; $n_{ij}^{уч}, n_{ij}^{сб}$ – соответственно участковый и сборный вагонопоток между станциями *ij*; $\Delta t_{сб}$ – потеря приведенных часов, приходящаяся на один вагон, на станции формирования и на участке при включении участкового вагонопотока в сборные поезда:

$$\Delta t_{сб} = \Delta t_{ф} + \Delta t_{уч} + \frac{e_{сб} - e_{уч}}{e_{вч}},$$

здесь $\Delta t_{ф}$ – разность времени на формирование сборного и участкового поездов, час; $\Delta t_{уч}$ – разность времени хода по участку сборного и участкового поездов, час; $e_{сб}, e_{уч}$ – стоимость продвижения по участку одного вагона участкового потока соответственно со сборным и участковым поездом, руб; $e_{вч}$ – расходная ставка на один вагоно-час простоя, руб.

Условия доставки струй вагонопотоков со станций зарождения до станций назначений записываются в виде ограничений возможных комбинаций путей следования вагонопотоков. Корреспонденции вагонопотоков такого плана для направления с 4 станциями приведены на рис. 1.

Условия доставки струй вагонопотоков можно записать как

$$\begin{cases} x_{14} + y_{14}^{2} \cdot x_{12} \cdot x_{24} + y_{14}^{3} \cdot x_{13} \cdot x_{34} + \\ + y_{14}^{2} \cdot y_{14}^{3} \cdot x_{12} \cdot x_{23} \cdot x_{34} = 1; \\ x_{13} + y_{13}^{2} \cdot x_{12} \cdot x_{23} = 1; \\ x_{12} + \bar{x}_{12} = 1; \\ x_{24} + y_{24}^{3} \cdot x_{23} \cdot x_{34} = 1; \\ x_{23} + \bar{x}_{23} = 1; \\ x_{24} + \bar{x}_{24} = 1. \end{cases}$$

Ограничения формируются следующим образом. Для доставки струи 1–4 можно использовать:

– сквозное назначение x_{14};

– участковое назначение x_{12}, где струя перерабатывается, далее вагонопоток 14 следует в сквозном назначении x_{24};

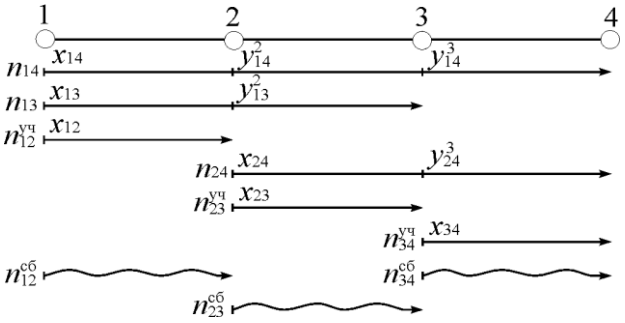


Рис. 1. Схема расчетного направления

– сквозное назначение до станции 3, где струя перерабатывается, а рассматриваемый вагонопоток следует далее в участковом назначении x_{34};

– участковые назначения x_{12}, x_{23}, x_{34} (при этом вагонопоток будет перерабатываться на всех попутных технических станциях).

Переменная x_{12} отражает возможность выделения участкового потока в самостоятельное назначение. Переменная $\bar{x}_{12}$ – доставку струи участкового вагонопотока в сборных поездах.

Таким образом, можно записать $\bar{x}_{12} = 1 - x_{12}$.

3. Методика совместного расчета плана отправительской и технической маршрутизации

Наличие значительных постоянных потоков массовых грузов (каменного угля, руды, строительных материалов, нефтепродуктов) создает условия для маршрутизации перевозок.

На сети железных дорог достигнут высокий уровень отправления грузов маршрутами. Этому способствует развитие системы маршрутизации и широкое распространение передового опыта.

План формирования маршрутов с мест погрузки является составной частью плана формирования поездов. Его составление сводится к выбору оптимального варианта из ряда возможных, отличающихся эффективностью, числом назначений и сочетанием объединенных струй.

Исходными данными для расчета маршрутизации являются: планы перевозок грузов; техническая оснащенность станций погрузки и выгрузки; технологические процессы станций погрузки и выгрузки; нормы массы и длины составов поездов; анализ маршрутной погрузки за прошедший период.

Исходя из размеров и концентрации грузопотоков, условий погрузки и выгрузки, намечают станции и предприятия для организации маршрутных перевозок.

Исследования в области организации вагонопотоков включают сопоставление затрат и экономию вагоно-часов для отправительских маршрутов и сквозных поездов. В то же время отправительская маршрутизация и сквозные поезда – взаимосвязанные и дополняющие друг друга формы организации вагонопотоков. При организации отправительских и ступенчатых маршрутов во внимание следует принимать не только производительность и мощность грузовых пунктов, но и наличие сортировочных станций, оборудованных новейшими техническими средствами, позволяющими формировать поезда любого веса и не допускать завышенных простоев вагонов одноименных назначений как на грузовых, так и на сортировочных станциях. Нужно рассматривать отдельные струи как составляющие единого вагонопотока, элементы которого взаимодействуют между собой.

Увеличение числа отправительских маршрутов сдерживает недостаточное развитие погрузо–выгрузочных фронтов на многих промышленных предприятиях. Многие маршруты, которые отгружают группами, будут невыгодны, так как вагоны их ожидают погрузки других групп. Решая вопрос об эффективности маршрутов, необходимо установить, что целесообразнее: простой вагонов на грузовых станциях в ожидании окончания грузовых операций с другими группами вагонов или передача их на сортировочную станцию для включения в процесс поездообразования.

Кроме того, на станциях выгрузки маршрутов могут возникнуть затруднения с обеспечением своевременной выгрузки из-за недостаточной технической оснащенности грузовых фронтов.

Большое влияние на продолжительность выполнения грузовых операций в начальном и конечном пунктах оказывают следующие факторы: техническое оснащение; число пунктов погрузки; длины фронтов погрузки и выгрузки; режим работы предприятий; удаление грузового пункта от места формирования маршрута; регулярность подачи и уборки вагонов; расписания подачи, уборки вагонов; число маневровых локомотивов, работающих параллельно; путевое развитие грузового пункта.

При создании модели совместного расчета отправительской и технической маршрутизации необходимо учитывать также возможность выделения маршрутов, следующих в распыление. Такие маршруты целесообразно формировать при слабых мощностях исходных струй вагонопотоков.

Задача одновременного расчета плана формирования технических станций и отправительской маршрутизации формулируется следующим образом.

Минимизировать

$$\sum_{i\in K_{\text{ф}}}\sum_{j\in K_{\text{н}}} cm_{ij}x_{ij} + \sum_{p\in n_{\text{з}}}\sum_{q\in n_{\text{п}}}\sum_{K\in K_{\text{пер}}} n_{qp}t^{K}_{\text{эк}}y^{K}_{pq} +$$
$$+ \sum_{i\in K^{\text{м}}_{\text{п}}}\sum_{j\in K^{\text{м}}_{\text{в}}}\left(c^{\text{пр}}_{\text{м}}m_{\text{м}}\right)_{ij}x_{ij} + \sum_{i\in K^{\text{м}}_{\text{п}}}\sum_{j\in K_{\text{расп}}}\left(c^{\text{расп}}_{\text{м}}m_{\text{м}}\right)_{ij}x_{ij} +$$
$$+ \sum_{p\in K^{\text{м}}_{\text{п}}}\sum_{q\in K^{\text{м}}_{\text{в}}}\sum_{K\in K_{\text{расп}}}\left(n_{qp}\left(t^{K}_{\text{эк}}+t^{q-1}_{\text{эк}}\right)\right)y^{K}_{pq} +$$
$$+ \sum_{i\in K^{\text{м}}_{\text{п}}}\sum_{j\in K^{\text{м}}_{\text{в}}}\left(n_{ij}\left(t^{i+1}_{\text{эк}}+t^{j-1}_{\text{эк}}\right)\right)\bar{x}_{ij},$$

где $K_{\text{ф}}, K_{\text{н}}$ – соответственно множества станций формирования и назначения сквозных поездов; $K^{\text{м}}_{\text{п}}$, $K^{\text{м}}_{\text{в}}$ – соответственно множества пунктов погрузки и выгрузки массовых грузов; $K_{\text{пер}}$ – множество станций переработки вагонопотоков; $K_{\text{расп}}$ – множество станций распыления маршрутов; x_{ij} – булева переменная, отражающая возможность выделения струи вагонопотока со станции i на станцию j в самостоятельное назначение как технического, так и отправительского маршрута; $\bar{x}_{ij}$ – булева переменная, отражающая возможность объединения струи отправительского маршрута с одноименной струей технической маршрутизации ij; cm_{ij} – вагоно–часы накопления назначения ij, в–ч; $n_{\text{з}}$ – множество станций зарождения вагонопотока; $n_{\text{п}}$ – множество станций погашения вагонопотока; y^{K}_{pq} – булева переменная, характеризующая возможность переработки струи pq технической маршрутизации на станции K или поступления струи pq отправительской маршрутизации в распыление; $n_{pq}t_{\text{эк}}$ – вагоно–часы, связанные с переработкой струи pq, в-ч; $c^{\text{пр}}_{\text{м}}$ – параметр накопления маршрута с мест погрузки; $m_{\text{і}}$ – состав маршрута, ваг; $\left(c^{\text{пр}}_{\text{м}}m_{\text{м}}\right)_{ij}$ – дополнительные затраты вагоно-часов на организацию прямых отправительских маршрутов по сравнению с немаршрутизированной отправкой вагонов, в–ч;

$$\left(c^{\text{пр}}_{\text{м}}m_{\text{м}}\right)_{ij} = \sum nt^{\text{м}}_{\text{п}_i} + \sum nt^{\text{м}}_{\text{в}_j} - \left(\sum nt^{\text{нм}}_{\text{п}_i} + \sum nt^{\text{нм}}_{\text{в}_j}\right),$$

здесь $\sum nt^{\text{м}}_{\text{п}_i}, \sum nt^{\text{м}}_{\text{в}_j}$ – затраты приведенных вагоно-часов на выполнение грузовых и маневровых операций соответственно на станциях погрузки и выгрузки, а также на доставку вагонов от стан-

ции погрузки маршрута до ближайшей технической станции и от последней технической станции до станции выгрузки маршрута, в-ч; $\sum nt_{\text{п}_i}^{\text{нм}}, \sum nt_{\text{в}_j}^{\text{нм}}$ – то же, при немаршрутизированной доставке вагонов, в-ч. $c_{\text{м}}^{\text{расп}}$ – параметр организации маршрута в распыление; $\left(c_{\text{м}}^{\text{расп}} m_{\text{м}}\right)_{ij}$ – вагоно-часы на организацию маршрутов в распыление, в-ч;

$$\left(c_{\text{м}}^{\text{расп}} m_{\text{м}}\right)_{ij} = \sum nt_{\text{п}_i}^{\text{м}} - \sum nt_{\text{п}_i}^{\text{нм}} + \sum nt_{\text{в}_j}^{\text{нм}}.$$

Условия доставки струй вагонопотоков со станций зарождения до станций назначений записываются в виде ограничений возможных комбинаций путей следования вагонопотоков. Корреспонденции вагонопотоков такого плана для направления с 5 станциями приведены на рис. 2. Пункт погрузки (1’) и пункты выгрузки (2’,3’,4’,5’) маршрутов представлены на полигоне сети в виде фиктивных станций.

Ограничения по доставке струй технической маршрутизации:

$$\begin{cases} x_{15} + y_{15}^2 x_{25} + y_{15}^3 x_{13} x_{35} + y_{15}^4 x_{14} + y_{15}^2 y_{15}^3 x_{35} + \\ \quad + y_{15}^2 y_{15}^4 x_{24} + y_{15}^3 y_{15}^4 x_{13} + y_{15}^2 y_{15}^3 y_{15}^4 = 1; \\ x_{14} + y_{14}^2 x_{24} + y_{14}^3 x_{13} + y_{14}^2 y_{14}^3 = 1; \\ x_{13} + y_{13}^2 = 1; \\ x_{25} + y_{25}^3 x_{35} + y_{25}^4 x_{24} + y_{25}^3 y_{25}^4 = 1; \\ x_{24} + y_{24}^3 = 1; \\ x_{35} + y_{35}^4 = 1. \end{cases}$$

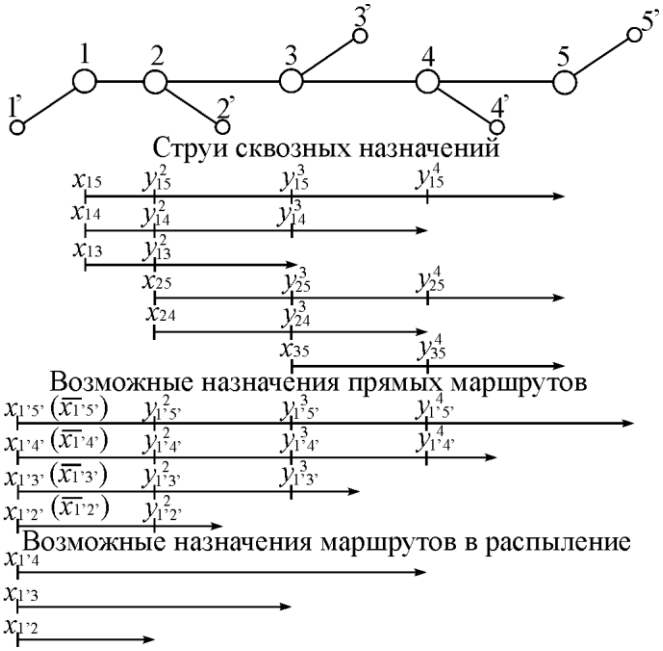


Рис. 2. Схема полигона для совместного расчета плана отправительской и технической маршрутизации

Ограничения по доставке струй отправительской маршрутизации:

$$\begin{cases} x_{1'5'} + x_{1'4} y_{1'5'}^4 + x_{1'3} y_{1'5'}^3 x_{35} + x_{1'2} y_{1'5'}^2 x_{25} + \\ + \overline{x}_{1'5'} x_{15} = 1; \\ x_{1'4'} + x_{1'4} y_{1'4'}^4 + x_{1'3} y_{1'4'}^3 + x_{1'2} y_{1'4'}^2 x_{24} + \overline{x}_{1'4'} x_{14} = 1; \\ x_{1'3'} + x_{1'3} y_{1'3'}^3 + x_{1'2} y_{1'3'}^2 + \overline{x}_{1'3'} x_{13} = 1; \\ x_{1'2'} + x_{1'2} y_{1'2'}^2 + \overline{x}_{1'2'} x_{12} = 1. \end{cases}$$

Представленные постановки задач оптимизации плана формирования поездов в районе местной работы имеют ряд особенностей:

– многоэкстремальность, поэтому стандартные методы оптимизации не дают гарантии получения действительно оптимального варианта;

– наличие булевых управляющих переменных, на которые наложены нелинейные ограничения;

– нелинейный характер изменения единичных расходов.

Авторами предложено использование генетических алгоритмов решения поставленных задач.

При кодировании вариантов плана формирования каждой булевой переменной ставится в соответствие определенный ген хромосомы.

Исходная популяция формируется с использованием «шим», обеспечивающих включение в план назначений, удовлетворяющих общему достаточному условию, и исключение назначений, которые не могут быть усилены за счет включения в них смежных струй вагонопотоков (не отвечающих необходимому условию) [1, 2]. Данные гены защищены от мутации, т. к. их изменение заведомо будет приводить к ухудшению вариантов оптимального плана.

Механизм отбора особей для формирования нового поколения основан на вытеснении, тем самым достигаются две цели: первая – сохраняются лучшие найденные решения, полученные в предыдущих поколениях, обладающие различными хромосомными наборами, вторая – в популяции поддерживается достаточное генетическое разнообразие.

Применение генетических алгоритмов для автоматизации расчета системы организации вагонопотоков на полигоне дороги приводит к получению ряда условно оптимальных вариантов, близких по критерию эффективности при незначительных затратах машинного времени. Это позволяет оперативно корректировать план формирования при изменении мощности исходных струй вагонопотоков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Инструктивные указания по организации вагонопотоков на железных дорогах ОАО «РЖД». – М.: Техинформ, 2007. – 528 с.
2. Акулиничев В.М. Организация вагонопотоков. – М.: Транспорт, 1979. – 223 с.
3. Осьминин А.Т. Программный модуль расчета плана формирования поездов модифицированным методом совмещенных аналитических сопоставлений / А.Т. Осьминин, Л.Б. Немцов, А.С. Бессолицын [Текст] // Ведомственные корпоративные сети системы (ВКСС Connect) – М. : 2001. – С. 171–172.
4. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер. с польск. И. Д. Рудинского. – М. : Горячая линия–Телеком, 2006. – 452 с.
5. Гладков Л. А., Курейчик В. В., Курейчик В. М. Генетические алгоритмы : Учебное пособие — 2–е изд.. – М: Физматлит, 2006. – 320 с.

УДК 159.9:681.3

Деканова Нина Петровна,
д. т. н., профессор, профессор кафедры информатики ИрГУПС,
тел.: (83952)-63-83-95, доб. (1-29), e-mail: dekanova_n@irgups.ru
Могутнов Кирилл Сергеевич,
аспирант кафедры информатики ИрГУПС,
тел.: (83952)-63-83-95, доб. (1-29), e-mail: kirill-mogutnov@rambler.ru

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ СОЦИАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ С УЧЕТОМ МЕТОДОВ ПОИСКОВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ И СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

N.P. Dekanova, K.S. Mogutnov

SOCIAL RESEARCH SYSTEM DEVELOPMENT WITH SEARCH OPTIMIZATION AND STATISTIC ANALYSIS TECHNIQUES

Аннотация. *В статье рассматривается подход к разработке системы социальных исследований на базе статистического анализа деятельности веб-портала и оптимизации запросов. Определена стратегия развития проекта с учетом факторов, влияющих на рост/снижение популярности портала.*

Ключевые слова: *поисковая оптимизация, статистический анализ, реляционные базы данных, экспертная информация, компьютерные эксперименты.*

Abstract. *The article is devoted to approach social research system creation on base of statistic analysis of activity of web – portal and queries optimization. The project development strategy is determined considerating factors affecting popularity increase/decrease.*

Keywords: *search engine optimization, statistical analysis, relational data bases, expertise information, computing experiments.*

Введение

Получение среза общественного мнения о работе государственных, политических или общественных структур возможно с помощью различных информационных систем, реализующих методы сбора социологических данных с целью их накопления, анализа и дальнейшего использования. Например, респонденты могут высказывать своё мнение с помощью систем, размещенных в Интернете.

Наряду с созданием веб-сайтов важной задачей является обеспечение эффективной маркетинговой стратегии и оптимального использования систем. По истечении определенного периода времени они нуждаются в реинжиниринге и переработке, направленных на увеличение числа посетителей, увеличение скорости обработки информации и её представления конечному пользователю, связаны с обновлением или заменой реализованных информационных технологий на современные, с устранением явных и скрытых ошибок, с оптимизацией работы запросов и модернизацией интерфейса. В выборе стратегии развития вебсайта важную роль играют получение и обработка данных о посещениях сайта. Проблема создания интеллектуальной системы анализа веб-трафика и идентификации пользователей является актуальной исследовательской задачей [1].

Рассматривая вопросы оптимизации процесса функционирования информационных систем, включающих обширные базы данных, можно вы-

делить три основных направления [2]. Это, во-первых, оптимизация настроек сервера как правило, этим занимаются системные администраторы. Во-вторых – оптимизация базы данных, опирающаяся на общие принципы нормализации отношений. Функции данного уровня реализуют администраторы баз данных, привлекая различные системы автоматизации проектирования и оптимизации. В-третьих, оптимизация отдельных запросов также способствует улучшению производительности системы. Третий этап оптимизации связан с разработкой приложений-клиентов, создаваемых, как правило, программистами или рядовыми пользователями.

В достижении приемлемого уровня производительности реляционных систем важную роль играют встроенные в СУБД специальные программы – оптимизаторы [3, 4]. Однако каждая СУБД использует уникальный набор методов оптимизации. Поэтому при создании поисковых запросов с целью достижения высокой производительности приложения, реализуемого на базе конкретной СУБД, необходимо на уровне программирования запроса определить оптимальную стратегию.

1. Анализ статистических данных

Для оценки и анализа статистической информации по посещаемости сайта используются такие параметры, как количество хостов (уникальных *IP*-адресов), хитов (загрузок сайта или отдельных страниц); статистика по используемым посетителями операционным системам и браузерам; информация по *IP*-адресам и времени последнего посещения сайта каждым из посетителей; информация по количеству посетителей, пришедших на сайт с поисковых систем (*Rambler, Yandex, Google* и др.); количество посещений сайта со страниц, на которых расположены ссылки на сайт [5].

Одним из мощных инструментов для сбора и накопления статистических данных по посещаемости сайта, количеству просмотренных страниц, среднему времени пребывания пользователя на сайте, точек входа и выхода на сайт, популярности контента, а также параметров браузера, операционной системы, информации об основных источниках трафика и географии посетителей сайта является система *Google Analytics* [6] .

В работе [7] рассмотрены вопросы получения и анализа статистических данных с целью разработки стратегии развития комплексной информационной системы городского интернет-портала «Твой Иркутск», охватывающего такие сферы, как новости, афиша, погода, телефонный справочник и т. д. Согласно определению Интернет-портала, он является вертикальным, публичным и региональным веб-сайтом.

На момент исследования срок жизни портала составил полтора года. В целом, посещаемость городского портала имеет тенденцию роста. График средней длительности пребывания пользователя на страницах сайта также имеет тенденцию роста. Среднее время пребывания составляет 10 – 15 минут (в начале периода наблюдения в два раза меньше).

За полтора года зафиксировано 6,5 млрд посещений, 21,7 млрд просмотров страниц. Оценивая объем трафика, можно отметить, что 55,4 % пользователей зашли на сайт целенаправленно, 30,22 % – через поисковые системы, 10,94 % перешли по ссылкам с других сайтов, а 3,45 % – прочие посетители. Самыми популярными поисковыми запросами сайта являются: «Иркутск», «Погода Иркутск», «Новости Иркутск», «ТВ–программа Иркутск», «Афиша Иркутск», «Отправка СМС Иркутск», «Расписание аэропорта Иркутск».

География пользователей следующая: Иркутск – 79 %, Москва – 7,79 %, Санкт-Петербург – 1,3 %, Новосибирск – 1,2 %, Ангарск – 1,1 %, Братск – 1,0 %. Около 40 % посетителей – постоянные пользователи.

В рабочие дни число посетителей в 1,5 раза выше по сравнению с выходными. Информация о курсах валют, номерах телефонов и новостях, в основном, используется только в будние дни, что говорит о необходимости такой информации для исполнения служебных обязанностей. Разделы «СМС», «Афиша», «Авто» практически равномерно посещаемы в течение недели. Раздел «ТВ», как правило, посещается в свободное от работы время.

Анализ статистических данных позволил выделить три группы факторов, влияющих на посещаемость портала. К первой относятся факторы, вызывающие резкие скачки (всплески) активности, ко второй – факторы, определяющие закономерное и плавное изменение, и к третьей относятся факторы, результат действия которых непредсказуем, т. е. неизвестно, дадут они всплеск или снижение, а также будет ли это изменение экстремумом или плавным снижением или увеличением.

Существенные всплески активности посетителей раздела «Новости» связаны с социальными, экономическими и природными явлениями (праздничные и предпраздничные дни; приезд высокопоставленных лиц, кризис экономики страны, а также чрезвычайные происшествия). Всплеск интереса к прогнозу погоды наблюдается при аномальных морозах или жаре.

Временные, сезонные факторы вызывают закономерные изменения числа посетителей портала. Рост числа обращений в выходные дни обусловлен интересом пользователей расписанием садоводческих маршрутов автобусов и электропоездов, в летний период времени – расписанием поездов дальнего следования и т. д. К снижению уровня посещаемости приводят сбои в работе разделов портала и увеличение времени загрузки страницы.

К непредсказуемому результату приводят факторы, вызывающие резкий всплеск активности. С одной стороны – это рост популярности, а с другой стороны, они могут вызвать перегрузку сервера и, возможно, сбои в его работе.

Наибольший интерес в плане повышения эффективности маркетинговой стратегии представляют факторы, вызывающие последовательное увеличение активности: обновление разделов, улучшение интерфейса, своевременное обновление информации, введение новых функций и возможностей. Рефакторинг, проведение работ по модернизации разделов, расширение функциональных свойств портала – необходимые мероприятия, направленные на увеличение посещаемости сайта. Проведение работ по оптимизации использования веб-сайта можно разделить на следующие направления: разработка и внедрение новых сервисов; переработка программного кода системы; анализ и оптимизация поисковых запросов; модификация пользовательского интерфейса.

2. Направления оптимизации запросов

Термин «оптимизация запросов» используется для обозначения стратегий, направленных на повышение эффективности процедур вычисления запросов. Встраиваемые в СУБД оптимизаторы подразделяются на два основных типа. Оптимизаторы первого типа основаны на правилах (*rule-based*). Они изучают синтаксис запроса и планируют пути его выполнения, не учитывая размеры таблиц и статистическую информацию о распределении данных. Второй тип оптимизаторов основывается на стоимости (*cost–based*). В этом случае используются не только правила синтаксического разбора запроса, но и статистическая информация о структуре и составе базы данных (объем БД, размеры отношений, установленные ключи, индексация и т. д.) [2].

При составлении поискового запроса важен рациональный выбор стратегии. Известны основные факторы, влияющие на скорость выполнения запроса [8, 9]. К ним относятся:

– операция проецирования в операторе *SELECT,* определяющая список необходимых полей в выборке;
– наличие или отсутствие сортировки возвращаемых запросом данных с помощью выражения *ORDER BY* и тип оператора;
– наличие или отсутствие предиката *LIMIT n, m,* который разделяет результат вывода данных на порции, ограничивая их определенным количеством кортежей;
– способ построения булевого выражения, включающего операторы *OR* и/или *AND* при использовании предиката *WHERE*;
– порядок размещения значений в наборе значений предиката *IN*;
– порядок следования отношений в списке, следующем за ключевым словом *FROM*;
– способ формулирования запроса, результирующие данные которого могут быть получены либо с использованием предиката *WHERE*, либо с помощью выражения *HAVING*;
– способ формулирования запроса к базе данных, который может быть реализован либо с помощью установления связей между участвующими в запросе отношениями, либо с использованием вложенных запросов.

3. Экспериментальные и статистические исследования различных стратегий составления запросов селекции данных и оценка скорости их выполнения

Для этой цели создано десять баз данных, каждая из которых содержит группу, состоящую из девяти одинаковых по структуре отношений, но с различными объемами хранимых в них данных. Отношения содержат по 10, 50, 100, 500, 1000, 5000, 10 000, 50 000, 100 000 кортежей. Степень каждого отношения (количество столбцов) равна двадцати пяти. Испытания проведены на персональном компьютере, обладающем следующими параметрами: оперативная память 2 Гбайта, процессор *Intel Core* 2 Duo с тактовой частой 4,66 ГГц. В качестве программного средства реализации использована СУБД *MySQL* 5.1.30. Качественной характеристикой сопоставления результатов выполнения запросов принято время выполнения запроса. По результатам серии экспериментов для каждой из рассмотренных ниже стратегий поиска получены регрессионные функции, отражающие зависимость времени выполнения запроса от объема выбираемых данных [10].

1. Необоснованный выбор избыточной информации приводит к значительному увеличению затрат времени выполнения запроса и ресурсов оперативной памяти. Операция проецирования в операторе *SELECT* определяет

список необходимых полей. Это правило наиболее актуально для отношений, степень которых превышает 20–25 полей.

В каждой базе данных для каждого отношения реализовано два варианта запросов:

– выбор всех данных отношения (вариант 1),
– выбор данных из всех кортежей отношения с использованием оператора проекции на три поля из двадцати пяти (вариант 2).

Коэффициенты корреляции между кардинальностью (числом кортежей) в отношении и оценками математических ожиданий времени выполнения запроса равны 1. Таким образом, математическое ожидание времени выполнения запроса линейно зависит от кардинальности в отношении.

Для случая выбора всех данных отношения (25/25 полей – вариант 1) регрессионная функция, отражающая зависимость времени выполнения запроса от кардинальности отношения, имеет следующий вид:

$$y(x) = 17{,}72 + 0{,}04x\,. \qquad (1)$$

Если данные выбираются из всех кортежей с использованием оператора проекции на три поля из двадцати пяти имеющихся в отношениях (3/25 полей, вариант 2), то получена следующая функция регрессии:

$$y(x) = 1{,}02 + 0{,}007x\,. \qquad (2)$$

Здесь x – кардинальность отношения, y – время выполнения запроса, в миллисекундах. Оценка адекватности регрессионных моделей эмпирическим данным выполнена на основе критерия Фишера [11]. Из соотношений (1) и (2) видно, что в среднем увеличение кардинальности отношения на 100 кортежей приводит к росту затрат времени при выполнении полной выборки на четыре миллисекунды, а при реализации выборки с проекцией на три поля – на 0,7 миллисекунды. На рис. 1 представлены функции регрессии $y(x)$ и точки Mo, соответствующие оценкам математического ожидания времени выполнения запроса. Ось x – кардинальность отношений, ось y – затраты времени в миллисекундах.

Выполненные исследования показали, что проекция на три поля из двадцати пяти приводит к шестикратному сокращению времени по сравнению с полным выбором. Если пользователю требуются значения лишь небольшой части полей отношения, то задание списка только необходимых атрибутов в операторе *SELECT* приведет к сокращению ресурсов оперативной памяти, занимаемой при выполнении запроса, и времени его реализации.

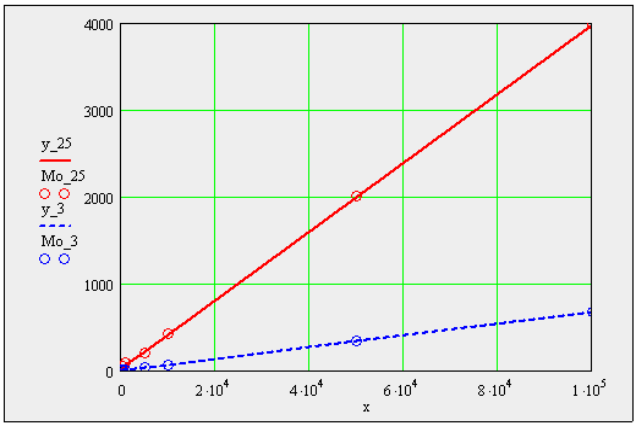


Рис. 1. Функциональная зависимость времени выполнения запроса от кардинальности отношений: при полном выборе данных (25 полей) – сплошная линия; при использовании проекции на три поля и степени отношений, равной двадцати пяти, – штриховая линия

2. С целью оценки влияния различных типов сортировки на время выполнения запроса в исследовании рассмотрено три типа сортировки выходных данных с помощью выражения *ORDER BY*: по возрастанию (*ASC*), по убыванию (*DESC*) и случайное перемешивание (*RAND*). В результате получены следующие регрессионные функции.

Для случая выбора данных, отсортированных по возрастанию, регрессионная функция, отражающая зависимость времени выполнения запроса от кардинальности отношения, имеет следующий вид:

$$y(x) = 1{,}2\times10^{-5} + 0{,}1x - 3{,}2\times10^{-6}x^2 + 5{,}3\times10^{-11}x^3,$$

для данных, отсортированных по убыванию:

$$y(x) = 1{,}4\times10^{-5} + 0{,}1x - 4{,}8\times10^{-6}x^2 + 8{,}1\times10^{-11}x^3$$

и для случая перемешивания данных:

$$y(x) = 7{,}0\times10^{-5} + 0{,}4x - 1{,}9\times10^{-5}x^2 + 3{,}2\times10^{-10}x^3\,.$$

Здесь x – кардинальность отношения, y – время выполнения запроса, в миллисекундах. Оценка адекватности регрессионных моделей эмпирическим данным выполнена также на основе критерия Фишера. На рис. 2 представлены функции регрессии $y(x)$ и точки Mo, соответствующие оценкам математического ожидания времени выполнения запросов.

Очевидно, что скорость реализации запроса, использующего сортировку, зависит от количества и типов полей, для которых она применяется. В эксперименте сортировка возвращаемых результатов проводилась по одному полю, содержащему целочисленные значения. Исследования показали, что при кардинальности отношений, не более 50000 кортежей наличие сортировки по возрастанию/убыванию незначительно сказывается на времени выполнения запроса. При дальнейшем росте кардинальности отношения сортировка ре-

зультата приводит к увеличению времени выполнения запроса. Например, в рассмотренном примере для отношений с кардинальностью, равной 100000, сортировка по возрастанию приводит к семикратному, сортировка по убыванию – к десятикратному, а перемешивание – к более, чем сорокакратному возрастанию затрат времени по сравнению со случаем отсутствия сортировки результата.

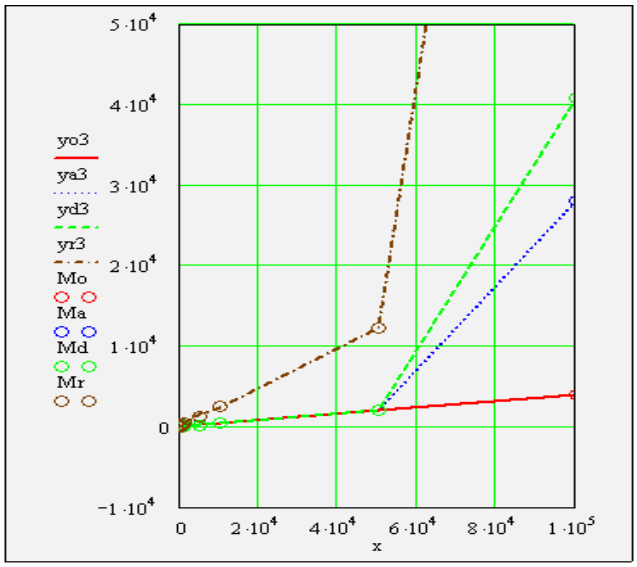


Рис. 2. Функциональная зависимость времени выполнения запроса от кардинальности отношений: при отсутствии сортировки – сплошная линия; при использовании сортировки по возрастанию – пунктирная линия; при использовании сортировки по убыванию – штриховая линия и при перемешивании – штрихпунктирная линия

Сортировка возвращаемого результата случайным образом (перемешивание) увеличивает время поискового запроса и при невысокой кардинальности отношения, поэтому ее следует избегать в выражении *ORDER BY*. В случаях, когда нельзя обойтись без такой сортировки, необходимо ограничить количество выбираемых записей.

3. Существует серия запросов, которая может быть реализована как с помощью оператора *SELECT* с выражением *WHERE*, так и с предложением *GROUP BY* и *HAVING*. В ходе исследования рассмотрено два таких варианта запроса на выборку данных, соответствующих заданному условию. В результате получены следующие регрессионные функции.

Для случая реализации запроса с выражением *WHERE* регрессионная функция, отражающая зависимость времени выполнения запроса от кардинальности отношения, имеет следующий вид:

$$y(x) = 1{,}4 \times 10^{-5} + 0{,}1x - 5{,}1 \times 10^{-6} x^2 + 8{,}4 \times 10^{-11} x^3.$$

Для случая реализации запроса с группированием и последующим отбором группы (предложение GROUP BY с выражением HAVING) получена следующая регрессионная функция:

$$y(x) = 2{,}4 \times 10^{-5} + 0{,}1x - 8{,}8 \times 10^{-6} x^2 + 1{,}5 \times 10^{-10} x^3.$$

Здесь x – кардинальность отношения, y – время выполнения запроса, в миллисекундах. Оценка адекватности регрессионных моделей эмпирическим данным выполнена также на основе критерия Фишера.

Исследования показали, что в случае возможности получения эквивалентных возвращаемых результатов следует отдавать предпочтение предикату *WHERE*, особенно при кардинальности отношения, превышающей 50000 кортежей. Например, при кардинальности отношения, равной 100000 кортежей, время реализации запроса с *HAVING* в 1,7 превысило затраты времени на выполнение запроса с предикатом *WHERE*.

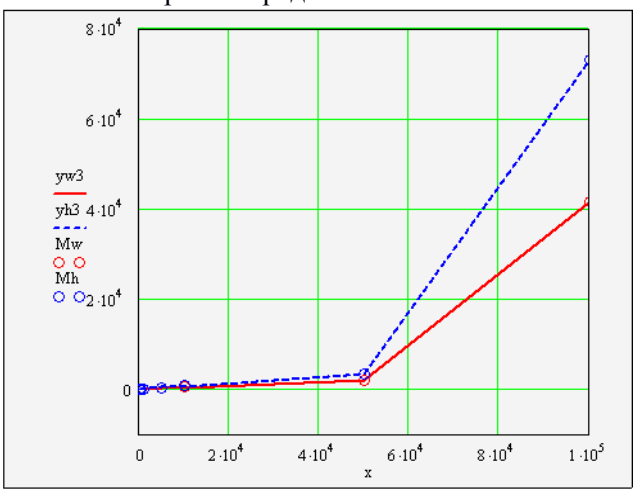


Рис. 3. Функциональная зависимость времени выполнения запроса от кардинальности отношений: при использовании условия отбора строк – сплошная линия; при использовании условия отбора группы – штриховая линия

Не **с**уществует единых правил, позволяющих написать код, максимально эффективно используемый оптимизатором любой СУБД и при этом вне зависимости от структуры и степени наполнения базы данных [2]. В работе исследованы стратегии реализации поисковых запросов с применением операции проецирования, сортировки и установления условий выбора на совокупность возвращаемых данных.

Полученные результаты позволяют оценить ожидаемые затраты времени выполнения запроса в зависимости от кардинальности отношения и исследуемого фактора (степени проецирования в выборке, вида сортировки возвращаемого результата или способа установления условий отбора данных). Сопоставительный анализ и визуализация полученных результатов подтверждают ряд правил оптимизации запросов и способствуют

принятию правильных решений при создании и использовании поисковых запросов в программном коде конечного продукта.

4. Задачи и особенности системы тестирования и опроса

Эффективность функционирования системы тестирования и опроса определяется такими факторами, как наличие в системе мастера создания тестов, средств анализа и сбора статистики, гибкой подсистемы разграничения прав доступа, возможности разделения опросов по направлениям (филиалам) и защищенности от взлома и подделывания данных. Анализ рынка подобных информационных систем показал, что системы, отвечающие указанному комплексу требований, не предлагаются.

В качестве основы создания программного комплекса используются веб-технологии, а именно фреймворки, которые позволяют создавать сложные информационные системы с относительно большой скоростью. Для реализации на их основе систем тестирования и социологического опроса требуется только веб-браузер. Организация хранения данных выполнена в СУБД MySQL, но без особых трудностей систему можно переключить на использование в СУБД PostgreSQL, MSSQL, SQLite, Oracle и т. д. Внедрение специальных терминалов в места сбора данных позволяет вводить ответы через сенсорный экран. Такие рабочие места, в отличие от полноценного компьютера, имеют ряд преимуществ: более низкая стоимость; удобство ввода ответа; повышенная защищенность от вандалов. Сенсорный ввод ответов предъявляет к различным элементам управления (кнопки, поля ввода, селекторы, чекбоксы) особые требования юзабилити. Они должны быть большими и логически корректно размещенными на экране.

Разработанная информационная система тестирования и социологических опросов удовлетворяет всем выдвинутым к ней требованиям [12]. Система имеет гибкий конструктор опросных листов, который позволяет оперативно формировать опросы, пользуясь такими инструментами, как добавление, упорядочивание, удаление, редактирование, группировка и фильтрация отдельных вопросов, накладывание условий на вопросы, если требуется ветвление теста. При добавлении каждого вопроса необходимо задать тип ответа (ввод текста, выбор одного/нескольких вариантов ответов, выбор варианта с возможностью добавления своего ответа), указать обязательность ответа на него (при ее отсутствии респондент может пропустить вопрос и перейти к следующему), определить группировку с другими вопросами теста для вывода на один экран. Каждый тест имеет срок доступности для ответов и может быть открыт только для определенных отделений (филиалов). При истечении сроков тестирования система блокирует ввод ответов. Кроме того, имеется возможность формирования инструкций к выполнению опросов.

Информационная система имеет гибкую подсистему управления правами доступа к различным функциональным частям. Созданы необходимые группы пользователей: администраторов, редакторов тестов, сборщиков результатов. Установлено разграничение прав доступа на создание элементов системы, на редактирование, удаление и т. д. Управление различными группами пользователей позволяет защитить данные, не допустить ошибок, вызванных человеческим фактором.

Наибольшее внимание при разработке системы уделено подсистеме, отвечающей за сбор статистики и формирование отчетов. Система позволяет получать выходные данные, как единичного прохождения, так и результаты по группе респондентов. Отчеты являются интерактивными – автоматически обновляющимися при поступлении дополнительных данных. Каждый отчет имеет определенные временные рамки, в него могут включаться как все пункты опросного листа, так и только определенные. Существует возможность формирования двух видов отчетов – общий отчет по предприятию, либо выходные данные группируются по подразделениям, что позволяет оценить показатели качества работы каждого из них.

Данная система не требует особых затрат при внедрении, может быть использована как на персональных компьютерах, так и на терминалах. Основным требованием является наличие веб–браузера и доступа к серверу, содержащему развернутую систему тестирования.

Система тестирования и проведения социологических опросов прошла полный путь от проектирования и разработки до внедрения и сопровождения. Она используется в одном из регионов РФ с целью изучения и анализа успешности функционирования аппарата мировых судей. Она отвечает всем предъявляемым к ней требованиям, ее сопровождение не требует специальных знаний и может осуществляться обычным оператором.

Заключение

Информационная система тестирования и опроса не является узкоспециализированной, ее можно легко адаптировать для использования в различных областях социологических, образовательных и технических исследований. Основным направлением развития системы с целью расширения области применения и функциональности

является разработка средств и методов анализа полученных данных и решения прикладных задач в соответствующих областях применения. В образовательном процессе необходима дополнительная подсистема контроля знаний. В области решения технических задач система тестирования и опроса полезна при получении экспертных оценок и сопоставлении результатов с нормативными (эталонными) показателями. Этот процесс является важным звеном в создании адаптивных систем диагностирования состояния сложных технических объектов и интеллектуальных систем управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Деканова Н.П., Могутнов К.С. Информационная система организации социологических опросов // Информационные и математические технологии в науке и управлении / Труды XVI Байкальской Всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении». Часть II. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2011. – С. 67–70.
2. Селко, Д. Программирование на SQL для профессионалов. 2–е издание. – М.: Издательство «Лори», 2004. – 442 с.
3. Дейт, К., Дж. Введение в системы баз данных, 7–е издание.: пер. с англ. – М.: издательский дом «Вильямс», 2001. – 1072 с.
4. Гарсиа–Молина, Г., Ульман Д., Уидом Д. Системы баз данных. Полный курс.: Пер. с англ. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1088 с.
5. Рабин Д. Изучайте журналы посещений // Сети и системы связи. 2005. №1.
6. Система сбора и анализа посещаемости сайта Google Analytics. URL: http://www.google.com/analytics/
7. Деканова Н.П., Могутнов К.С. Анализ посещаемости и определение стратегии развития интернет–проекта // Информационные и математические технологии в науке и управлении / Труды XIV Байкальской Всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении». Том 3. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2009. – С. 175–183.
8. Ашманов И., Иванов А. Оптимизация и продвижение сайтов в поисковых системах. – СПб.: Питер, 2009. – 400 с.
9. Сирович Д., Дари К. Поисковая оптимизация на PHP для професстоналов. Руководство разработчика по SEO. ; пер. с англ. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2008. 352 с.
10. Деканова Н.П., Могутнов К.С. Оптимизация поисковых запросов в реляционных базах данных // Информационные и математические технологии в науке и управлении / Труды XV Байкальской Всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении». Том 3. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2010. – С. 78–87.
11. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.
12. Интернет–сайт о юзабилити. Англ. язык. [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. и граф. дан. – США.: UseIt, 2008. – Режим доступа: http://www.useit.com/ , свободный.

УДК 621.311:621.331

Закарюкин Василий Пантелеймонович,
д. т. н., доцент ИрГУПС, e–mail: zakar@irk.ru
Крюков Андрей Васильевич,
д. т. н., профессор ИрГУПС, e-mail: and_kryukov@mail.ru
Шульгин Максим Сергеевич,
аспирант ИрГУПС, e-mail: nomad_frantic@km.ru

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В ФАЗНЫХ КООРДИНАТАХ

V.P. Zakaryukin, A.V. Kryukov, M.S. Shulgin

PARAMETRICAL IDENTIFICATION OF POWER TRANSFORMERS IN PHASE DOMAIN

Аннотация. *Предложен новый метод параметрической идентификации двухобмоточных трансформаторов, отличающийся от известных использованием фазных координат и построением модели трансформатора в виде решетчатой схемы замещения, элементы которой соединены по схеме полного графа.*

Ключевые слова: *трансформаторы, параметрическая идентификация, фазные координаты.*

Abstract. *The new method of parametrical identification of two winding transformers by using phase domain is proposed. Transformer model represents as lattice equivalent circuit.*

Keywords: *transformers, parametrical identification, phase domain.*

Введение

Задача расчета режимов электроэнергетических систем (ЭЭС) сводится к решению нелинейной системы уравнений

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{D}) = \mathbf{0}, \qquad (1)$$

где $\mathbf{F}$ – n-мерная вектор-функция; $\mathbf{X}$ – n-мерный вектор нерегулируемых параметров; $\mathbf{D} = \mathbf{\Pi} \cup \mathbf{Y}$ – вектор исходных данных. Вектор $\mathbf{D}$ включает две группы параметров: структурные $\mathbf{\Pi}$ и режимные $\mathbf{Y}$. В состав вектора $\mathbf{\Pi}$ входят параметры высоковольтных линий электропередачи (ЛЭП), 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 свидетельствуют данные, приведенные в работе [3]. Уточнение параметров и получение адекватных реальным условиям математических моделей элементов ЭЭС может быть выполнено на основе методов параметрической идентификации [4]. Однако существующие методы идентификации параметров элементов ЭЭС разработаны применительно к однолинейным схемам замещения и потому не применимы для расчета режимов при наличии продольной и поперечной несимметрии, которая особенно проявляется в ЭЭС, питающих электротяговые нагрузки.

Адекватный метод параметрической идентификации ЛЭП, позволяющий корректно учитывать продольную и поперечную несимметрии в ЭЭС предложен в работе [5]. В настоящей статье предлагается новый метод параметрической идентификации двухобмоточных трансформаторов, основанный на использовании фазных координат.

Следует отметить, что на основе параметрической идентификации трансформаторов может быть решена задача их технического диагностирования. Действительно, на основе регулярных измерений параметров $\mathbf{Y}$, точной идентификации компонент вектора $\mathbf{\Pi}$ и оценки его принадлежности допустимой области $\mathbf{D}_{\Pi}$, т. е. $\mathbf{\Pi} \in \mathbf{D}_{\Pi}$, можно выявить повреждения или отклонения от нормального режима работы трансформатора. Своевременное выявление дефектов позволяет принять меры по предупреждению их развития и сохранению работоспособного состояния трансформатора.

Уравнения состояния трансформатора

Ниже рассматривается трехфазный двухобмоточный трансформатор со схемой соединения Yн/Yн и заземлением нейтралей, рис. 1. При его моделировании использовались следующие положения:

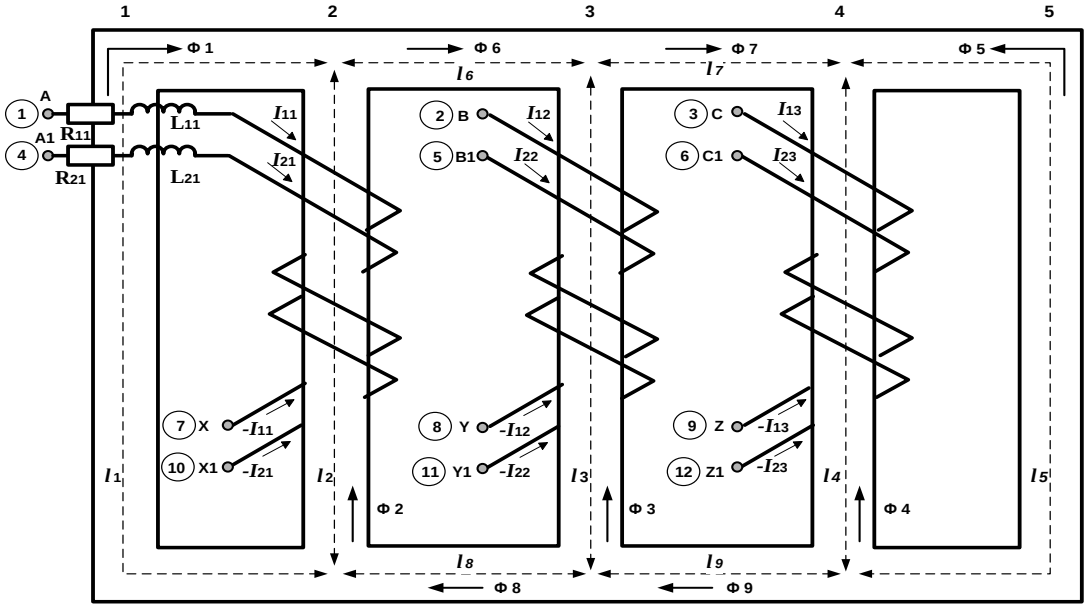


Рис. 1. Схема трансформатора

• трансформатор считается линейной системой;

• два крайних стержня характеризуются единичной магнитной проницаемостью, отображая магнитные потоки рассеяния; площади сечения крайних стержней одинаковы и равны S_1, длины крайних стержней равны между собой;

• три средних стержня магнитопровода характеризуются постоянной величиной комплексной магнитной проницаемости $\underline{\mu}_{r2}' - j\,\underline{\mu}_{r2}''$, определяемой из паспортных значений тока и активной мощности холостого хода; площади сечения этих стержней одинаковы и равны S_2;

• каждая катушка обладает активным и реактивным сопротивлениями $Z_{ik} = R_{ik} + j\omega L_{ik}$ (i – номер обмотки, k – номер фазы), которые определяются параметрами короткого замыкания;

• числа витков w_{ik} определяются по значению рабочей индукции в сердечнике и номинальному напряжению катушки U_{ik} (именно катушки, а не обмотки в целом, последнее может быть больше первого на $\sqrt{3}$), $w_{ik} = \dfrac{U_{ik}\sqrt{2}}{\omega B_{2m} S_2} = \dfrac{4.502 U_{ik}}{B_{2m} S_2}$, если U_{ik} – в киловольтах, амплитуда индукции B_{2m} – в тесла, S_2 – м^2.

Предполагается симметрия конструкции трансформатора, то есть равные длины $l_1 = l_5$, $l_6 = l_7 = l_8 = l_9$, $l_2 = l_4$. При этом очевидно равны магнитные потоки $\Phi_6 = \Phi_8$, $\Phi_7 = \Phi_9$.

Уравнения электрического и магнитного состояний трансформатора с двумя обмотками и шестью катушками можно записать так [6]:

$$\left(R_{11} + j\,\omega L_{11}\right)\dot{I}_{11} + j\,\omega w_{11}\dot{\Phi}_2 = \dot{U}_{11} = \dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_7;$$
$$\left(R_{12} + j\,\omega L_{12}\right)\dot{I}_{12} + j\,\omega w_{12}\dot{\Phi}_3 = \dot{U}_{12} = \dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_8;$$
$$\left(R_{13} + j\,\omega L_{13}\right)\dot{I}_{13} + j\,\omega w_{13}\dot{\Phi}_4 = \dot{U}_{13} = \dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_9;$$
$$\left(R_{21} + j\,\omega L_{21}\right)\dot{I}_{21} + j\,\omega w_{21}\dot{\Phi}_2 = \dot{U}_{21} = \dot{\varphi}_4 - \dot{\varphi}_{10};$$
$$\left(R_{22} + j\,\omega L_{22}\right)\dot{I}_{22} + j\,\omega w_{22}\dot{\Phi}_3 = \dot{U}_{22} = \dot{\varphi}_5 - \dot{\varphi}_{11};$$
$$\left(R_{23} + j\,\omega L_{23}\right)\dot{I}_{23} + j\,\omega w_{23}\dot{\Phi}_4 = \dot{U}_{23} = \dot{\varphi}_6 - \dot{\varphi}_{12};$$
$$\dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2 - \dot{\Phi}_6 = 0;$$
$$\dot{\Phi}_3 + \dot{\Phi}_6 - \dot{\Phi}_7 = 0;$$
$$\dot{\Phi}_4 + \dot{\Phi}_5 + \dot{\Phi}_7 = 0;$$
$$\dot{H}_1 l_1 - \dot{H}_2 l_2 = -\dot{I}_{11} w_{11} - \dot{I}_{21} w_{21};$$
$$\dot{H}_2 l_2 + 2\dot{H}_6 l_6 - \dot{H}_3 l_3 = \dot{I}_{11} w_{11} + \dot{I}_{21} w_{21} - \dot{I}_{12} w_{12} - \dot{I}_{22} w_{22};$$
$$\dot{H}_3 l_3 + 2\dot{H}_7 l_7 - \dot{H}_4 l_4 = \dot{I}_{12} w_{12} + \dot{I}_{22} w_{22} - \dot{I}_{13} w_{13} - \dot{I}_{23} w_{23};$$
$$\dot{H}_4 l_4 - \dot{H}_5 l_5 = \dot{I}_{13} w_{13} + \dot{I}_{23} w_{23}.$$

Записанная система включает шесть уравнений электрического состояния и семь – магнитного состояния. В уравнениях U_{ik} – напряжения фаз обмоток, H_i – напряженности магнитного поля стержней или частей ярма с длинами l_i. Первый индекс в обозначениях напряжений, токов и чисел витков обозначает номер обмотки, второй индекс – номер фазы. Взаимосвязи напряженностей поля с потоками задаются следующими уравнениями:

$$\dot{H}_k\, l_k = \frac{\dot{B}_k\, l_k}{\mu_0\, \underline{\mu}_{rk}} = \underline{R}_{mk}\dot{\Phi}_k;$$

$$\underline{R}_{mk} = \frac{l_k}{\mu_0\left(\underline{\mu}_{r1}' - j\,\underline{\mu}_{r1}''\right) S_1},\ \text{если}\ k = 1, 5;$$

$$\underline{R}_{mk} = \frac{l_k}{\mu_0\left(\underline{\mu}_{r2}' - j\,\underline{\mu}_{r2}''\right)S_2}, \text{ если } k = 2, 3, 4, 6, 7,$$

где $\underline{R}_{mi} = R_{mi}' + jR_{mi}''$ – магнитные сопротивления магнитных ветвей.

С учетом магнитных сопротивлений система преобразуется следующим образом:

$$\underline{Z}_{11}\dot{I}_{11} + j\,\omega\, w_{11}\dot{\Phi}_2 = \dot{U}_{11};$$
$$\underline{Z}_{21}\dot{I}_{21} + j\,\omega\, w_{21}\dot{\Phi}_2 = \dot{U}_{21};$$
$$\underline{Z}_{12}\dot{I}_{12} + j\,\omega\, w_{12}\dot{\Phi}_3 = \dot{U}_{12};$$
$$\underline{Z}_{22}\dot{I}_{22} + j\,\omega\, w_{22}\dot{\Phi}_3 = \dot{U}_{22};$$
$$\underline{Z}_{13}\dot{I}_{13} + j\,\omega\, w_{13}\dot{\Phi}_4 = \dot{U}_{13};$$
$$\underline{Z}_{23}\dot{I}_{23} + j\,\omega\, w_{23}\dot{\Phi}_4 = \dot{U}_{23};$$
$$\underline{R}_{m1}\dot{\Phi}_1 - \underline{R}_{m2}\dot{\Phi}_2 + \dot{I}_{11}w_{11} + \dot{I}_{21}w_{21} = 0;$$
$$\underline{R}_{m2}\dot{\Phi}_2 + 2\underline{R}_{m6}\left(\dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2\right) -$$
$$-\underline{R}_{m3}\dot{\Phi}_3 - \dot{I}_{11}w_{11} - \dot{I}_{21}w_{21} + \dot{I}_{12}w_{12} + \dot{I}_{22}w_{22} = 0;$$
$$\underline{R}_{m3}\dot{\Phi}_3 + 2\underline{R}_{m7}\left(\dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2 + \dot{\Phi}_3\right) -$$
$$-\underline{R}_{m4}\dot{\Phi}_4 - \dot{I}_{12}w_{12} - \dot{I}_{22}w_{22} + \dot{I}_{13}w_{13} + \dot{I}_{23}w_{23} = 0;$$
$$\underline{R}_{m4}\dot{\Phi}_4 + \underline{R}_{m5}\left(\dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2 + \dot{\Phi}_3 + \dot{\Phi}_4\right) -$$
$$-\dot{I}_{13}w_{13} - \dot{I}_{23}w_{23} = 0.$$

Симметрия сердечника трансформатора обусловливает равенства $\underline{R}_{m1} = \underline{R}_{m5}$; $\underline{R}_{m2} = \underline{R}_{m3} = \underline{R}_{m4}$; $\underline{R}_{m6} = \underline{R}_{m7}$, тогда

$$\underline{Z}_{11}\dot{I}_{11} + j\,\omega\, w_{11}\dot{\Phi}_2 = \dot{U}_{11};$$
$$\underline{Z}_{21}\dot{I}_{21} + j\,\omega\, w_{21}\dot{\Phi}_2 = \dot{U}_{21};$$
$$\underline{Z}_{12}\dot{I}_{12} + j\,\omega\, w_{12}\dot{\Phi}_3 = \dot{U}_{12};$$
$$\underline{Z}_{22}\dot{I}_{22} + j\,\omega\, w_{22}\dot{\Phi}_3 = \dot{U}_{22};$$
$$\underline{Z}_{13}\dot{I}_{13} + j\,\omega\, w_{13}\dot{\Phi}_4 = \dot{U}_{13};$$
$$\underline{Z}_{23}\dot{I}_{23} + j\,\omega\, w_{23}\dot{\Phi}_4 = \dot{U}_{23};$$
$$\underline{R}_{m1}\dot{\Phi}_1 - \underline{R}_{m2}\dot{\Phi}_2 + \dot{I}_{11}w_{11} + \dot{I}_{21}w_{21} = 0;$$
$$\underline{R}_{m2}(\dot{\Phi}_2 - \dot{\Phi}_3) + 2\underline{R}_{m7}\left(\dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2\right) -$$
$$-\dot{I}_{11}w_{11} - \dot{I}_{21}w_{21} + \dot{I}_{12}w_{12} + \dot{I}_{22}w_{22} = 0;$$
$$\underline{R}_{m2}(\dot{\Phi}_3 - \dot{\Phi}_4) + 2\underline{R}_{m7}\left(\dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2 + \dot{\Phi}_3\right) -$$
$$-\dot{I}_{12}w_{12} - \dot{I}_{22}w_{22} + \dot{I}_{13}w_{13} + \dot{I}_{23}w_{23} = 0;$$
$$\underline{R}_{m1}\left(\dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2 + \dot{\Phi}_3 + \dot{\Phi}_4\right) +$$
$$+\underline{R}_{m2}\dot{\Phi}_4 - \dot{I}_{13}w_{13} - \dot{I}_{23}w_{23} = 0.$$

Определение параметров трансформатора

К числу определяемых параметров трансформатора можно отнести магнитные сопротивления $\underline{R}_{m1}$, $\underline{R}_{m2}$, $\underline{R}_{m7}$, магнитные потоки $\dot{\Phi}_1$, $\dot{\Phi}_2$, $\dot{\Phi}_3$, $\dot{\Phi}_4$, числа витков w_{11}, w_{12}, w_{13}, w_{21}, w_{22}, w_{23} и активно-индуктивные сопротивления фаз обмоток $\underline{Z}_{11}$, $\underline{Z}_{12}$, $\underline{Z}_{13}$, $\underline{Z}_{21}$, $\underline{Z}_{22}$, $\underline{Z}_{23}$. Работа со столь большим числом неизвестных трудоемка и малоперспективна, поэтому целесообразно ввести некоторые упрощающие предположения и сократить число неизвестных. Для трансформатора с симметричным сердечником можно полагать, что

$$\underline{R}_{m7} = \underline{R}_{m2}\frac{l_7}{l_2} = \frac{1}{2}k_{72}\underline{R}_{m2}, \text{ где } k_{72} = \frac{2\,l_7}{l_2}.$$

Для определения параметров потребуется рассмотрение двух режимов работы:

- холостой ход или близкий к нему режим;
- нагрузочный режим с нагрузками, близкий к номинальному, или режим короткого замыкания.

Исходной информацией для параметрической идентификации трансформатора служат результаты измерений модулей и фаз токов первичной и вторичной обмоток. Практически реализуемый алгоритм определения параметров включает следующие этапы.

1. Из замеров режима холостого хода можно определить число витков фаз обмоток:

$$w_{ik} = \frac{0.004502U_{ik}}{B_{2m}S_2}, \qquad (1)$$

где напряжение катушки U_{ik} – в вольтах, амплитуда индукции B_{2m} – в тесла, площадь сечения стержня сердечника S_2 – м^2. Для масляных трансформаторов мощностью от 25 кВ·А до 100 кВ·А максимальная индукция лежит в пределах от 1.2 до 1.6 Тл, для трансформаторов мощностью более 160 кВ·А максимальная индукция находится в пределах от 1.4 до 1.65 Тл (верхние значения соответствуют современным трансформаторам).

2. По замерам в нагрузочном режиме или режиме короткого замыкания определяются магнитные потоки и активно-индуктивные сопротивления фаз обмоток. Предварительная оценка осуществляется по следующим формулам:

$$u_к' = \sqrt{{u_к}^2 - \left(\frac{100P_к}{S_н}\right)^2};$$

$$\underline{Z}_1 = \frac{3{U_{1n}}^2 P_к}{2{S_н}^2} + j\frac{3{U_{1n}}^2 u_к'}{200S_н};$$

$$\underline{Z}_2 = \underline{Z}_1\frac{{U_{2n}}^2}{{U_{1n}}^2},$$

где $P_к$ – потери короткого замыкания; $u_к$ – напряжение короткого замыкания, %; $S_н$ – номи-

нальная мощность трансформатора; U_{1n}, U_{2n} – фазные номинальные напряжения обмоток;

$$\dot{\Phi}_2 = \frac{\dot{U}_{11} - \dot{I}_{11}\underline{Z}_1}{j\,\omega\, w_{11}};\ \dot{\Phi}_3 = \frac{\dot{U}_{12} - \dot{I}_{12}\underline{Z}_1}{j\,\omega\, w_{12}};$$

$$\dot{\Phi}_4 = \frac{\dot{U}_{13} - \dot{I}_{13}\underline{Z}_1}{j\,\omega\, w_{13}}; \quad (2)$$

$$\underline{Z}_{21} = \frac{\dot{U}_{21} - j\,\omega\, w_{21}\dot{\Phi}_2}{\dot{I}_{21}};$$

$$\underline{Z}_{22} = \frac{\dot{U}_{22} - j\,\omega\, w_{22}\dot{\Phi}_3}{\dot{I}_{22}};$$

$$\underline{Z}_{23} = \frac{\dot{U}_{23} - j\,\omega\, w_{23}\dot{\Phi}_4}{\dot{I}_{23}}; \quad (3)$$

$$\underline{Z}_{11} = \underline{Z}_{21}\frac{w_{11}^{\ 2}}{w_{21}^{\ 2}};\ \underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{22}\frac{w_{12}^{\ 2}}{w_{22}^{\ 2}};$$

$$\underline{Z}_{13} = \underline{Z}_{23}\frac{w_{13}^{\ 2}}{w_{23}^{\ 2}}. \quad (4)$$

Далее выполняется уточнение на основании следующих выражений:

$$\dot{\Phi}_2 = \frac{\dot{U}_{11} - \dot{I}_{11}\underline{Z}_{11}}{j\,\omega\, w_{11}};$$

$$\dot{\Phi}_3 = \frac{\dot{U}_{12} - \dot{I}_{12}\underline{Z}_{12}}{j\,\omega\, w_{12}};$$

$$\dot{\Phi}_4 = \frac{\dot{U}_{13} - \dot{I}_{13}\underline{Z}_{13}}{j\,\omega\, w_{13}}; \quad (5)$$

$$\underline{Z}_{11} = \frac{\dot{U}_{11} - j\,\omega\, w_{11}\dot{\Phi}_2}{\dot{I}_{11}};$$

$$\underline{Z}_{12} = \frac{\dot{U}_{12} - j\,\omega\, w_{12}\dot{\Phi}_3}{\dot{I}_{12}};$$

$$\underline{Z}_{13} = \frac{\dot{U}_{13} - j\,\omega\, w_{13}\dot{\Phi}_4}{\dot{I}_{13}}; \quad (6)$$

$$\underline{Z}_{21} = \frac{\dot{U}_{21} - j\,\omega\, w_{21}\dot{\Phi}_2}{\dot{I}_{21}};$$

$$\underline{Z}_{22} = \frac{\dot{U}_{22} - j\,\omega\, w_{22}\dot{\Phi}_3}{\dot{I}_{22}};$$

$$\underline{Z}_{23} = \frac{\dot{U}_{23} - j\,\omega\, w_{23}\dot{\Phi}_4}{\dot{I}_{23}}. \quad (7)$$

3. Определение магнитных сопротивлений, потока рассеяния и коэффициента k_{72} производится итерационным методом Ньютона. Для этого вычисляются начальные приближения по формулам:

$$\underline{R}_{m1} = \frac{l_1}{\mu_0 S_1};$$

$$k_{72} = \frac{2\,l_7}{l_2};$$

$$\underline{R}_{m7} = \underline{R}_{m2}\frac{l_7}{l_2} = \frac{1}{2}k_{72}\underline{R}_{m2}; \quad (8)$$

$$Q_{\tilde{o}} = \sqrt{\left(\frac{i_{\tilde{o}}S_{\acute{i}}}{100}\right)^2 - P_{\tilde{o}}^{\ 2}};$$

$$p_{\tilde{o}} = \frac{2\omega\, w_{11}^{\ 2}\, P_{\tilde{o}}}{U_{\acute{i}}^{\ 2}};$$

$$q_{\tilde{o}} = \frac{2\omega\, w_{11}^{\ 2}\, Q_{\tilde{o}}}{U_{\acute{i}}^{\ 2}}; \quad (9)$$

$$R_{m2} = \frac{q_{\tilde{o}}}{6 + 4\,k_{72}} + j\frac{p_{\tilde{o}}}{6 + 4k_{72}};$$

$$\dot{\Phi}_1 = \frac{\underline{R}_{m2}\dot{\Phi}_2 - \dot{I}_{11}\,w_{11} - \dot{I}_{21}\,w_{21}}{\underline{R}_{m1}}, \quad (10)$$

где $U_{\acute{i}}$ – номинальное фазное напряжение первичной обмотки, $S_{\acute{i}}$ – номинальная мощность трансформатора, P_x – активная мощность холостого хода. После вычисления начальных приближений реализуется итерационный цикл метода Ньютона

$$\mathbf{X}^{<k+1>} = \mathbf{X}^{<k>} - \left[\mathbf{J}(\mathbf{X}^{<k>})\right]^{-1}\cdot\mathbf{F}\left(\mathbf{X}^{<k>}\right), \quad (11)$$

где $\mathbf{X}^{<k>} = \left[\underline{R}_{m1}^{\ <k>} \quad \underline{R}_{m2}^{\ <k>} \quad \dot{\Phi}_1^{<k>} \quad k_{72}^{\ <k>}\right]^T$ – k-е приближение метода Ньютона.

Для корректного определения магнитного сопротивления $\underline{R}_{m1}$ необходим несимметричный режим работы трансформатора с существенной нулевой последовательностью токов.

4. Определение параметров решетчатой схемы замещения осуществляется с учетом заземления нейтралей обмоток по методике, изложенной в работе [6]. Из полученных на предыдущих этапах параметров трансформатора и правилам работы [6] составляется матрица обобщенных сопротивлений $\underline{\mathbf{Z}}_T$, отвечающая матричному уравнению

$$\underline{\mathbf{Z}}_T\dot{\mathbf{I}}_T = \dot{\mathbf{U}}_T,$$

где $\dot{\mathbf{I}}_T = \left[\dot{I}_{11} \quad \dot{I}_{12} \quad \dot{I}_{13} \quad \dot{I}_{21} \quad \dot{I}_{22} \quad \dot{I}_{23} \quad \dot{\Phi}_1 \quad \dot{\Phi}_2 \quad \dot{\Phi}_3 \quad \dot{\Phi}_4\right]^T$ – вектор токов и магнитных потоков; $\dot{\mathbf{U}}_T = \left[\dot{U}_{11} \quad \dot{U}_{12} \quad \dot{U}_{13} \quad \dot{U}_{21} \quad \dot{U}_{22} \quad \dot{U}_{23} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0\right]^T$ – вектор напряжений катушек трансформатора.

Разрешив систему уравнений относительно токов

$$\dot{\mathbf{I}}_T = \underline{\mathbf{Z}}_T^{-1}\mathbf{U}_T,$$

получим матрицу проводимостей $\underline{\mathbf{D}}_1 = \underline{\mathbf{Z}}_T^{-1}$. Матрица $\underline{\mathbf{Z}}_T$ имеет симметричную подматрицу размером $3n\times 3n$, поэтому и матрица $\underline{\mathbf{D}}_1$ имеет симмет-

ричную подматрицу $\underline{\mathbf{D}}$ такого же размера, которая и используется в матрице проводимостей решетчатой схемы замещения. Из матрицы $\underline{\mathbf{D}}$ образуется матрица решетчатой схемы $\underline{\mathbf{Y}} = \begin{bmatrix} -\underline{\mathbf{D}} & \underline{\mathbf{D}} \\ \underline{\mathbf{D}} & -\underline{\mathbf{D}} \end{bmatrix}$.

Коэффициенты матрицы $\underline{\mathbf{Y}}$ представляют собой проводимости ветвей полносвязной решетчатой схемы замещения. Проводимость ветви между узлами *i, k* (нумерация узлов по рис. 1) равна значению элемента матрицы $\underline{Y}_{ik}$.

Для учета схемы соединения обмоток трансформатора производится обработка соединений фаз обмоток. Эта обработка связана с переводом проводимостей ветвей между началами и концами фаз в шунты соответствующих узлов; так, в шунт узла 1 собираются проводимости ветвей 1–7, 1–8, 1–9, 1–10, 1–11, 1–12. Для двухобмоточного трансформатора со схемой соединения обмоток Yн/Yн это соответствует проводимостям шунтов узлов $\underline{y}_k = \sum_{i=7}^{12} \underline{Y}_{k\,i}$, k = 1…6, и проводимостям ветвей между незаземленными узлами $\underline{y}_{ik} = \underline{Y}_{ik}$, i = 1…6, k = 1…6, $i \neq k$, $\underline{Y}_{ik}$ – элементы матрицы $\underline{\mathbf{Y}}$. Проводимости ветвей между заземляемыми узлами игнорируются.

Общее количество ветвей итоговой решетчатой схемы равно 15.

Пример идентификации параметров трансформатора

Для проверки представленной методики идентификации параметров трансформатора применен четырехступенчатый метод расчетов с использованием программного комплекса Fazonord, разработанного в ИрГУПСе [7]:

- получение измерительной информации на основе компьютерного моделирования; для этого выполняются расчеты режима по исходной, «правильной» модели трансформатора;
- параметрическая идентификация трансформатора по предложенной методике;
- составление решетчатой схемы из *RL*-элементов;
- расчеты режимов идентифицированной модели и сравнение полученных данных с результатами по «правильной» схеме.

В качестве примера рассмотрен трансформатор ТД-10000-38.5/11 Yн/Yн с параметрами, принятыми по справочным данным.

На рис. 2 показана расчетная схема ПК Fazonord с «правильной» моделью (рис. 1 а) и с решетчатой схемой замещения из RL-элементов (рис. 1, *б*). Узлы 8, 9, 10 и 20, 21, 22 объявлены балансирующими с симметричной системой напряжений 22,25 кВ. Дополнительные модели трехфазных линий длиной 0,01 км слева и справа от решетчатой схемы добавлены для удобства оперирования со схемой и практически не искажают результаты расчетов. В табл. 1 представлены напряжения и токи «правильной» модели трансформатора, использованные для идентификации его параметров.

По формуле (1) из режима холостого хода определяются числа витков обмоток трансформатора:

$w_{11} = w_{12} = w_{13} = 430{,}8$; $w_{21} = w_{22} = w_{23} = 122{,}0$.

Предварительная оценка потоков и сопротивлений по формулам (2) … (4) дает следующие значения:

$\dot{\Phi}_2 = -j\,0.16439$ Тл; $\dot{\Phi}_3 = -0.14236 + j\,0{,}08219$ Тл;

$\dot{\Phi}_4 = 0{,}14236 + j\,0{,}08219$ Тл;

$\underline{Z}_{21} = 0{,}02492 + j\,0{,}44397$ Ом;

$\underline{Z}_{22} = 0{,}04128 + j\,0{,}43583$ Ом;

$\underline{Z}_{23} = 0{,}04508 + j\,0{,}45968$ Ом;

$\underline{Z}_{11} = 0{,}3110 + j\,5{,}54124$ Ом;

$\underline{Z}_{12} = 0{,}51528 + j\,5{,}43970$ Ом;

$\underline{Z}_{13} = 0{,}5627 + j\,5{,}73734$ Ом.

Уточнение по формулам (5)…(7) приводит к небольшой корректировке значений:

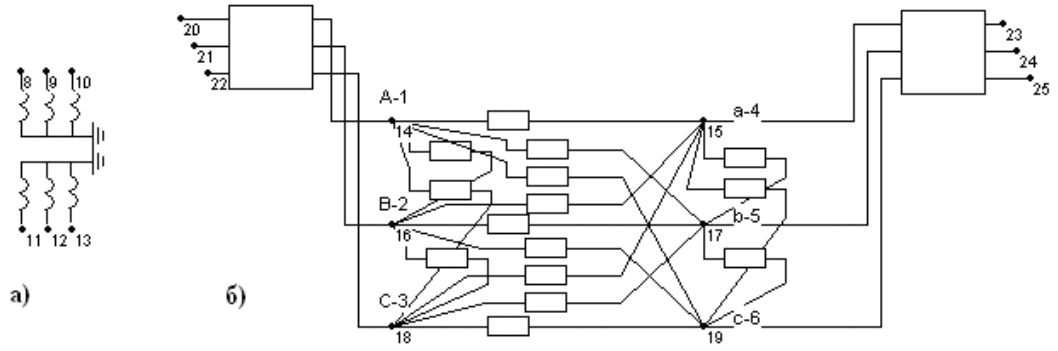


Рис. 2. Расчетная схема ПК Fazonord

Таблица 1

Напряжения и токи холостого хода и нагрузочного режима трансформатора

Узел	Холостой ход				Нагрузочный режим			
	***U*, кВ**	***U*, град**	***I*, А**	***I*, град**	***U*, кВ**	***U*, град**	***I*, А**	***I*, град**
8	22,25	0	1,31	–92,0	22,25	0	65,49	–43,3
9	22,25	–120,0	1,04	160,6	22,25	–120,0	100,01	–150,4
10	22,25	120,0	1,30	52,8	22,25	120,0	70,58	72,1
11	6,298	0,0	0	–172	6,144	–1,2	230,16	133,8
12	6,298	–120,0	0	–172,1	6,123	–122,5	365,16	31,0
13	6,298	120,0	0	–172,1	6,132	118,8	230,61	–106,2

$\dot{\Phi}_2 = -0{,}00185 - j\ 0{,}16244$ Тл;

$\dot{\Phi}_3 = -0{,}13868 + j\ 0{,}08385$ Тл;

$\dot{\Phi}_4 = 0{,}14116 + j\ 0{,}07944$ Тл;

$\underline{Z}_{11} = 0{,}311 + j\ 5{,}54124$ Ом;

$\underline{Z}_{12} = 0{,}51528 + j\ 5{,}43970$ Ом;

$\underline{Z}_{13} = 0{,}5627 + j\ 5{,}73734$ Ом;

$\underline{Z}_{21} = 0{,}0474 + j\ 0{,}44094$ Ом;

$\underline{Z}_{22} = 0{,}03233 + j\ 0{,}45106$ Ом;

$\underline{Z}_{23} = 0{,}0267 + j\ 0{,}42399$ Ом.

По формулам (8) … (10) находятся начальные приближения магнитных сопротивлений и потока $\dot{\Phi}_1$:

$$\underline{R}_{m1} = 2{,}6526 \cdot 10^6 \text{ Гн}^{-1};$$

$$\underline{R}_{m2} = 1853{,}45 + j\ 341{,}60 \text{ Гн}^{-1};$$

$$\dot{\Phi}_1 = -3{,}9779 \cdot 10^{-4} - j\ 4{,}5599 \cdot 10^{-4} \text{ Тл};\ k_{72} = 1.$$

Реализация метода Ньютона (11) обеспечивает стабилизацию значений уже после двух шагов итерации со следующими величинами:

$$\underline{R}_{m1} = 3{,}539 \cdot 10^6 - j\ 6{,}1584 \cdot 10^4 \text{ Гн}^{-1};$$

$$\underline{R}_{m2} = 1978{,}76 + j\ 343{,}26 \text{ Гн}^{-1};$$

$$\dot{\Phi}_1 = -2{,}9199 \cdot 10^{-4} - j\ 3{,}5258 \cdot 10^{-4} \text{ Тл};$$

$$k_{72} = 0{,}9411 - j\ 0{,}0091.$$

Составление матрицы обобщенных сопротивлений и ее обращение с последующим определением проводимостей узловых шунтов и сопротивлений ветвей с учетом заземления нейтралей дает параметры решетчатой схемы, представленные в табл. 2 и 3.

В табл. 4…7 приведены сравнительные расчеты режимов холостого хода и нагрузочного режима по «правильной» модели и по решетчатой схеме.

Приведенные данные показывают практически полное совпадение режима исходной «правильной» модели и режима восстановленной решетчатой схемы.

Таблица 2

Проводимости узловых шунтов (со знаком плюс для индуктивного шунта)

Узел	Акт. проводимость, См	Реакт. проводимость, См
1	–0,02057	–0,14501
2	–0,01775	–0,14299
3	–0,01693	–0,14871
4	0,07382	1,09806
5	0,06386	1,09102
6	0,06096	1,11114

Таблица 3

Сопротивления ветвей решетчатой схемы

Между узлами	Акт. сопр-е ветви, Ом	Реакт. сопр-е ветви, Ом
1–2	1,91753	–162,44964
1–3	0,86096	–172,38526
1–4	0,29292	3,34969
1–5	1,64755	–47,4735
1–6	1,7892	–44,84497
2–3	–5,40276	–169,26336
2–4	–1,79797	–45,82794
2–5	0,29832	3,35747
2–6	0,1311	–44,08956
3–4	–2,23888	–48,61393
3–5	–0,44668	–49,51423
3–6	0,29023	3,34424
4–5	–0,21892	–13,40819
4–6	–0,14114	–12,66915
5–6	0,33335	–12,88713

Таблица 4

Режим первичной обмотки при холостом ходе (нумерация узлов по рис. 2)

Узел	**8**	**20**	**Различие**
Напряжение, кВ	22,25	22,25	–
Угол, град.	0,0	0,0	–
Узел	**9**	**21**	**Различие**
Напряжение, кВ	22,25	22,25	–
Угол, град.	–120,0	–120,0	–
Узел	**10**	**22**	**Различие**
Напряжение, кВ	22,25	22,25	–
Угол, град.	120,0	120,0	–

Примечание. Активная мощность холостого хода «правильной» модели равна 14,5 кВт, активная мощность холостого хода решетчатой схемы равна 15,4 кВт. Реактивные мощности соответственно равны 78,6 квар и 87,0 квар, что соответствует небольшому завышению тока холостого хода трансформатора – от 0,79 % в «правильной» модели до 0,87 % в решетчатой схеме.

Таблица 5

Режим вторичной обмотки при холостом ходе (нумерация узлов по рис. 2)

Узел	**11**	**23**	**Различие**
Напряжение, кВ	6,298	6,296	0,0%
Угол, град.	0,0	0,0	0,0°
Узел	**12**	**24**	**Различие**
Напряжение, кВ	6,298	6,296	0,0%
Угол, град.	–120,0	–120,0	0,0°
Узел	**13**	**25**	**Различие**
Напряжение, кВ	6,298	6,296	0,0%
Угол, град.	120,0	120,0	0,0°

Таблица 6

Режим первичной обмотки при включении нагрузки

Узел	**8**	**20**	**Различие**
Напряжение, кВ	22,25	22,25	–
Угол, град,	0,0	0,0	–
Ток, А	65,49	65,59	0,15%
Ток, град,	–43,3	–43,4	–0,1°
Узел	**9**	**21**	**Различие**
Напряжение, кВ	22,25	22,25	–
Угол, град,	–120,0	–120,0	–
Ток, А	100,02	100,03	0,0%
Ток, град,	–150,4	–150,5	–0,1°
Узел	**10**	**22**	**Различие**
Напряжение, кВ	22,25	22,25	–
Угол, град,	120,0	120,0	–
Ток, А	70,59	70,71	0,2%
Ток, град,	72,1	72,1	0,0°

Таблица 7

Режим вторичной обмотки при включении нагрузки

Узел	**11**	**23**	**Различие**
Напряжение, кВ	6,144	6,144	0,0%
Угол, град.	–1,2	–1,2	0,0°
Ток, А	230,2	230,2	0,0%
Ток, град.	133,8	133,8	0,0°
Узел	**12**	**24**	**Различие**
Напряжение, кВ	6,123	6,123	0,0%
Угол, град.	–122,5	–122,5	0,0°
Ток, А	365,2	365,3	0,0%
Ток, град.	31,0	31,0	0,0°
Узел	**13**	**25**	**Различие**
Напряжение, кВ	6,132	6,132	0,0%
Угол, град.	118,8	118,8	0,0°
Ток, А	230,6	230,7	0,0%
Ток, град.	–106,2	–106,2	0,0°

Выводы

1. Предложен новый метод параметрической идентификации двухобмоточных трансформаторов, отличающийся от известных использованием фазных координат и построением модели трансформатора в виде решетчатой схемы замещения, элементы которой соединены по схеме полного графа.

2. Компьютерное моделирование, выполненное применительно к реальному трансформатору, показало высокую точность предложенного метода параметрической идентификации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гамм А.З. Статистические 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. дисс. канд. техн. Екатеринбург: УГТУ (УПИ), 2000. 23 с.
4. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с.
5. Шульгин М.С., Крюков А.В., Закарюкин В.П. Параметрическая идентификация линий электропередачи на основе фазных координат // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. № 1(29). 2011. С. 140–148.
6. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Иркут. ун–т. 2005. 273 с.
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. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Зарегистр. 28.06.2007.

УДК 681.3.06+519.68

Опарин Геннадий Анатольевич,
д. т. н., профессор, зам. директора Института динамики систем и теории управления СО РАН (ИДСТУ СО РАН)
тел.: (3952) 42-89-25, (3952) 51-14-14, e-mail: oparin@icc.ru
Вартанян Эдуард Каренович,
аспирант Института динамики систем и теории управления
СО РАН (ИДСТУ СО РАН), тел.: 8-902-761-11-22, e-mail: e.vartanyan@mail.ru

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ НАДЕЖНЫХ ПЛАНОВ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ НА ОБЪЕКТНОЙ МОДЕЛИ GRID

G.A. Oparin, E.K. Vartanyan

THE ALGORITHM OF CONSTRUCTION OF THE RELIABLE PLANS OF PROBLEM SOLVING ON THE OBJECT GRID MODEL

Аннотация. *Статья посвящена вопросам построения надежных планов решения задачи в распределенной среде, объединяющей кластеры с различной степенью надежности их вычислительных узлов. Сформулировано понятие надежного плана решения задачи. Представлен алгоритм построения таких планов. Применение этого алгоритма проиллюстрировано на модельном примере.*

Ключевые слова: *распределенные вычисления, планирование, надежность*.

Abstract. *The article is devoted to the questions of construction of the reliable plans of problem solving in the distributed environment which integrates clusters with various degree of reliability of their computing nodes. The concept of the reliable plan of problem solving is formulated. The algorithm of construction of such plans is presented. Application of this algorithm is illustrated on the model example.*

Keywords: *distributed computing, planning, reliability*.

Введение

Развитие информационно-вычислительных и сетевых технологий, а также постоянный рост требований к вычислительным ресурсам, диктуемых научно-исследовательскими приложениями, обусловили создание распределенных вычислительных сред различного назначения. При выполнении в таких средах сложных взаимосвязанных заданий важными аспектами управления вычислительными ресурсами являются планирование и назначение этих ресурсов [1]. К настоящему времени известно множество различных алгоритмов решения таких задач (см., например, [2]), в том числе алгоритмов, работающих с учетом заданных ограничений на используемые ресурсы. Однако зачастую эти алгоритмы ориентированы на однородные вычислительные системы, обладающие высокой отказоустойчивостью, не предусматривают наличие взаимосвязанных заданий или реализуют простейшие принципы обработки очередей заданий, такие как *FIFO*. В случае выполнения в разнородной распределенной вычислительной среде сложных взаимосвязанных заданий, одним из важнейших ограничений становится обеспечение надежности вычислительного процесса.

В данной статье рассматриваются вопросы построения надежных планов решения задач на объектной модели Grid [3]. Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, грант № 10-07-00146.

Интегрированная кластерная система

Частным случаем вычислительной среды Grid является интегрированная кластерная система (ИнКС). ИнКС – это распределенная вычислительная среда, предназначенная для решения фундаментальных и прикладных вычислительных задач и характеризующаяся следующими особенностями:

- в качестве узлов системы выступают вычислительные кластеры;
- на разных уровнях интеграции системы существуют различные категории пользователей, в их числе пользователи, нуждающиеся в высокоуровневых средствах организации вычислительного процесса решения задачи;
- задания пользователей относятся к задачам разных классов и требуют специализированных средств спецификации вычислительных процессов;
- множество заданий пользователей рассматривается с точки зрения теории очередей и представляется в виде совокупности потоков заданий;

- поток заданий характеризуется следующими свойствами: динамичностью; стохастичностью; неоднородностью; отсутствием обратной связи; неординарностью; стационарностью;
- в рамках системы могут функционировать специализированные распределенные проблемно–ориентированные программные комплексы;
- в системе нет единой политики администрирования вычислительных кластеров, на кластерах могут применяться различные принципы и механизмы обработки потоков заданий различных типов;
- средства объединения вычислительных кластеров в единую систему должны обеспечивать прозрачность, открытость и масштабируемость интегрируемых ресурсов.

Объектная модель ИнКС

Элементами модели, отражающей знания об объектах распределенной вычислительной среды ИнКС, являются:

- C – множество классов;
- O – множество объектов;
- P – множество полей;
- T – множество типов.

Для описания взаимосвязанного задания необходимы следующие классы объектов:

- параметр;
- операция нахождения искомых параметров по заданным;
- программный модуль, реализующий операцию;
- вычислительный узел ИнКС (вычислительный кластер);
- агент, управляющий вычислительным узлом.

Таким образом, в простейшем случае объектную модель ИнКС [4], описывающую взаимосвязанные задания, можно определить в виде структуры $S = < Z, F, M, R, A >$, где Z – множество параметров; F – множество операций, которые могут быть выполнены над полем параметров Z; M – множество программных модулей, реализующих операции из F; R – множество узлов ИнКС, в которых размещен тот или иной модуль из M; A – множество агентов, управляющих узлами из R (каждый агент a из A управляет узлами одного вычислительного кластера). Связи между элементами множеств Z, F, M, R и A заданы отношениями $IN \subseteq Z \times F$, $OUT \subseteq Z \times F$, $FM \subseteq F \times M$, $MR \subseteq M \times R$, $RA \subseteq R \times A$. Содержательно операция $f_i \in F$ реализует возможность вычисления множества параметров $OUT^i \subset Z$ по множеству параметров $IN^i \subset Z$, а множества IN^i и OUT^i называются, соответственно, множествами входных и выходных параметров для операции f_i. Каждая операция $f_i \in F$ характеризуется величиной T_{jk}^i – предполагаемым временем выполнения модуля $m_k \in M$, реализующего операцию f_i, в узле $r_j \in R$.

На S формулируются непроцедурные постановки задач вида: по заданным значениям параметров из $Z^{in} = \{x_1, x_2, \ldots, x_v\} \subset Z$ вычислить значения параметров из $Z^{out} = \{y_1, y_2, \ldots, y_u\} \subset Z$. План решения такой задачи является в общем случае параллельным. Если вычислительная модель избыточна (в случае, когда одни и те же параметры могут быть найдены с помощью разных операций), то может существовать множество планов решения одной задачи. План решения задачи задается в виде булевой матрицы X размерности $k \times n$ (рис. 1), где k – число шагов плана решения задачи, $n = |F|$, $x_{ij} = 1$ означает, что операция $f_j \in F$ выполняется на *i*-м шаге плана.

	f_1	…	f_n
Шаг *1*	0 ∨ 1	…	0 ∨ 1
…	…	…	…
Шаг *k*	0 ∨ 1	…	0 ∨ 1

Рис. 1. План решения задачи

Надежные планы решения задач

Отдельно взятые вычислительные кластеры выделенных рабочих станций являются, как правило, высоконадежными вычислительными системами. Однако в ИнКС могут быть также интегрированы кластеры других видов, например кластеры, сформированные на базе невыделенных рабочих станций компьютерных классов различных вузов или разнородных персональных компьютеров научных организаций. В этом случае особенно важной становится проблема обеспечения надежности вычислительной системы при выполнении сложного плана решения задачи, отдельные подзадачи которого решаются в узлах, обладающих различной степенью доступности и отказоустойчивости.

Понятие надежного плана решения задачи базируется на общих положениях теории надежности вычислительных систем (см., например, [5, 6]). С этой точки зрения основными характеристиками узлов ИнКС, в которых размещены про-

граммные модули, реализующие операции плана решения задачи, являются:

- $Av_j(t)$ – доступность узла $r_j \in R$ в момент времени t;
- T_j^w – среднее время работы узла r_j между отказами.

План решения задачи будем называть надежным, если вероятность выполнения каждой из его операций $f_i \in F_X$ не ниже заданного пользователем значения P':

$$Pr_i(t) = 1 - \prod_{j:\, r_j \in R_X} \left(\int_0^{T_{ij}} P_j(t)dt \right) \geq P', \quad (1)$$

где $F_X \subseteq F$ – подмножество операций, выполнение которых предусмотрено планом X; $R_X \subseteq R$ – множество вычислительных узлов, в которых размещены программные модули, реализующие операции из F_X; $P_j(t)$ – плотность вероятности отказа вычислительного узла r_j; T_{ij} – время, в течение которого должен безотказно отработать вычислительный узел r_j для того, чтобы успел выполниться программный модуль, реализующий операцию f_i.

В ходе анализа статистических данных об интервалах безотказной работы вычислительных узлов была выдвинута гипотеза о соответствии плотности распределения вероятности отказов узлов ИнКС нормальному распределению, что подтвердилось в результате предварительной проверки соответствия генеральной совокупности нормальному распределению:

$$P(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2} \right),$$

где μ – математическое ожидание случайной величины t; σ – среднеквадратичное отклонение случайной величины t.

Предполагается, что по каждому вычислительному узлу ИнКС доступна информация о математическом ожидании (среднем времени работы между отказами) и среднеквадратичном отклонении его отказов. Данная информация хранится в глобальной базе данных и обновляется с восстановлением узла после очередного отказа. Таким образом, $P_j(t)$ имеет следующий вид (рис. 2):

$$P_j(t) = \frac{1}{\sigma_j\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{\left(t - T_j^w\right)^2}{2\sigma_j^2} \right). \quad (2)$$

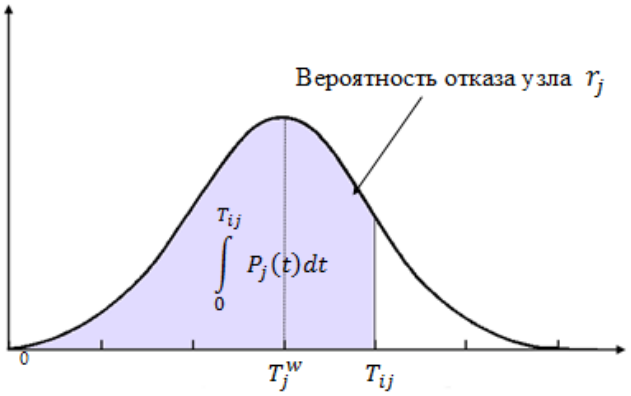


Рис. 2. Плотность вероятности $P_j(t)$

Отрезок времени T_{ij} вычисляется по следующей формуле:

$$T_{ij} = t^{sched} - t_j^{reset} + \delta_1 + \delta_2 + T_{ij}^X,$$

где t^{sched} – время начала планирования решения задачи; t_j^{reset} – время последнего восстановления узла r_j после последнего отказа; T_{ij}^X – время выполнения на узле r_j программного модуля, реализующего операцию f_i, с учетом ее позиции в плане; δ_1 – среднее время построения плана решения задачи; δ_2 – среднее время организации ВС и передачи ему построенного плана.

Алгоритм подсчета времени выполнения операции с учетом ее позиции в плане взят из [7]. При этом используется прогнозное время выполнения модуля $m_k \in M$, реализующего операцию f_i, на вычислительных узлах ИнКС:

$$T_{kj}^m = T_j^{in_send} + T_{kj}^{ex} + T_j^{res_send},$$

где $T_j^{in_send}$ – время, необходимое для передачи входных данных с управляющего узла кластера на узел r_j; T_{kj}^{ex} – прогнозное время выполнения модуля m_k на вычислительном узле r_j; $T_j^{res_send}$ – время, необходимое для передачи результатов с узла r_j на управляющий узел кластера.

Постановка задачи планирования

В ИнКС поступает поток заданий разных типов, в том числе задания, представляющие собой непроцедурные постановки задач. При обработке таких заданий планировщику требуется:

1) автоматически построить надежные планы решения взаимосвязанной задачи в виде булевых матриц (см. рис. 1);

2) сформировать виртуальное сообщество из агентов, обеспечивающих выполнение полученного плана решения задачи с помощью подчиненных им ресурсов.

Алгоритм

Алгоритм построения планов решения задачи включает следующие основные этапы:

Шаг 1. По непроцедурной постановке задачи методом прямой волны [8] строится избыточный поливариантный план решения задачи. Данный план представляет собой упорядоченное множество операций $F_X \subseteq F$, выполнение которых в определенной последовательности позволит найти искомые величины. На данном этапе планирования последовательность выполнения операций не известна.

Если при заданных величинах задачи невозможно найти искомые величины, то задача считается неразрешимой.

Шаг 2. Выделяется подмножество вычислительных узлов $R_X \subseteq R$. При этом в R_X включаются только доступные узлы:

$$Av_j(t) = true,$$

где t – момент обращения к вычислительному узлу r_j.

Шаг 3. Методом обратной волны [8] выполняется извлечение поливариантного плана из множества операций $F_X \subseteq F$. Варианты этого плана извлекаются путем прямого перебора, каждый из которых представляет собой булеву матрицу X^q размерности $k_q \times n$, где $q = 1,2,\ldots$ – порядковый номер варианта плана; k_q – число шагов плана решения задачи; $n = |F|$, $x_{ij}^q = 1$ означает, что операция $f_j \in F$ выполняется на *i*-м шаге плана.

Для каждого варианта плана X^q выделяется подмножество вычислительных узлов ИнКС $R_X^q \subseteq R_X$, обеспечивающих его выполнение.

Шаг 4. Проверяется выполнение условия (1) для каждого варианта плана X^q.

Если условие (1) выполняется, то из R_X^q исключается наиболее загруженный в текущий момент узел. После чего повторяется шаг 4.

Если условие (1) не выполняется, то в R_X^q включается узел, исключенный на предыдущей итерации. Если условие (1) не выполняется при первом прохождении шага 4, то рассматриваемый вариант плана отбрасывается, так как не является надежным.

Задача является неразрешимой, если в результате выполнения шага 4 отброшены все варианты построенного плана.

Шаг 5. Из оставшихся вариантов плана выбирается вариант с наибольшей вероятностью выполнения X^{q^*}, $q^* \in \{1,2,\ldots\}$ – номер субоптимального плана.

Шаг 6. Формируется ВС из множества агентов $A_X \subseteq A$, управляющих множеством узлов $R_X^{q^*}$.

Шаг 7. Интеллектуальным агентам из A_X передается план решения задачи X^{q^*} и описание топологии коммуникации между узлами из $R_X^{q^*}$.

Пример

Работа алгоритма проиллюстрирована на модельном примере. Информационно-логические связи между параметрами и операциями вычислительной модели представлены двудольным ориентированным графом на рис. 3. Вспомогательные структуры данных, используемые в алгоритме, строятся на основе данного графа.

Характеристики узлов ИнКС приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики узлов

	T_j^w	σ_j
r_1	520	12
r_2	648	9
r_3	825	23
r_4	842	14

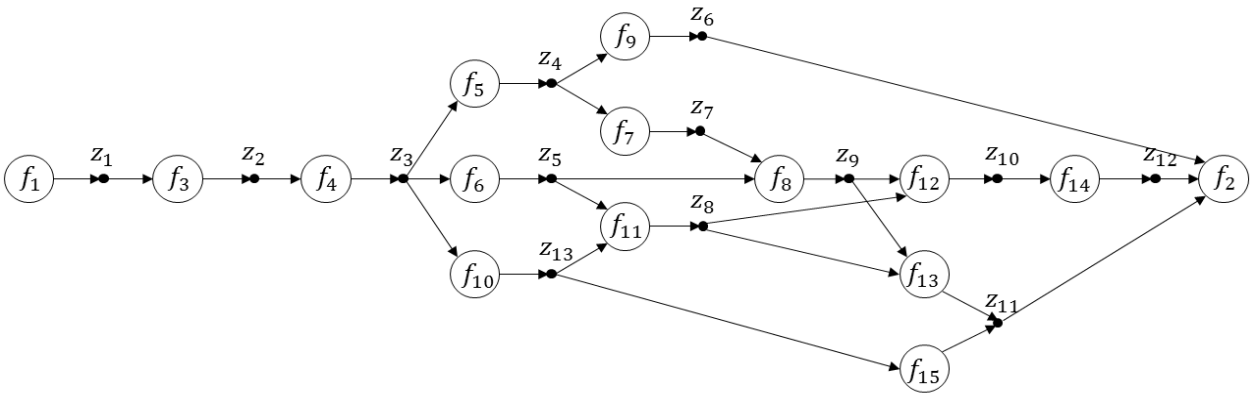


Рис. 3. Информационно-логические связи между параметрами и операциями вычислительной модели

Время выполнения операций в узлах приведено в таблице 2. Символ «–» означает, что модуль, реализующий операцию, не установлен на соответствующем узле.

Операции f_1 и f_2 (рис. 3) моделируют постановку задачи: по заданной величине z_1 вычислить значение параметров z_6, z_{11}, z_{12}. Требуется построить субоптимальный план решения этой задачи, вероятность выполнения которого $p \geq 0{,}95$. Время решения задачи $T_{run} \leq 30$.

Работа алгоритма:

Шаг 1. $F_X = \{f_i\}, i = 3, \ldots, 15$.

Шаг 2. Предположим, что все узлы доступны, тогда $R_X = \{r_1, r_2, r_3, r_4\}$.

Шаг 3. Построим поливариантный план решения задачи. Построенный план имеет два варианта:

$$F_X^1 = \{f_i\}, i = 3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14$$

$$X^1 = \begin{bmatrix} 1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0 \\ 0&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0 \\ 0&0&1&1&0&0&0&1&0&0&0&0 \\ 0&0&0&0&1&0&1&0&1&0&0&0 \\ 0&0&0&0&0&1&0&0&0&0&0&0 \\ 0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&1&0 \\ 0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&1 \end{bmatrix}$$

$$F_X^2 = \{f_i\}, i = 3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,14,15$$

$$X^2 = \begin{bmatrix} 1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0 \\ 0&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0 \\ 0&0&1&1&0&0&0&1&0&0&0&0 \\ 0&0&0&0&1&0&1&0&1&0&0&1 \\ 0&0&0&0&0&1&0&0&0&0&0&0 \\ 0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&0&0 \\ 0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&0 \end{bmatrix}$$

Шаг 4. Оценим надежность построенных планов по формулам (1) и (2) (табл. 3, 4).

Вероятность выполнения плана X^1 равна 0,97, а плана X^2 – 0,94. Следовательно, отбрасываем второй вариант плана.

Повторим шаг 4, отбросив наиболее загруженный узел. Предположим, что наиболее загруженным является узел r_1. В результате изменятся вероятности выполнения операций (табл. 5).

Вероятность выполнения плана осталась в допустимых пределах (0,96). Отбросим узел r_2 (предположив, что на данный момент он наиболее загруженный узел) и повторим шаг 4. Соответствующие значения надежности операций приведены в таблице 6.

В этом случае невозможно выполнить план

Таблица 2

Время выполнения операций в узлах

	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	f_9	f_{10}	f_{11}	f_{12}	f_{13}	f_{14}	f_{15}
r_1	1	–	–	3	2	–	–	–	–	1	4	–	3
r_2	2	–	3	2	–	2	–	–	1	1	2	2	–
r_3	–	2	–	–	2	–	2	4	2	–	3	2	–
r_4	–	–	2	–	–	3	3	–	–	–	–	–	–

Таблица 3

Вероятность выполнения операций в плане X^1

	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	f_9	f_{10}	f_{11}	f_{12}	f_{13}	f_{14}
r_1	0,03	1,00	1,00	0,04	0,05	1,00	1,00	1,00	1,00	0,05	0,06	1,00
r_2	0,02	1,00	0,02	0,02	1,00	0,04	1,00	1,00	0,03	0,04	0,05	0,06
r_3	1,00	0,03	1,00	1,00	0,04	1,00	0,04	0,03	0,04	1,00	0,04	0,05
r_4	1,00	1,00	0,02	1,00	1,00	0,03	0,03	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$Pr_i(t)$	0,99	0,97	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,97	0,99	0,99	0,99	0,99

Таблица 4

Вероятность выполнения операций в плане X^2

	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	f_9	f_{10}	f_{11}	f_{12}	f_{14}	f_{15}
r_1	0,03	1,00	1,00	0,04	0,05	1,00	1,00	1,00	1,00	0,05	1,00	0,06
r_2	0,02	1,00	0,02	0,02	1,00	0,04	1,00	1,00	0,03	0,04	0,06	1,00
r_3	1,00	0,03	1,00	1,00	0,04	1,00	0,04	0,03	0,04	1,00	0,05	1,00
r_4	1,00	1,00	0,02	1,00	1,00	0,03	0,03	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$Pr_i(t)$	0,99	0,97	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,97	0,99	0,99	0,99	0,94

Таблица 5

Вероятность выполнения операций в плане X^1

	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	f_9	f_{10}	f_{11}	f_{12}	f_{13}	f_{14}
r_2	0,02	1,00	0,02	0,02	1,00	0,04	1,00	1,00	0,03	0,04	0,05	0,06
r_3	1,00	0,03	1,00	1,00	0,04	1,00	0,04	0,03	0,04	1,00	0,04	0,05
r_4	1,00	1,00	0,02	1,00	1,00	0,03	0,03	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$Pr_i(t)$	0,98	0,97	0.99	0.98	0.96	0.99	0.99	0,97	0,99	0.96	0,99	0,99

Таблица 6

Вероятность выполнения операций в плане X^1

	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	f_9	f_{10}	f_{11}	f_{12}	f_{13}	f_{14}
r_3	1,00	0,03	1,00	1,00	0,04	1,00	0,04	0,03	0,04	1,00	0,04	0,05
r_4	1,00	1,00	0,02	1,00	1,00	0,03	0,03	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$Pr_i(t)$	0,00	0,97	0,98	0,00	0.96	0,97	0.99	0,97	0,96	0,00	0,96	0,95

X^1, вероятность выполнения равна 0,00. Следовательно, необходимо вернуть в множество R_X^1 узел r_2, исключенный на предыдущей итерации шага 4: $R_X^1 = \{r_2, r_3, r_4\}$.

Таким образом, план X^1 является субоптимальным планом решения данной задачи.

Заключение

Представленный в работе алгоритм построения планов решения задач позволяет учитывать показатели доступности и отказоустойчивости узлов ИнКС, а также обеспечивает возможность как централизованного, так и распределенного планирования вычислений на основе различных политик администрирования вычислительных узлов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Топорков В.В. Модели распределенных вычислений. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 320 с.
2. Vidyarthi D.P., Sarker B.K., Tripathi A.K., Yang L.T. Scheduling in Distributed Computing Systems: Analysis, Design and Models. – Springer Science+Business Media, 2009. – 300 p.
3. Бычков И.В., Опарин Г.А., Новопашин А.П., Феоктистов А.Г., Корсуков А.С. Управление потоками заданий в интегрированных кластерных системах // Параллельные вычисления и задачи управления: Пленарные докл. V Междунар. науч. конф. – М.: Изд–во ИПУ РАН, 2010. – С. 39–46.
4. Опарин Г.А., Феоктистов А.Г. Модели и инструментальные средства организации распределенных вычислений // Параллельные вычисления и задачи управления: Тр. IV Междунар. конф. – М.: Изд–во ИПУ РАН, 2008. – С. 1126–1135.
5. Иыуду К.А. Надежность, контроль и диагностика вычислительных машин и систем. – М.: Высшая школа, 1989. – 216 с.
6. Ушаков И.А. Вероятностные модели надежности информационно–вычислительных систем. – М.: Радио и связь, 1991. – 132 с.
7. Лорьер Ж.–Л. Системы искусственного интеллекта // Пер с франц. – М.: Мир, 1991. – 568 с.
8. Горбунов–Посадов М.М., Корягин Д.А., Мартынюк В.В. Системное обеспечение пакетов прикладных программ. – М.: Наука, 1990. – 208 с.

УДК 625.111

Титов Константин Михайлович,
аспирант кафедры «ИППЖДиУН» ИрГУПС, e-mail: titov_km@irgups.ru
Холодов Петр Николевич,
аспирант кафедры «ИППЖДиУН» ИрГУПС, e-mail: kholodov_pn@irgups.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТОИМОСТИ ШУМОЗАЩИТНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ НА СТАДИИ ВАРИАНТНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛЕГКОГО РЕЛЬСОВОГО ТРАНСПОРТА НА ОСНОВЕ МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ МЕТОДИКИ СНИП II-12-77 «ЗАЩИТА ОТ ШУМА»

K.M. Titov, P.N. Holodov

AUTOMATE THE CALCULATION DETERMINING THE VALUE OF NOISE-REDUCING ACTIVITIES DURING THE DESIGN VARIANT LIGHT RAIL ON THE BASIS OF A MODERNIZED METHOD OF SNIP II-12-77 «PROTECTION AGAINST NOISE»

Аннотация. *Рассматривается методика расчета шумозащитных мероприятий, подходящая для стадии вариантного проектирования рельсового транспорта, с последующей адаптацией для автоматизированных расчетов и реализацией в программном продукте.*

Ключевые слова: *рельсовый транспорт, защита от шума, проектирование.*

Abstract. *Touches upon the method calculation of anti-noise measures, suitable for the design variants stage of rail transport, with subsequent adaptation for automated calculation and implementation of a software product.*

Keywords: *rail transport, anti-noise, design.*

В настоящее время в России активно развиваются проекты строительства легкого рельсового транспорта (ЛРТ), используемого для городских пассажирских перевозок.

Линии ЛРТ проектируются и успешно эксплуатируются в Москве, Санкт-Петербурге, Волгограде, Краснодаре, Екатеринбурге, Саратове и других городах России.

В отличие от обычного трамвая ЛРТ значительно повышает скорости передвижения пассажиров в городе, однако при этом усиливается шумовое загрязнение городской среды от подвижного состава ЛРТ, что превращается в серьезную проблему при проектировании трассы ЛРТ в стесненной городской застройке, так как в жилых и общественных зданиях, расположенных вблизи от трассы ЛРТ, происходит превышение допускаемых уровней шума, указанных в санитарных нормах [1].

Ситуация осложняется за счет того, что именно шум большинство населения остро воспринимает как негативный фактор, наряду с другими экологическими факторами ухудшения качества городской среды вблизи трассы ЛРТ (вибрация, электромагнитное излучение, изменение городского ландшафта и другие).

В этом, пожалуй, состоит основная причина того, что при проектировании трассы ЛРТ в городской застройке сравнению и выбору оптимальных шумозащитных мероприятий необходимо уделять самое пристальное внимание уже на ранних стадиях проектирования.

Однако сегодня при проектировании новой линии ЛРТ шумозащитные мероприятия учитываются лишь в разделе «Оценка воздействия на окружающую среду», который разрабатывается в заключительный период работы на стадии «Проектная документация» для выбранного варианта трассы [2].

По мнению авторов, такой подход ошибочен и в практику проектирования ЛРТ следует ввести правило, диктующее необходимость определения характеристик шумового загрязнения, а также выбора типа, параметров и стоимости шумозащитных мероприятий на стадии вариантного проектирования трассы ЛРТ. Предлагаемый подход можно обеспечить за счет автоматизации части процессов проектирования.

В данной статье рассматривается модернизированная методика определения предварительных размеров и стоимости наиболее распространенных шумозащитных сооружений: экранов и галерей.

Предварительное определение типа и стоимости шумозащитных сооружений подразумевает собой использование приблизительных данных, достаточных для дальнейшего сравнения вариантов. Поэтому точность размеров экранов или индивидуальных сооружений может быть принята, как для линейно-протяженных объектов на основе расчетов средних попикетных значений шума.

Перед выполнением расчета на каждом пикете проверяется условие (1) по наибольшей разнице значений *нормативного* (установленного по санитарным нормам [1]) и *расчетного* уровней звукового давления L_A, определяемого вблизи защищаемых объектов по формуле (2)

$$\Delta L_{Amax} < \Delta L_{Adon}, \quad (1)$$

где ΔL_{Amax} – наибольшая разность ΔL_A на участке, дБА; ΔL_{Adon} – снижение уровня шума до допускаемого по санитарным нормам [1] значения, требующее сложного конструктивного решения (рекомендуется принимать не более 24 дБА), дБА,

$$\Delta L_A = L_{Arасч} - L_{Anорм}, \quad (2)$$

где $L_{Arасч}$ – расчетное значение уровня шума у объекта по карте шумового загрязнения, дБА; $L_{Anорм}$ – нормативное значение уровня шума для защищаемого объекта по санитарным нормам [1], дБА.

Проверка условия (1) обусловлена сложностью устройства шумозащиты при значениях ΔL_{Adon}, превышающих 24 дБА. На таких участках трассы могут оказаться предпочтительнее следующие мероприятия: локальное смещение оси трассы, подземный участок трассы, глубокая выемка или строительство шумозащитных зданий вдоль трассы ЛРТ (производственных, жилых, общественных зданий со специальной шумозащищенной планировкой и отдельными конструктивными мероприятиями).

В случае выполнения условия (1) предлагается, основываясь на модернизированной методике, использующей СНиП II-12-77 [3], вычислять эффективную высоту шумозащитных экранов с последующим расчетом их стоимости на участках наземного прохождения линии.

В исходной методике нормативного документа СНиП II-12-77 [3] для определения высоты шумозащитного экрана используется схема расчета, приведенная на рис. 1.

Расчет производится по формуле (3), определяющей разность длин путей прохождения звукового луча после устройства экрана – сумма отрезков (a + b) и до устройства экрана (без защиты) – отрезок c, а также используется табл. 1.

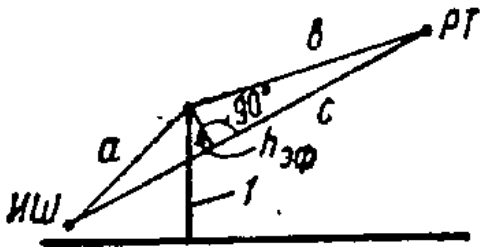


Рис. 1. Расчетные схемы для определения снижения уровня звука за экранами по СНиП II-12-77: 1 - экран; ИШ - источник шума; РТ - расчетная точка; $h_{эф}$ - эффективная высота экрана

$$\delta = (a + b) - c. \quad (3)$$

Таблица 1

Снижение уровня звука за экраном $\Delta L_{Aэкр}$ в зависимости от разности длин путей прохождения звукового луча $\delta_{доп}$

Разность длин путей прохождения звукового луча $\delta_{доп}$, м	Снижение уровня звука экраном $\Delta L_{Aэкр}$, дБА
0,005	6
0,02	8
0,06	10
0,14	12
0,28	14
0,48	16
0,83	18
1,4	20
2,4	22
6	24

Методика нормативного документа СНиП II-12-77 [3] была выбрана за основу после анализа альтернативных способов определения эффективной высоты акустического экрана, но препятствием для ее использования без изменений являлась ориентированность на локальный расчет методом перебора значений.

Модернизация методики, предложенная в статье, состоит в ее представлении, позволяющем обеспечить автоматизацию поиска оптимальной шумозащитной конструкции с расчетом ее параметров и стоимости на основе использования при проектировании векторных карт.

В модернизированной методике предлагается использовать на каждом объекте схему расчета, приведенную на рис. 2.

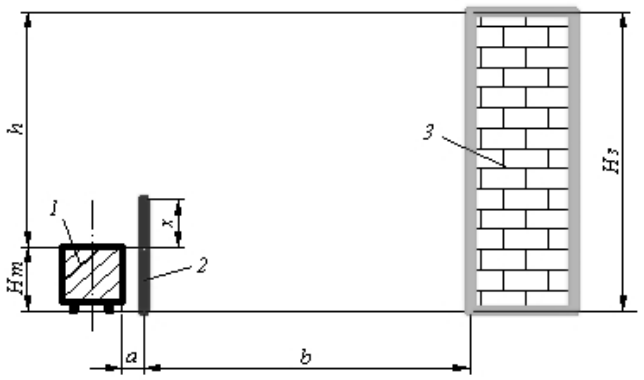


Рис. 2. Схема для расчета эффективной высоты экрана по модернизированной методике:
1 - рельсовый транспорт (H_m – высота транспорта), 2 – шумозащитный экран (x – эффективная высота экрана), 3 – защищаемый объект - здание ($H_з$ – высота здания)

Выбор местоположения и получение исходных данных для расчета выполняется по векторной карте шумового загрязнения с нанесенной на нее трассой ЛРТ. Для построения таких карт используются геоинформационные технологии и программы акустических расчетов.

По карте шумового загрязнения на пикетах, по наименьшей нормали $l_н$ от объекта к трассе (рис. 3), выбираются объекты с наибольшим превышением нормативного шума ΔL_{Amax} и принимается соответствующий тип шумозащитного экрана.

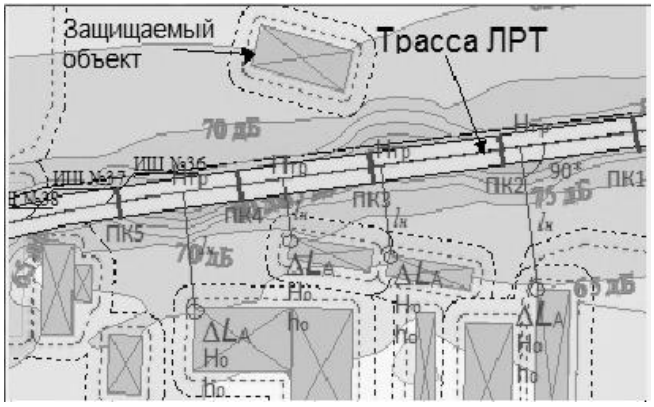


Рис. 3. Схема плана трассы ЛРТ на векторной карте шумового загрязнения для расчета эффективной высоты экрана

В соответствии с рассчитанным на пикете превышением ΔL_{Amax} тип шумозащитного сооружения по рекомендациям, изложенным в работе [4], предлагается принимать в следующих областях:

- до 10 дБА – шумоотражающий экран;
- в диапазоне 10−24 дБА – шумопоглощающий экран или звукоизолирующая галерея из прозрачных шумоотражающих панелей.

Затем с векторной карты считываются, м: высота здания $H_з$ и высотные отметки (отметка, на которой находится здание − H_o и проектная отметка трассы $H_{тр}$).

После получения исходных данных производится расчет превышения h и расстояния l, которое соответствует сумме a и b из рисунка 2)

$$h = H_з + H_o - H_{тр} - H_m, \text{ м} \qquad (4)$$

$$l = l_н - \frac{b_m}{2}, \text{ м} \qquad (5)$$

где $H_з$ – высота защищаемого от шума здания, м; H_m – высота транспорта, м; b_m – ширина транспорта, м; $l_н$ – расстояние по ближайшей нормали от защищаемого объекта до оси трассы (см. рис. 3), м.

Получив исходные данные для расчета, вычисляем эффективную высоту x для нормируемой $\delta_{доп}$ по следующей формуле, полученной на основе математических преобразований формулы (3) и значений габарита приближения шумозащитного экрана к трассе скоростного трамвая по СНиП [5]

$$x = \frac{-A \cdot B^2 - \sqrt{A^2 \cdot B^2 + B^2 - 1}}{B^2 - 1}, \text{ м}, \qquad (6)$$

где коэффициенты A и B определяются по формулам

$$A = \frac{0{,}5 \cdot \delta_{доп}{}^2 + \delta_{доп} \cdot \sqrt{l^2 + h^2} + l}{h}, \text{ м}, \qquad (7)$$

$$B = \frac{h}{\delta_{доп} + \sqrt{l^2 + h^2}}, \text{ м}. \qquad (8)$$

Отсюда полную высоту шумозащитного экрана найдем по формуле

$$h_э = H_m + x, \text{ м}. \qquad (9)$$

После расчета полной высоты экрана вычисляется его стоимость в зависимости от типа экрана, его высоты, стоимости 1 м^2 материала, из которого изготовлен экран, с учетом затрат на его установку.

Отсюда, стоимость вышеизложенных шумозащитных мероприятий в рублях для i-го расчетного участка предлагается определять по формуле

$$C_{шм} = \sum_{i=1}^{n} [l_{расч.i} \cdot \left(h_{э.i} \cdot C_{э.(кв.м)i} + C_{э.(уст.п.м)i}\right) + C_{зап.i.}] + C_{доп}, \qquad (10)$$

где $l_{расч.i}$ – длина участка (в данной работе предлагается использовать попикетный расчет), м; $C_{э.(кв.м)i}$ – стоимость квадратного метра шумозащитного экрана в зависимости от его типа (принимается по прайсам соответствующих компаний), руб/кв.м; $C_{э.(уст.п.м)i}$ – стоимость установки 1 погонного метра шумозащитного экрана в зависимости от его высоты и типа (принимается по прайсам соответствующих компаний), руб/пог.м; $C_{зап.i}$ – стоимость

дополнительной длины шумозащитного мероприятия (запаса шумозащиты) для обеспечения достаточного расстояния по гашению шума в воздухе (в большинстве случаев достаточно 50 м с двух сторон по длине экрана или галереи), руб; $C_{доп}$ – стоимость дополнительных шумозащитных мероприятий (установка пластиковых окон, систем вентиляции и т.д.), руб.

В результате, по вышеизложенной модернизированной методике появилась возможность автоматизировать предварительные расчеты шумозащитных мероприятий при проектировании трассы ЛРТ.

Была разработана программа «Расчет эффективной высоты шумозащитных экранов» (методика – К.М. Титов, программирование в Delphi – П.Н. Холодов, рис. 4), позволяющая автоматизировать процесс расчета различных шумозащитных мероприятий при проектировании рельсового транспорта в городской среде.

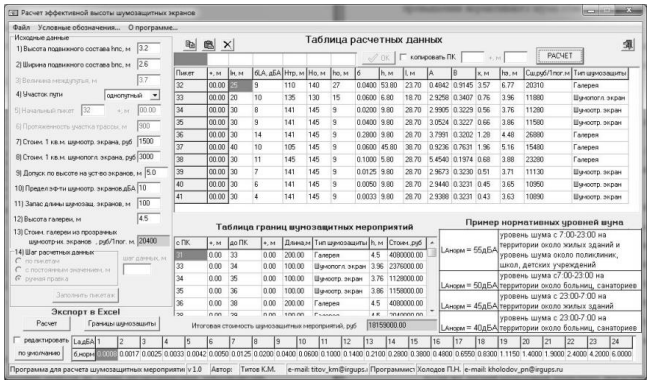


Рис. 4. Окно программы «Расчет эффективной высоты шумозащитных экранов»

В программу вводятся исходные данные для участка ЛРТ:

1) *Общие данные*: размеры подвижного состава, м; начальный пикетаж; стоимость покупки и установки 1 м^2 шумопоглощающего и шумоотражающего экрана; допуск по высоте установки экранов (в случае его превышения предлагается установка галереи), м; предел эффективности шумоотражающих панелей, дБА; стоимость экрана, при которой выгоднее устроить галерею, руб; запас по длине шумозащитного мероприятия, м.

2) *Попикетные данные*: длина по нормали от защищаемого объекта к трассе, м; превышение предельно-допустимой нормы, дБА; высотные отметки защищаемого здания и трассы, м; высота защищаемого здания, м.

Результатом данной программы является подбор наиболее рационального устройства шумозащитных сооружений по условиям: высоты и стоимости шумозащиты, превышения нормативных значений шума.

Итоговые данные формируются в таблицу «Таблица границ шумозащитных мероприятий», в которой приводятся суммарные стоимости и границы различных типов шумозащиты.

Таким образом, методика расчета эффективной высоты экрана, изложенная в СНиП II-12-77 [3], была модернизирована для определения стоимости шумозащитных мероприятий на стадии вариантного проектирования легкого рельсового транспорта в пределах городской застройки с использованием ГИС-технологий.

При этом реализовано эффективное программное решение для автоматизации процесса предварительного выбора и расчета стоимости шумозащитных мероприятий при проектировании рельсового транспорта в городской среде.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СН 2.2.4/2.1.8.562-96 Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки // НИИ медицины труда РАН. – введ. 31.10.1996 г. – М.: Минздрав России, 1996. – 8 с.
2. Титов К.М. Критерий шума в проектировании легкого рельсового транспорта // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. Том 1: материалы межвузовской научно-практической конференции – Иркутск: в 2 т.: Изд-во ИрГУПС, 2009. – С. 420-423.
3. СНиП II-12-77. Защита от шума / Госстрой СССР: введ. 1 июля 1978г. – М.: 62 с.
4. Иванов Н.И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом // учебник. – М.: Университетская книга, Логос, 2008. – 424 с.
5. СНиП 2.05.09-90 Трамвайные и троллейбусные линии / Минжилкомхоз РСФСР: введ. 1 января 1991, взамен СНиП II-41-76 – М.: Госстрой СССР, 1991. – 57 с.

УДК 621.311: 621.331

Крюков Андрей Васильевич,
д. т. н., профессор ИрГУПС, and_kryukov@mail.ru
Алексеенко Владимир Александрович,
аспирант ИрГУПС, bezvoprosov03@mail.ru

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ В СИСТЕМАХ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

A.V. Kryukov, V.A. Alekseenko

RAISE OF EFFICIENCY OF ON-LINE CONTROL IN SYSTEMS OF THE TRACTION ELECTRIC-POWER SUPPLY

Аннотация. *Повышение эффективности функционирования энергодиспетчерских служб железных дорог возможно на основе использования современных технологий интеллектуализации, а также путем создания программно-аппаратного комплекса «Советчик энергодиспетчера», основное назначение которого состоит в выработке рекомендаций энергодиспетчеру по оперативному управлению СТЭ в сложных схемно-режимных ситуациях.*

Ключевые слова: *системы тягового электроснабжения, оперативное управление режимами, активно-адаптивные сети.*

Abstract. *Raise of efficiency of functioning of energy dispatching services of railways possiblle on the basis of use of modern production engineering of intellectualization, and also by creation of a hardware-software complex «The Energy Dispatcher Adviser» which basic purpose is in development of recommendations for the energy dispatcher on on-line EPS control in difficult circuit-regime situations.*

Keywords: systems of a traction electric-power supply, on-line regimes control, active-adaptive networks.

Введение

Увеличение объемов работ по реконструкции и ремонту оборудования систем тягового электроснабжения (СТЭ) магистральных железных дорог вызывает увеличение нагрузки на энергодиспетчеров и повышает вероятность ошибочных действий. Особенно это актуально для последних лет, что связано с дефицитом квалифицированных кадров. Современные компьютерные технологии позволяют реализовать новые методы работы энергодиспетчера, обеспечивающие повышение производительности его труда и безопасности эксплуатации СТЭ. Разработка новых технологий должна базироваться на исследовании работы энергодиспетчера, в том числе на основе статистических методов и математического моделирования. Главная тенденция при создании новых систем оперативного управления – значительное расширение функциональности. Необходимо создание и интеграция в единую систему подсистем поддержки и контроля действий энергодиспетчера, диагностики оборудования. Это позволит существенно повысить эффективность управления режимами работы СТЭ [1].

Второе направление повышения эффективности оперативного управления СТЭ состоит в использование современных технологий управления режимами электроэнергетических систем (ЭЭС), базирующихся на использовании активно-адаптивных и интеллектуальных электрических сетей [2…6].

Постановка задачи

Система тягового электроснабжения железной дороги переменного тока является сложным многорежимным динамическим объектом. Для эффективного управления таким объектом требуется создание комплекса развитых методов и средств. Одним из главных сегментов этого комплекса может быть программно-аппаратный комплекс «Советчик энергодиспетчера».

Назначение комплекса состоит в выработке рекомендаций энергодиспетчеру по оперативному управлению СТЭ в сложных схемно-режимных ситуациях. В дальнейшем, по мере накопления опыта интерактивного взаимодействия энергодиспетчера с программной системой, появится возможность разработки и реализации следующих дополнительных функций:

- формирование рекомендаций по опера-

тивному управлению на основе использования методов искусственного интеллекта;

• полная автоматизация ряда выделенных функций оперативного управления.

Глобальные цели создания комплекса «Советчик энергодиспетчера» состоят в следующем:

• бесперебойное электроснабжение тяги поездов, а также систем сигнализации, централизации и автоблокировки при соблюдении отраслевых и общеэнергетических норм по качеству электроэнергии;

• обеспечение нормативного качества электроэнергии (ЭЭ) на шинах питающего напряжения тяговых подстанций и в сетях районов электроснабжения (РЭС) нетяговых потребителей;

• минимально возможный уровень потерь электрической энергии в СТЭ и РЭС;

• допустимый уровень экологической безопасности в условиях влияния электромагнитных полей, создаваемых тяговыми сетями и технологическими линиями электропередачи;

• эффективное управление режимами СТЭ с учетом массы поездов, размеров движения и профиля пути;

• стабилизация уровней напряжения на токоприемниках электроподвижного состава.

Комплекс программ «Советчик энергодиспетчера». Структурная схема комплекса приведена на рис. 1.

Ниже приводится краткое описание основных блоков комплекса.

В блоке 1 происходит прием и обработка следующей информации:

• данные о местоположении электроподвижного состава (ЭПС), поступающие из системы глобального позиционирования;

• сфазированные по сигналам *GPS* измеренные режимные параметры на шинах высокого напряжения тяговых подстанций;

• измеренные параметры режима на шинах районных обмоток тяговых трансформаторов.

В блоке 2 выполняется формирование математической модели СТЭ в виде решетчатой схемы замещения [7] с использованием информации о положениях основных коммутационных аппаратов, влияющих на структуру СТЭ.

В блоке 3 осуществляется имитационное моделирование режима СТЭ по методике, описанной в работе [7].

Блоки 4 и 5 предназначены для выработки практических рекомендаций энергодиспетчеру по оперативному управлению в следующих случаях:

• при возникновении сложной схемно-режимной ситуации, связанной с аварийными отключениями важных элементов ЭЭС и СТЭ;

• в режиме консультационного диалога при обработке заявок на плановое отключение элементов СТЭ (блок 5).

В блоке 6 осуществляется текущая визуали-

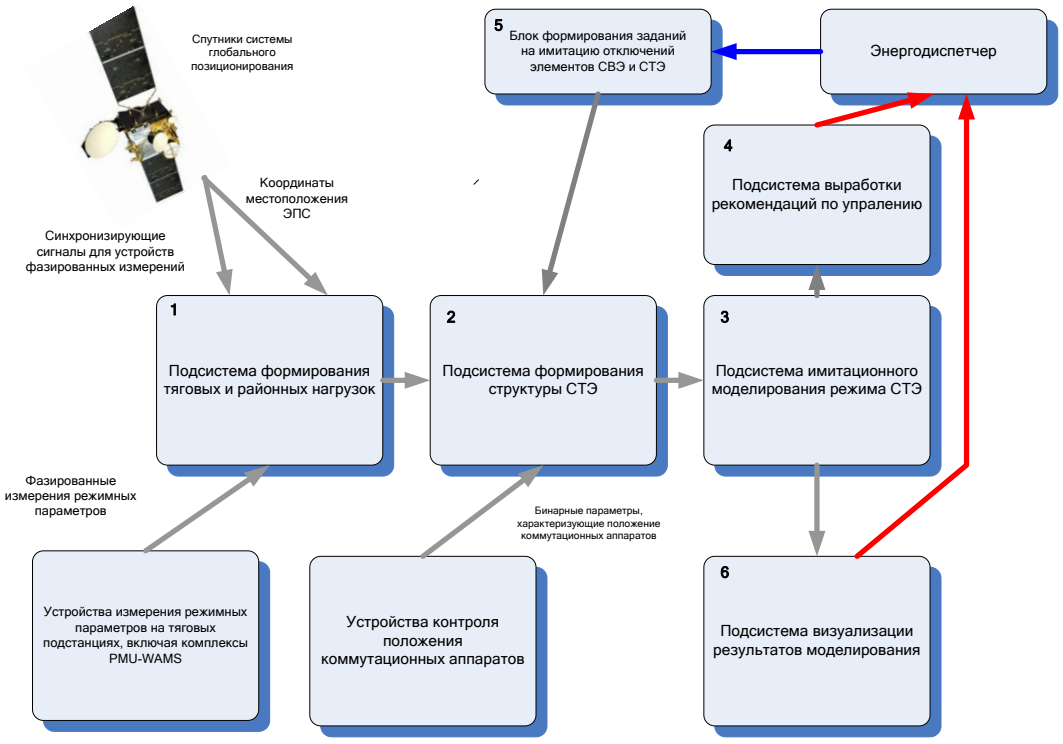


Рис. 1. Структурная схема комплекса «Советчик энергодиспетчера»

зация результатов моделирования с использованием удобных для диспетчера средств вывода графической и числовой информации.

Расширение возможностей оперативного управления на основе технологий интеллектуальных сетей

Существенное расширение возможностей оперативного управления может быть достигнуто на основе использования современных технологий, использующих принципы интеллектуализации электроэнергетических систем (ЭЭС). При высоких темпах развития экономики производство электроэнергии в России к 2030 году возрастет по сравнению с 2000 годом в два раза. Обеспечение таких уровней производства невозможно без системного решения следующих задач [2]:

- создание новой технологической основы энергетики;
- придание интегрирующей роли электрической сети;
- установка в сетях активных технических средств регулирования режимов ЭЭС и создание на их основе адаптивной системы управления;
- применение новых информационных технологий и быстродействующих вычислительных комплексов для оценки состояния и управления;
- повышение эффективности использования энергоресурсов и энергосбережение.

В итоге должен произойти выход электроэнергетики на новое качество управления и переход к интеллектуальной ЭЭС с активно–адаптивной сетью (ИЭСААС). ИЭСААС включает следующие сегменты [2, 3]:

- все виды источников электроэнергии, включая установки распределенной генерации (РГ);
- различные типы потребителей, принимающих непосредственное участие в регулировании качества электроэнергии (ЭЭ) и надежности ЭЭС;
- электрические сети разного напряжения и функционального назначения, имеющие возможность:

– изменения параметров и топологии по текущим режимным условиям;

– регулирования напряжения в узловых точках, обеспечивающего минимизацию потерь при соблюдении нормативных значений показателей качества электроэнергии;

– комплексного учета ЭЭ на границах раздела сети и на подстанциях;

- всережимную систему управления с полномасштабным информационным обеспечением.

Для создания ИЭСААС требуется разработка и внедрение нового оборудования и технологий [2, 3], представленных в табл. 1.

Кроме того, предусматривается включение в сеть накопителей ЭЭ, построенных на различных физических принципах, применение на подстанциях элегазового компактного оборудования. Также предполагается использовать компактные многоцепные ЛЭП высокой пропускной способности, смонтированные на многогранных металлических опорах. Эффективным средством повышения надежности будут служить комплексные системы диагностирования оборудования с выходом на мониторинг его жизненного цикла.

Таблица 1

Новое оборудование и технологии

В сфере генерации электроэнергии	В сфере передачи и распределения электроэнергии
Расширение возможностей регулирования мощности и напряжения на основе асинхронизированных генераторов. Обеспечение работы при изменении скорости вращения турбин. Создание условий включения на параллельную работу с ЭЭС всех видов нетрадиционных возобновляемых источников электроэнергии	Внедрение регулируемых элементов сети, обеспечивающие изменение: – величины напряжения с помощью управляемых шунтирующих реакторов, статических тиристорных компенсаторов, асинхронизированных неявнополюсных компенсаторов; – фазы напряжения на основе фазоповоротных устройств; – сопротивления участка сети путем использования ограничителей тока, в том числе выполненных на основе сверхпроводящих элементов, а также установок продольной компенсации; –передаваемой мощности с помощью вставок и электропередач постоянного тока

Таблица 2

Системы управления режимами и диагностирования оборудования

В сфере генерации электроэнергии	В сфере передачи и распределения электроэнергии	В сфере электропотребления
Системы АСУ, реализующие новое качество управления с расширенными возможностями взаимодействия с системами управления сетью и ЭЭС в целом. При этом для нетрадиционных источников управление осуществляется через специализированные технологические интерфейсы	Системы управления сетями предполагается строить по иерархическому принципу: – подстанция, ЛЭП; – район управления; – энергосегмент, т. е. ряд районов управления, объединяемых по принципам балансирования; – сеть в целом с взаимодействием с ЭЭС смежных государств	Внедрение комплексных систем измерений и учета, обеспечивающих согласованное управление электропотреблением в режиме *on-line*, с учетом ограничений по надежности и качеству электроэнергии

Функционирование ИЭСААС требует создания развитых информационно–коммуникационных и управляющих систем [2, 3], табл. 2. Управление ИЭСААС должно строиться с использованием следующих принципов:

- применение измерительных комплексов, максимально использующих цифровые принципы получения, обработки и передачи информации;
- создание всережимных *on-line* систем, оптимизирующих нормальные режимы ЭЭС, выявляющих недопустимые отклонения и включающих противоаварийную автоматику.

В последние годы широкое применение при производстве электроэнергии получают установки РГ, что приводит к изменению технологий управления передачей и распределением ЭЭ и структуры распределительных сетей. Возникающие при этом проблемы могут быть решены на основе создания интеллектуальных сетей smart grid, имеющих функции самодиагностики и автоматизированного принятия решений по управлению режимами [4]. Наиболее точное определение концепции smart grid дано в работе [5], в которой под smart grid понимается полностью саморегулируемая и самовосстанавливающаяся ЭЭС, имеющая сетевую топологию и включающая в себя следующие элементы:

- традиционные источники энергии, а также установки РГ, выполненные, в том числе, на базе нетрадиционных возобновляемых источников энергии (НВИЭ);
- электрические сети;
- все виды промышленных, транспортных и коммунально-бытовых потребителей ЭЭ.

Управление режимами работы такой сеть осуществляется на основе единой информационной сети в режиме реального времени.

В электрических сетях, питающих тяговые подстанции магистральных железных дорог, а также в системах тягового электроснабжения (СТЭ) в полном объеме проявляются перечисленные выше проблемы, решение которых возможно на основе технологий ИЭСААС и *smart grid.* Особую актуальность вопрос применения таких технологий приобретает в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке, где основная системообразующая электрическая сеть непосредственно связана с тяговыми подстанциями (ТП) железнодорожных магистралей [5]. В виду значительного объема резкопеременной, нелинейной и однофазной тяговой нагрузки показатели качества ЭЭ в этих сетях далеко выходят за допустимые пределы.

Структура интеллектуальной СТЭ (ИСТЭ) показана на рис. 2.

ИСТЭ включает следующие сегменты:

- развитые комплексы, обеспечивающие мониторинг состояния электрооборудования, включая устройства, работающие в режиме *on-line*;
- автоматические устройства управления, построенные на основе цифровых технологий;
- управляемые источники реактивной мощности, выполненные с использованием концепции FACTS[1];
- установки распределенной генерации и накопители электроэнергии;
- комплекс устройств для улучшения качества электроэнергии.

Реализация ИСТЭ позволит решить следующие важные практические задачи:

- обеспечение высокой надежности электроснабжения тяги поездов, а также нетяговых и нетранспортных потребителей;

[1] *Flexible alternative current transmission systems* – гибкие системы передачи энергии переменного тока.

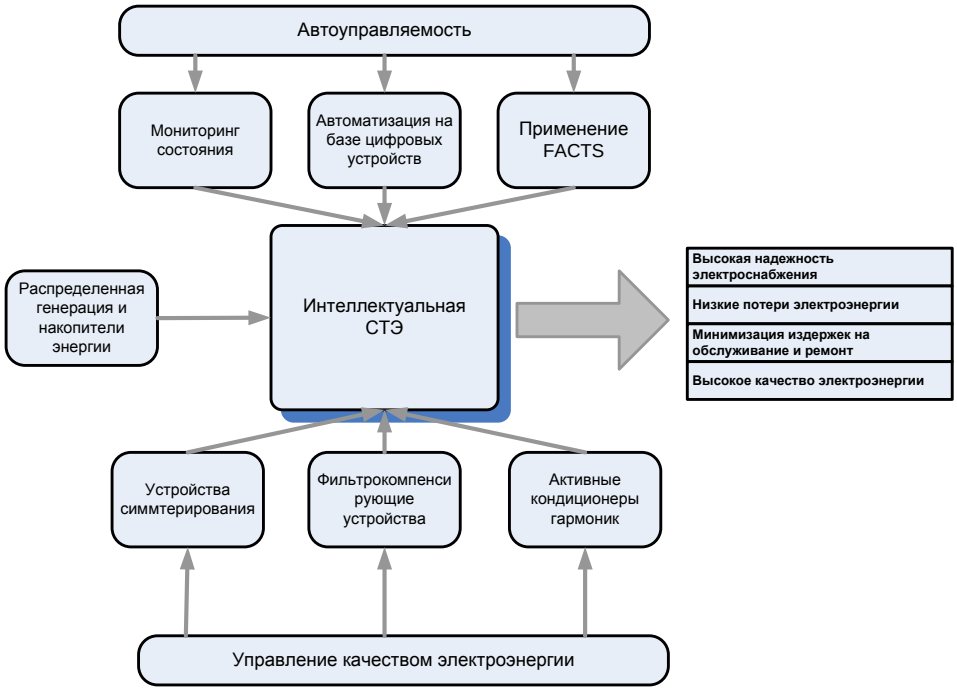


Рис. 3. Структура интеллектуальной СТЭ

• минимизация потерь электроэнергии, а также издержек на эксплуатацию СТЭ;

• улучшение качества электроэнергии в СТЭ, а также на границах раздела с питающей энергосистемой.

Выводы

1. Повышение эффективности функционирования энергодиспетчерской службы возможно на основе создания программно-аппаратного комплекса «Советчик энергодиспетчера». Назначение комплекса состоит в выработке рекомендаций энергодиспетчеру по оперативному управлению СТЭ в сложных схемно-режимных ситуациях. На основе комплекса возможен полномасштабный учет ограничений технического, экономического и экологического характера при оперативном управлении режимами систем тягового электроснабжения.

2. Применение прогрессивных средств управления режимами СТЭ позволит существенно расширить возможности энергодиспетчера по воздействию на режимы СТЭ для повышения энергоэффективности и качества электроэнергии.

3. В основу вычислительного ядра комплекса «Советчик энергодиспетчера» может быть положена методика имитационного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока, которая базируется на использовании фазных координат и полносвязанных графовых моделей элементов СТЭ.

4. Проблемы улучшения качества электроэнергии и повышения энергоэффективности в электротяговых сетях могут быть решены на основе использования технологий активно-адаптивных сетей и *smart grid* путем создания интеллектуальных систем тягового электроснабжения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сиромаха В.Н. Автоматизация диспетчерского управления электроснабжением железнодорожного транспорта: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М.: МИИТ, 2009. 24 с.
2. Дорофеев В.В. «Умные» сети в электроэнергетике. –*URL: http: //www.energyland.info / analitic–show*–45305. дата обращения 13.09.2011.
3. Дорофеев В.В., Макаров А.А. Активно–адаптивная сеть –новое качество ЕЭС России // Энергоэксперт. – № 4. – 2009. – С. 29–34.
4. Кобец Б.Б., Волкова И.О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции smart grid. – М.: ИАЦ, 2010. – 208 с.
5. Smart Power Grids –Talking about Revolution. IEEE Emerging Technology Portal, 2000.
6. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Abramov N.A. Electro Energetic Technological Control in East Siberia Railway // Energy of Russia in XXI century: Development strategy – Eastern vector. – CD–ROM PROCEEDINGS. – S3–10.
7. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Иркут. ун–т. 2005. 273 с.

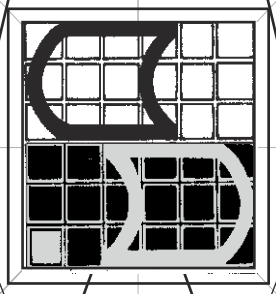
Министерство образования и науки Российской Федерации
Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта

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

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование



Раздел 3.

Системный анализ. 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 656.212.5

Котельников Сергей Сергеевич,
аспирант каф. управления эксплуатационной работой (УЭР)
Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС),
тел. 8 (914) 9521-566, e-mail: Ori-Gami@yandex.ru
Иванкова Людмила Николаевна,
к. т. н, доцент, тел. 8 (914)8934-321, e-mail: ivankovaln@yandex.ru
Иванков Алексей Николаевич,
к. т. н., доцент каф. УЭР ИрГУПС, тел. 8-914-8939-774, e-mail: aivankov@mail.ru

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ТЕХНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ РАЗВИТИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ СТАНЦИЙ

S.S. Kotelnikov, L.N. Ivankova, A.N. Ivankov

AUTOMATED SELECTION OF THE PARAMETERS OF TECHNICAL AND TECHNOLOGICAL STRUCTURE OF THE INDUSTRIAL RAILWAY STATION

Аннотация. *На основе разработанной имитационной модели функционирования промышленных железнодорожных станций определены капитальные и эксплуатационные расходы при различных вариантах работы. Предложена оптимальная схема развития промышленной железнодорожной станции в течение расчетного периода.*

Ключевые слова: *промышленные железнодорожные станции, задержки подвижного состава, имитационная модель работы станций, схема этапного развития станций.*

Abstract. *On the basis of the developed simulating model of functioning division terminals interoperational idle times and capacity of traveling development and necessary staff of workers of the point of maintenance car service for development of the set volume car flows are defined. The technique of a choice of rational parameters of technological process of work of division terminals and classification yards is offered. On the basis of the developed simulating model of functioning industrial terminals capital and operating costs of different options are defined. The optimum scheme of development of industrial railway station during the settlement period is offered.*

Keywords: *industrial terminals, industrial railway station, rolling stock delays, simulation model of the railway station.*

В транспортной системе России железные дороги занимают ведущее место, и с каждым годом объемы перевозок грузов увеличиваются. В последние годы для улучшения работы станций была принята «Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года». Одной из главных задач, требующих решения, обозначено снижение совокупных транспортных издержек. Эти расходы могут быть сокращены при помощи оптимизации соотношения штата работников и технического оснащения железнодорожных станций.

В данной статье рассмотрен вариант определения оптимальной схемы этапного развития существующей промышленной станции. Техническое оснащение станции включает парк приема из 7 путей для обработки прибывающих грузовых поездов, сортировочный парк из 10 путей и парк отправления из 6 путей для обработки отправляющихся грузовых поездов. В парке приема одновременно работает 2 бригады ПТО, в парке отправления – одна. На станции работает один горочный локомотив.

Для определения оптимальной схемы этапного развития применялась разработанная авторами имитационная модель работы технических станций с возможностью изменения параметров потока поездов, характеристик параметров обслуживания, количества горочных локомотивов и путей в приемоотправочном парке [1]. На основе метода планирования машинного эксперимента были составлены уравнения регрессий, отображающие простои грузовых поездов (формулы 1–3).

Полиномы третьей степени, отображающие простои грузовых поездов в парке приема промышленной станции по причине занятости бригад ПТО, при доле поездов, поступающих

в расформирование, равной 30 %, имеют следующий вид:

$$Y_{1ПТО} = 413,90 + 315,80 \cdot x_1 + 46,80 \cdot x_2 + \\ +13,90 \cdot x_3 + 28,10 \cdot x_1 x_2 + 13,90 \cdot x_1 x_3 + \\ +3,30 \cdot x_2 x_3 + 3,30 \cdot x_1 x_2 x_3, \quad (1)$$

$$Y_{2ПТО} = 313,53 + 285,23 \cdot x_1 + 42,38 \cdot x_2 + \\ +66,73 \cdot x_3 + 40,68 \cdot x_1 x_2 + 66,73 \cdot x_1 x_3 + \\ +12,48 \cdot x_2 x_3 + 12,48 \cdot x_1 x_2 x_3, \quad (2)$$

$$Y_{3ПТО} = 192,80 + 189,03 \cdot x_1 + 27,13 \cdot x_2 + \\ +103,92 \cdot x_3 + 26,70 \cdot x_1 x_2 + 103,92 \cdot x_1 x_3 + \\ +20,08 \cdot x_2 x_3 + 20,08 \cdot x_1 x_2 x_3. \quad (3)$$

Здесь $Y_{1ПТО}$ – время простоя грузовых поездов при 1 работающей бригаде ПТО; $Y_{2ПТО}$ – время простоя грузовых поездов при 2 работающих бригадах ПТО; $Y_{3ПТО}$ – время простоя грузовых поездов при 3 работающих бригадах ПТО; x_1 – количество прибывающих поездов в сутки; x_2 – соотношение категорий грузовых поездов; x_3 – количество приемо-отправочных путей.

Кодированные значения факторов рассчитаны для различного количества бригад ПТО в отдельности, поскольку максимальные и минимальные значения факторов варьируются по-разному (формулы 4–12).

Значения кодированных факторов при одновременной работе 1 бригады ПТО в парке приема промышленной станции при доле поездов, поступающих в расформирование, равной 30 %:

$$x_1 = \frac{2 \cdot X_1 - 28}{10} = 0,2 \cdot X_1 - 2,8, \quad (4)$$

$$x_2 = \frac{2 \cdot X_2 - 70}{30} = 0,0667 \cdot X_2 - 2,3333, \quad (5)$$

$$x_2 = \frac{2 \cdot X_3 - 10}{2} = X_2 - 5,0, \quad (6)$$

Значения кодированных факторов при одновременной работе 2 бригад ПТО в парке приема промышленной станции при доле поездов, поступающих в расформирование, равной 30 %:

$$x_1 = \frac{2 \cdot X_1 - 53}{23} = 0,087 \cdot X_1 - 2,3043, \quad (7)$$

$$x_2 = \frac{2 \cdot X_2 - 70}{30} = 0,0667 \cdot X_2 - 2,3333, \quad (8)$$

$$x_2 = \frac{2 \cdot X_3 - 12}{4} = 0,5 \cdot X_2 - 3,0, \quad (9)$$

Значения кодированных факторов при одновременной работе 3 бригад ПТО в парке приема промышленной станции при доле поездов, поступающих в расформирование, равной 30 %:

$$x_1 = \frac{2 \cdot X_1 - 77}{35} = 0,0571 \cdot X_1 - 2,2, \quad (10)$$

$$x_2 = \frac{2 \cdot X_2 - 70}{30} = 0,0667 \cdot X_2 - 2,3333, \quad (11)$$

$$x_2 = \frac{2 \cdot X_3 - 12}{4} = 0,5 \cdot X_2 - 3,0, \quad (12)$$

Анализ полученных формул позволил установить меру влияния каждого из факторов на параметр оптимизации. При этом в большей мере на задержку грузовых поездов оказывает фактор x_1 – количество прибывающих поездов в сутки. Факторы x_2 и x_3 меняют свою значимость при различном количестве одновременно работающих бригад ПТО. При 3 одновременно работающих бригадах ПТО значимость фактора x_3, количество приемо-отправочных путей, превосходит значимость фактора x_2, соотношение категорий грузовых поездов.

Выбор наилучшего варианта, обеспечивающего получение минимальной суммой приведенных строительных и эксплуатационных расходов и позволяющего учесть целочисленный характер большинства переменных, нелинейность целевой функции и имеющиеся ограничения оптимально осуществлять с использованием динамического программирования.

Для определения наилучшего варианта развития рассмотренной промышленной станции приняты следующие варианты изменений:

1 – Станция работает без изменений.

2 – Ввод дополнительной бригады ПТО.

3 – Строительство одного приемо-отправочного пути и ввод дополнительной бригады ПТО.

4 – Строительство двух приемо-отправочных путей и ввод дополнительной бригады ПТО.

5 – Строительство трех приемо-отправочных путей и ввод дополнительной бригады ПТО.

В общем виде определение оптимальной схемы этапного развития станции допустимо представить при помощи критерия максимума чистого дисконтированнного дохода [2].

$$ЧДД = \sum_0^t \frac{(R_t - З_t)}{(1+r)^t} \quad (13)$$

Здесь R_t – прибыль от проведения реконструктивных мероприятий, получаемая на i-м шаге расчета (в качестве прибыли рассматривается экономия эксплуатационных расходов от сокращения задержек грузовых поездов под обгонами и снижение энергетических расходов по разгону и замедлению поездов); $З_t$ – сумма эксплуатационных расходов и капитальных затрат на i-м шаге расчета; r – ставка дисконта; t – расчетный временной период.

В данной статье принята величина процентной (дисконтной) ставки, равной 12 % и произведены соответствующие расчеты.

Совокупность единовременных затрат, направленных на реконструкцию станции, представляет собой инвестиции в постоянные устройства.

Размер инвестиций на реконструкцию зависит от капитальных затрат на отдельные работы, связанные с переустройством станции. С учетом предложенных мероприятий капитальные расходы будут определяться по формуле:

$$\sum K^{стр.пути} = K_{укл}^{стр.пер} + K_{укл}^{пути} + \\ + K_{св} + K_{дем} + K_{каб} + K_{кс} + K_{зем}. \quad (14)$$

Здесь $K_{укл}^{стр.пер}$ – стоимость укладки дополнительных или переноса имеющихся стрелочных переводов, тыс. руб.; $K_{укл}^{пути}$ – стоимость укладки дополнительных путей, тыс. руб.; $K_{сиг}$ – затраты на установку дополнительных сигналов на станции, тыс. руб.; $K_{каб}$ – затраты на укладку кабеля, тыс. руб.; $K_{кс}$ – стоимость работ, связанных с устройством контактной сети, тыс. руб.; $K_{дем}$ – стоимость демонтажа путей, тыс. руб.; $K_{зем}$ – затраты на земляные работы, тыс. руб.

В общем виде годовые эксплуатационные расходы при изменении работы станции рассчитываются по формуле

$$\sum Э = Э_{пу} + Э_{задер.} + Э_{ФОТ} + Э_{доп.лок}. \quad (15)$$

Здесь $Э_{пу}$ – эксплуатационные расходы на содержание и эксплуатацию постоянных устройств; $Э_{задерж}$ – расходы, связанные с задержкой и простоем поездов и вагонов; $Э_{ФОТ}$ – эксплуатационные расходы на фонд оплаты труда дополнительной бригады ПТО; $Э_{доп.лок}$ – эксплуатационные расходы на содержание дополнительного горочного локомотива.

В проектных организациях при составлении сметной стоимости реконструкции станций годовые эксплуатационные расходы на содержание постоянных устройств принимаются в размере 10 % от капитальных вложений.

Для определения оптимальной схемы этапного развития станции в течение расчетного периода строится график возможных переходов от одного варианта технического состояния станции к другому с использованием принципа оптимальности Беллмана. Сущность этого принципа сводится к тому, что каким бы путем система не пришла в данное состояние, дальнейшее ее движение должно быть оптимальным [3].

В данной работе расчетным периодом приняты 10 лет, а отдельным шагом – один год. Темп роста объемов поступающих грузовых поездов принят в размере 13 % от исходного значения и сохраняется в течение всего периода.

На рис. 1 представлен график возможных переходов технического состояния. На графике на горизонтальных и наклонных линиях проставляют в соответствующие годы расчетного периода суммы приведенных затрат, рассчитанные по формуле (13).

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что если в течение расчетного периода на станции не будут осуществлены мероприятия по изменению технического состояния, то эксплуатационные расходы составят 142,83 млн руб. После определения оптимальной схемы этапного развития станции была получена минимальная сумма приведенных затрат в размере 127,64 млн руб. Таким образом, экономический эффект от предложенных изменений составит 15,188 млн руб.

На основе анализа загрузки бригад ПТО при обработке грузовых поездов установлено, что положительный экономический эффект от ввода дополнительной бригады ПТО в приемо-отправочном парке может быть достигнут при загрузке существующих бригад ПТО более чем на 76 %. При условии, что общее количество обрабатываемых грузовых поездов в сутки превышает 25, экономия может составить более 0,5 млн руб. в год.

Выявлено, что загрузка спускной части горки и горочного локомотива более чем на 68 % приводит к существенным задержкам переработки грузовых поездов. Для ликвидации задержек поездов на подходах необходимо предусматривать увеличение перерабатывающей способности горки с соответствующим усилением путевого развития сортировочного парка; добавление же путей только в парке приема при неизменном техническом оснащении горки хотя и сокращает задержки на подходах, однако примерно на столько же увеличивает простои вагонов в ожидании расформирования.

Анализ проведенных расчетов позволил установить, что уменьшение или увеличение процентной (дисконтной) ставки на 2 % сдвигает сроки ввода нового технического состояния на 1–2 года. Данное условие приводит к изменению ожидаемого экономического эффекта в конце расчетного периода более чем на 25 %.

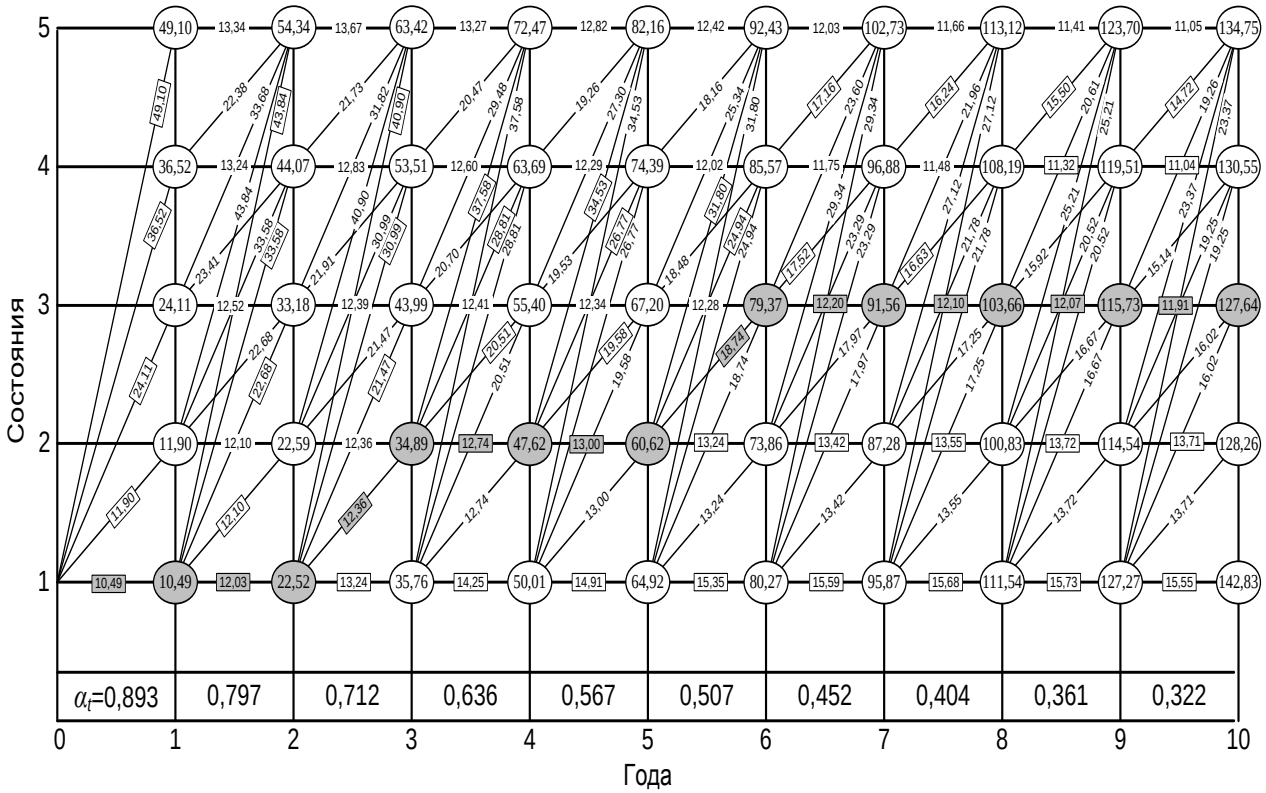


Рис. 1. График переходов технических состояний

Разработанная схема этапного развития станции позволила установить, что при загрузке бригад ПТО более 70 % непроизводительные простои грузовых поездов по причине занятости бригад ПТО вызывают от 26 % до 38 % общей загрузки приемо-отправочных путей. При этом фактическое занятие приемо-отправочных путей грузовыми поездами, обрабатываемыми бригадами ПТО, составит около 52 %. Данное условие необходимо учитывать при определении потребного числа приемо-отправочных путей.

Отступление от вышеприведенных рекомендаций может быть обусловлено значительными затратами на реконструкцию по местным условиям (здания, искусственные сооружения и т. д.).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Котельников С.С. Имитационное моделирование работы станций // Современные проблемы транспортного комплекса России: межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск : Изд-во Магнитогорск. сос. техн. унт-та им. Г.И. Носова, 2011. – С. 82–86.
2. Косов, В.В. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов / В.В. Косов, В.Н. Лившиц, А.Г. Шахназаров. – М. : Экономика, 2000. – 421 с.
3. Беллман Р. Динамическое программирование / пер. с англ. И.М. Андреевой, А.А. Корбута, А.В. Романовского, под ред. Н.Н. Воробьева. – М. : Издательство иностранной литературы, 1960. – 401 с.

УДК 332

Фрейдман Оксана Анатольевна,
к. э. н., доцент кафедры менеджмента, Иркутский государственный университет путей сообщения
тел.: 89149255021, e-mail: oksasna-frey@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ РИСКОВ В СИСТЕМЕ ЛОГИСТИЧЕСКОГО МЕНЕДЖМЕНТА РЕГИОНА

O. A. Freidman

RISK'S STUDY OF THE REGIONAL LOGISTICS MANAGEMENT SYSTEM

Аннотация. *Рассматривается классификация рисков в системе логистического менеджмента региона, а также рисков в логистической интегрированной цепи поставок. Анализируются подходы к исследованию рисков в рамках территориальных логистических систем. Предлагается методика расчета уровня и значимости рисков в логистической системе региона.*

Ключевые слова: *риск-менеджмент, логистический менеджмент риск, логистический риск.*

Abstract. *We consider the risk classification system and logistic management of the region as well as risks in the integrated supply chain. Approaches to the study of risk within the territorial logistics systems are examinated. A method of calculating of the level and significance of risk in the logistic system of the region is given.*

Keywords: *risk management, risk management logistics, logistics risk*

Теория логистического менеджмента предусматривает рассмотрение вопросов о снижении логистических рисков в процессе принятия решений, связанных с функционированием транспортно-логистических систем в регионе. Под риск-менеджментом понимают систему управления организацией, предприятием, которая ставит своей целью снижение риска, предотвращение недопустимого риска; представляет органичную часть финансового менеджмента. Риск-менеджмент – это комплекс мер, направленный на минимизацию возможных убытков, которые может понести бизнес в связи с наступлением негативных событий.

Риски являются неотъемлемым элементом экономической, политической и социальной деятельности в условиях рыночной системы хозяйствования.

Существует ряд неопределенностей, проявляющихся в процессе формирования и развития деятельности субъектов рынка в интегрированных цепях поставок. Данные неопределенности являются фоновой средой существования риска. По этой причине наибольшее внимание требуется уделить факторам среды, в которой возникают риски, и управлять именно этими факторами.

Вопрос управления рисками в логистике уже достаточно рассматривался в трудах как отечественных, так и зарубежных ученых и специалистов. Однако чаще всего это касалось закрытых региональных (или городских) систем, отдельных производственных или транспортных предприятий. В соответствии с ситуацией менялся уровень влияния различных факторов среды, состав самих рисков и, соответственно, методы их измерения. Существующая система отечественного риск-менеджмента в логистике на настоящий момент не удовлетворяет требованиям систем управления регионом, так как зачастую сводится только к страхованию рисков, а не к предупреждению рисковых ситуаций. По мнению Константина Стерлигова: «Перед логистическими менеджерами звеньев ставится задача увеличить эту прибыль и сократить издержки. При этом вопросы управления рисками, как правило, выводятся из поля концентрации внимания деятельности логистов и менеджеров до момента наступления рискового события, затраты на устранение которого соизмеримы с прибылью за определенный значимый период» [3].

Вопрос обнаружения рисковой ситуации связан с прогнозированием наступления рискового события, поэтому необходимо выявить особенности процесса исследования рисков в логистических цепях поставок и рисков логистического менеджмента. Оба вопроса связаны с процессом организации исследования логистических рисков, процедурой их обнаружения, определения уровня риска. Разделение данных направлений исследования рисков обусловлено следующими факторами:

1. Система логистического менеджмента региона представляет собой совокупность элементов, их взаимосвязей и процессов, направленных на оптимизацию материальных информационных и финансовых потоков внутри региона. Следова-

тельно, изучение рисковых ситуаций связано с определением зон неопределенности относительно выполнения логистических операций (закупка, внутрипроизводственное перемещение, распределение, транспортирование, складирование), осуществляемых на территории города или области. Необходима оценка риска по каждому виду операции и исследование вероятности наступления рискового события.

2. Исследование рисков в логистических цепях поставок необходимо в связи с включением регионов в систему межрегионального обмена. Оценка рисковых последствий направлена на измерение отрицательного и положительного исхода события, поэтому изучение риска ведется с учетом определения вероятности положительного и отрицательного исходов.

3. Исследование рисков в логистических цепях поставок проводится в направлении анализа только тех цепей, которые связаны с функционированием логистической системы региона, то есть образуют единую процессную сферу.

Предполагается, что исследования, связанные с рисками, являются одной из составляющих частей комплексного исследования логистических систем региона. Следовательно, методы анализа избираются в соответствии с существующими региональными проблемами и профилем региона. Исследования иркутских ученых начала 90-х годов [4, с. 99] показали, что для территорий Сибири характерны следующие общие проблемы развития, определяющие необходимость анализа с точки зрения риск-менеджмента:

- условия и факторы организации снабжения регионов;
- уровень обеспеченности социальной инфраструктурой;
- уровень обеспеченности трудовыми ресурсами в промышленной сфере регионов;
- дифференциация доходов в различных отраслевых сферах промышленности.

Наличие в городах и регионах успешно развивающихся отраслевых предприятий определяет развитие транспортной и складской инфраструктуры, что позволяет снижать управленческие риски на первоначальном этапе создания логистических систем. Регион становится либо территорией-импортером, конечным звеном поставок, либо преимущественным экспортером. В этом случае исследование рисков направлено на обеспечение устойчивого функционирования внутрирегиональной логистической системы.

В случае отсутствия крупных добывающих или перерабатывающих предприятий, регион (город) становится транзитным по отношению к другим территориям, что также является фактором использования территории как перевалочной базы распределения в цепи поставок.

Одним из методов эффективного управления логистическими процессами в регионе является риск-менеджмент. Присутствие методов риск-менеджмента в управлении логистическими процессами и системами связано с необходимостью измерения рисков в инвестиционных проектах, ориентированных на рост логистического потенциала. Другая сфера приложения методов риск-менеджмента – это управление качеством логистических процессов в регионе. Таким образом, в основе выбора методов управления риском лежит классификация объектов управления. В качестве объектов управления обычно выступают:

– инвестиции в объекты логистической инфраструктуры;
– логистические операции;
– качество логистических операций и процессов.

Каждый объект требует отдельной классификации и специфичных методов расчета.

Инвестирование объектов логистической ифраструктуры связано с проведением расчетов в двух направлениях: расчетом дисконтированной стоимости инвестиций и расчетом риска потерь. В то же время риск возможных потерь рассчитывается в направлении финансового и логистического риска. Если первый тип риска имеет монетарную природу, то содержание второго требует уточнения.

Под *логистическим риском понимается размер ущерба, определенный с учетом вероятности наступления рискового события, возникший по причине нарушения условий осуществления логистических операций.*

Логистический риск в типологии рисков является разновидностью коммерческого риска. Однако для обеспечения эффективного управления риском необходимо различать зоны возникновения данного вида риска, так как в региональной системе и цепи поставок материальных ресурсов они дифференцированы. Классификация зон риска изображена на рис. 1.

Из представленной классификации видно, что каждый вид риска требует особой методики оценки. В частности, определить уровень управленческих рисков, возникающих в системе логистического обеспечения региона, сложнее, так как расчет ущерба необходимо вести с учетом экономических социальных потерь, обосновывать величину упущенной выгоды и значимости этой выгоды для региона. Поэтому расчет управленческих рисков в логистической системе должен быть проведен на основе качественных методов оценки

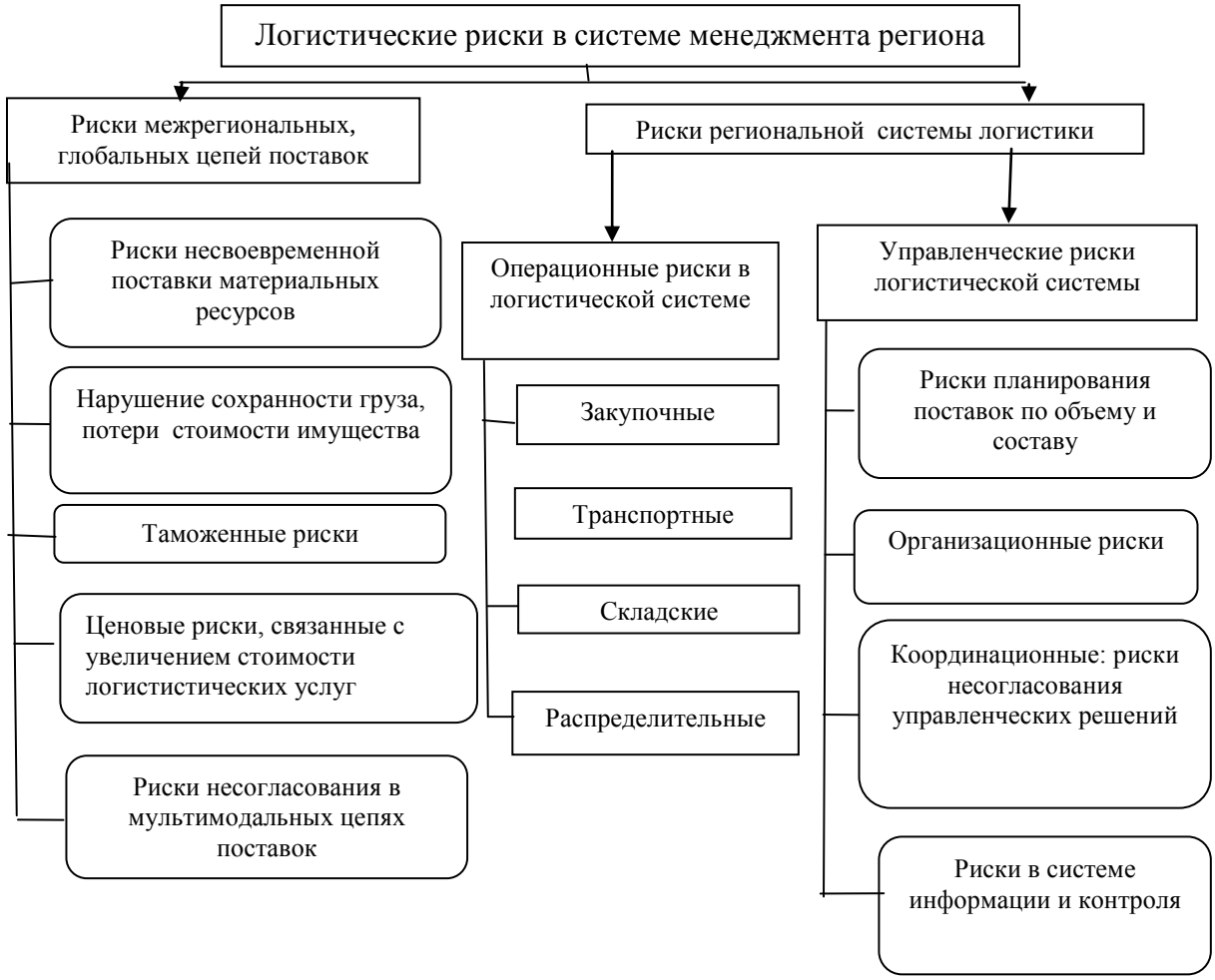


Рис. 1. Риски в системе логистического менеджмента региона (О.А. Фрейдман)

принятия управленческих решений, к которым могут быть отнесены:

- методы оптимистической и пессимистической оценки уровня риска;
- косвенная оценка уровня риска при внедрении проектов в области логистики (включающая расчет точки безубыточности проекта);
- оценка рисков альтернативных решений с помощью математико-статистических показателей (математическое ожидание, коэффициент вариации, мера риска [1, с. 193] и др.

Классификация и дальнейшее применение методов страхования и лимитирования рисков зависит от вида логистической операции. Рассмотрение существовавшей ранее таблицы соответствия видов риска способам его страхования [3] приводит к идее совершенствования методов расчета величины риска, который позволяет его лимитировать или страховать. Представленная ниже адаптированная таблица расчета и страхования рисков сформирована по принципу деления рисков по подсистемам логистики на уровне управления регионом.

Следуя базовой формуле исчисления меры риска:

$$M_p=\sum X_i * P_i, \quad (5)$$

где M_p – мера риска как математическое ожидание потерь;

X_i – размер потерь в ходе i-го наблюдения;

P_i – вероятность возникновения потерь [1],

необходимо определить вероятность наступления рискового события, а также определить значимость данного риска в системе.

Таким образом, формула примет вид:

$$M_p=\sum X_i * P_i * V_{ij}, \quad (6)$$

где V_{ij} – значимость риска по виду риска – i, с учетом зоны рисковой ситуации – j.

Для расчета вероятности рисковых ситуаций предполагается использовать методы экстраполяции, так как во множестве региональных систем использование или производство материальных ресурсов имеет цикличный характер, а следовательно, логистические процессы также цикличны, и количество рисковых ситуаций будет повторяться.

Таблица 1

Направления и способы оценки рисков по видам логистических операций в логистической системе региона

Вид операции	Содержание риска	Расчет величины ущерба от возникновения рисковой ситуации
1. Закупки	Риск увеличения затрат в связи с закупкой материалов и ресурсов	Рассчитываются потери, связанные с удорожанием ресурса или его заменой: $RL_з = \sum_{i=1,n} (Ц_{пi} - Ц_{фi})\, N_i * \Delta Q_i$, (1) где $Ц_{пi}, Ц_{фi}$ – соответственно плановые и фактические цены закупки материалов; N_i – норма расхода материала на каждый вид продукции или услуг; ΔQ_i – изменение количества выпуска продукции, связанное с заменой материала или изменением цены
2. Транспортировка	Нарушение графика поставок, рост транспортных издержек, утрата имущества в пути	Расчет потерь от недополучения прибыли в связи с несвоевременным поступлением материалов по видам причин: - в связи с нарушением графика поставок: $RL_г = \sum_{i=1,n} (П_{пi} - П_{фi}) + \Delta Q_i$, (2) где $П_{пi}, П_{фi}$ – потери прибыли транспортных организаций, разница между плановой и фактической прибылью; ΔQ_i – количество недопоставленной продукции, связанное с нарушением графика поставок (в руб.); - в связи с увеличением транспортных издержек: $RL_т = \sum_{i=1,n} \Delta Ц_i * T_i + \Delta Q_i$, (3) где $\Delta Ц_i$ – изменение величины транспортных расходов на i-м маршруте (руб., в расчете на 1 км маршрута); T_i – длина маршрута (в км); ΔQ_i – количество недопоставленной продукции, связанное с увеличением затрат (в стоимостном показателе), разница между плановым и показателем поставок (в руб.)
3. Складирование и хранение	Утрата или порча имущества	Величина утраты определяется на основе эмпирического опыта и статистических методов, на базе средней величины потерь и соответствует норме потерь. Расчет нормы потерь также может осуществляться на основе правила «трех сигм» [1]
4. Материально-техническое обеспечение объектов муниципального управления (распределение)	Потери, возникающие вследствие дефицита и недопоставки материальных ресурсов. Наличие сверхнормативных запасов и их ликвидности	Производится расчет потерь от недопоставки материальных ресурсов или их несоответствия первоначально планируемым [Лифшиц, с. 112]: $R_{мто} = (\sum B_i * H_j - Q_j) + \Delta П_j$, (4) где B_i – плановый объем ресурса (в нат. ед.); H_j – затраты на единицу ресурса (в руб.); Q_j – фактическое наличие ресурсов (в руб.); $\Delta П_j$ – величина потерь, возникшая по причине дефицитности или избыточности ресурсов.

Далее, на основе методов экспертных оценок, по каждому виду риска должна быть составлена таблица оценок значимости и определен средний балл значимости, например [2].

Параметры оценки могут быть основаны и на другой балльной шкале, важен принцип распределения значимости каждого риска внутри одной рисковой зоны. Оценка проводится на основе понимания уровня последствий и величины причиняемого ущерба. Однако, прежде чем проводить опрос экспертов, необходимо собрать аналитическую информацию о вероятности возникновения рисков в системе и величине потерь по каждому направлению. Предоставление такой информации экспертам обязательно для повышения объективности оценки значимости риска, только в этом случае дальнейшая оценка рисков будет валидной. По каждой зоне следует провести расчет общего уровня риска путем суммирования показателей по всем видам рисковой ситуации. Таким образом,

Таблица 2

Показатели оценки значимости риска

Сферы рисковых ситуаций	Виды рисков				Суммарный балл
	Несвоевременная доставка	Утрата имущества	Недопоставка материальных ресурсов	Рост транспортных тарифов	
1. Закупки	0,6	0,2	0,2	–	1
2. Транспортировка	0,2	0,4	–	0,6	1
3. Складирование и хранение	0,3	05	0,2	–	1
4. Материально-техническое обеспечение (распределение)	0,4	0,4	0,2	0,2	1

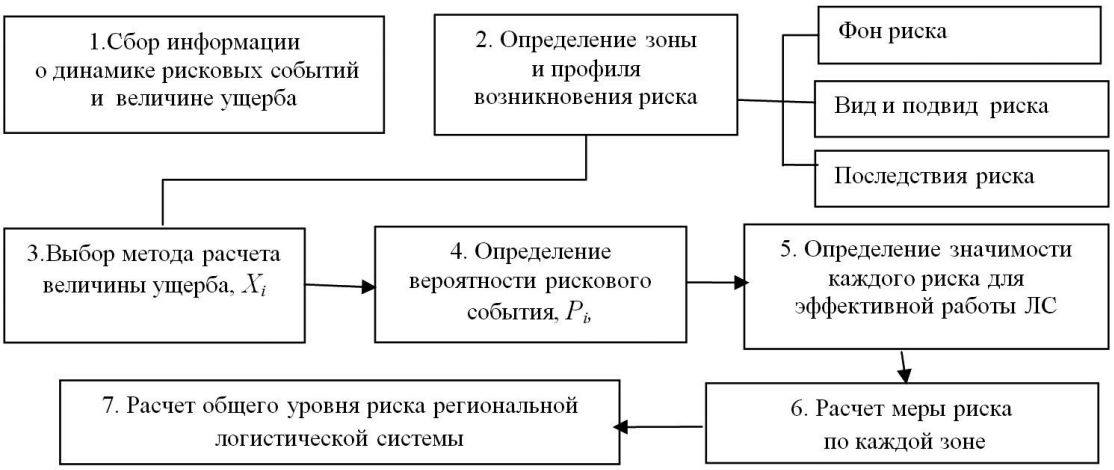


Рис. 2. Последовательность исследования рисков в логистической системе региона

последовательность исследования рисков в логистической системе менеджмента региона будет выглядеть следующим образом (рис. 2).

Поскольку алгоритм исследования рисков включает анализ его фона (управляемых и неуправляемых факторов), то ключевым моментом исследования является определение профиля риска, что позволяет избежать ошибок управленческого характера.

Представленная последовательность действий создает базовые условия для определения вероятности и вида рискового события на раннем этапе анализа, что дает возможность осуществить корректирующие действия в системе управления, то есть лимитировать риск путем влияния на управляемые факторы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лифшиц А.С. Управленческие решения учебное пособие / А.С.Лифщиц. – М. : КНОРУС, 2009. –248 с.
2. Круминьш Н., Витолиньш К., Логистика в Восточной Европе: справочник по управлению системами логистики в Восточной Европе/ Н. Круминьш, К. Витолиньш. Республика Латвия, 2007.
3. Стерлигов К., Механизмы управления рисками в логистике www.logistpro.ru.
4. Якобсон А.Я., Территориальная организация региональной политики. – Новосибирск: ИЭ и ОПП СО РАН, 1994. – 183 с.

УДК 621.822.6-192; 62-233.2

Вавилов Денис Владимирович,
к. т. н., старший преподаватель кафедры «Проектирование и экспериментальная механика машин» Политехнического института Сибирского федерального университета, тел. (391) 249-70-71, e-mail: Exceptme@yandex.ru
Ереско Сергей Павлович,
д. т. н., профессор кафедры «Проектирование и экспериментальная механика машин» Политехнического института Сибирского федерального университета, тел. (391) 249-82-09, e-mail: eresko07@mail.ru
Иптышев Андрей Анатольевич,
к. т. н., доцент кафедры «Проектирование и экспериментальная механика машин» Политехнического института Сибирского федерального университета, тел. (391) 249-70-71, e-mail: Exceptme@yandex.ru
Усаков Владимир Иосифович,
д. т. н., профессор кафедры «Проектирование и экспериментальная механика машин» Политехнического института Сибирского федерального университета, тел. (391) 249-75-55, e-mail: usakovvl@mail.ru

МЕТОДОЛОГИЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ С НОРМИРОВАНИЕМ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТОЧНОСТИ

D.V. Vavilov, S.P. Eresko, A.A. Iptyshev, V.I. Usakov

METODOLOGY OF COMPUTER SIMULATION OF SPUR GEARS WITH ACCURENCY RATE NORMALIZING

Аннотация. *В работе предлагается методология компьютерного моделирования взаимодействия зубчатых колес в современных CAE-пакетах.*

Ключевые слова: *зубчатые передачи, моделирование, метод конечных элементов.*

Abstract. *In the paper methodology of computer simulation of spur gear interaction by modern CAE-products is presented.*

Keywords: *spur gears, simulation, finite element method.*

При проектировании эвольвентных зубчатых передач с эвольвентным профилем зубьев возникают проблемы обеспечения заданных показателей качества применительно к конкретным условиям эксплуатации. Существующие стандарты не учитывают возможности проявления таких вариантов зацепления, как кромочное взаимодействие зубьев на входе в зацепление и на выходе из него, не регламентируют условий пересопряжения зубьев и нелинейности линии зацепления.

Одним из направлений обеспечения заданных свойств передачи является создание пары сопряженных профилей зубьев, для которых проектируется и специальный инструмент. Это может быть оправдано, особенно в случае массового и крупносерийного производства, когда имеется инструментарий реализации такого подхода.

Вместе с тем, приемлемый для решения большинства практических задач вариант зацепления зубьев можно получить и нарезая их методом обкатки реечным инструментом.

Существующие системы компьютерного моделирования (CAE) позволяют на этапе проектирования исследовать качественные характеристики проектируемой передачи, такие как работоспособность, долговечность, кинематическая точность и т. д. Инструментарий такого класса помогает при синтезе параметров передачи, когда известны условия эксплуатации привода, а так же позволяет учитывать в процессе проектирования технологические аспекты, влияющие на эксплуатационные характеристики привода.

Тем не менее, несмотря на широкое распространение инструментов компьютерного моделирования в процессе проектирования, моделирование взаимодействия зубчатой пары имеет ряд особенностей. Во-первых, в процессе взаимодействия необходимо моделировать контакт взаимодействующих поверхностей, что само по себе является нелинейным процессом и имеет множество особенностей, во-вторых, для получения достоверного результата необходимо построить в пакете чис-

ленного моделирования адекватную геометрию профиля зуба.

В работе [1] профиль зуба, нарезаемого реечным инструментом, представляется огибающей последовательных положений режущей кромки инструмента и, в общем случае, определяется тремя кривыми, описывающими профили: боковой поверхности, выкружки и дна впадины.

Большинство распространенных CAE-пакетов (Ansys, Abaqus, MSC.Nastran) имеют инструменты автоматизации позволяющие построить профиль зуба колеса по известным зависимостям непосредственно в пакете [2]. При этом, как правило, геометрия получается путем аппроксимации вычисленных контрольных точек профиля сплайнами. Для получения качественной геометрической модели профиля необходимо не менее 30 равномерно распределенных контрольных точек на одну впадину зуба [2]. В работе [3] разработан подход к формированию геометрии расчетной модели профиля зуба при помощи интерфейса программирования приложения (API) CAD-пакета SolidWorks и дальнейшей передачи геометрии в CAE-пакеты через универсальные форматы передачи данных, такие как STEP, Parasolid и т. д. Данный подход более универсален, так как позволяет подготовить геометрию к моделированию более развитыми средствами геометрического моделирования CAD-пакета.

Задачу моделирования взаимодействия зубчатой пары условно можно разделить на две степени проработки. В первом случае в результате моделирования будут получены кинематические характеристики передачи, а именно угловые скорости ведомых колес, ускорения, неравномерности обкатки сопряженных поверхностей. Во втором случае решается задача с учетом напряженно-деформированного состояния зубчатой пары. Этот подход позволяет на этапе проектирования оценить работоспособность зубчатой пары, условия пересопряжения контактных поверхностей, многопарность зацепления деформированного зубчатого венца под нагрузкой, прогнозировать усталостную выносливость пары.

Исследование кинематических характеристик зубчатой пары целесообразно проводить в пакетах MSC.visualNastran Desktop 2005 или ADAMS. Данные CAE-пакеты позволяют моделировать кинематику, динамику и напряженно-деформированное состояние механизмов и узлов деталей машин [4].

Необходимо отметить, что при численном моделировании кинематики зубчатого привода принимаются следующие допущения: отсутствует погрешность шага зубчатого колеса, полученного резанием, отсутствуют деформации профилей колес под нагрузкой, не учитываются технологические зазоры, не учитывается пятно контакта, материал изотропен. В модели нет погрешности шага в результате огрехов изготовления из-за специфики построения моделей зубчатых колес в CAD-пакетах.

В качестве граничных условий задаются: скорость вращение шестерни (град/сек), момент сопротивления (Н·м) и демпфирование (Н·м) колеса. Перемещения шестерни и колеса во всех направлениях ограничены (рис. 1).

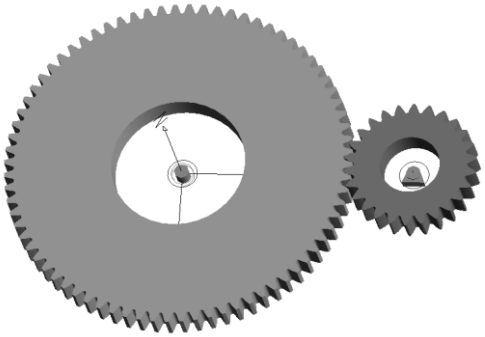


Рис. 1. Модель для исследования кинематики зубчатой пары в MSC.VisualNastran

В качестве параметров решателя задаются:
Точность позиционирования – $1 \cdot 10^{-5}$ м
Точность вращения – $1 \cdot 10^{-4}$ град
Точность сборки – $1 \cdot 10^{-6}$ м
Точность связывания – $1 \cdot 10^{-4}$ м
Количество значимых цифр – 6
Время интегрирования – $5 \cdot 10^{-6}$ сек

Параметры материала колес:
Плотность – 7850 кг/м3
Модуль упругости – $2{,}1 \cdot 10^{11}$ Па
Коэффициент Пуассона – 0,29
Коэффициент реституции – 0,7
Коэффициент трения – 0,15

Основным критерием качества исследуемой передачи является изменение угловой скорости ведомого колеса во времени (рис. 2). Чем больше отклонение угловой скорости от прямой, тем больше несопряжённость контактных поверхностей. В данном случае при оптимизации привода необходимо стремиться к снижению величины колебаний угловой скорости [5].

Моделирование напряженно-деформированного состояния зубчатой пары требует использования конечно-элементной сетки. Процесс разбиения геометрии на сетку может быть реализован непосредственно в CAE пакете (большинство из них имеет встроенные инструменты генерации сетки), либо сетку можно создавать при помощи сеточных генераторов ICEM, HyperMesh.

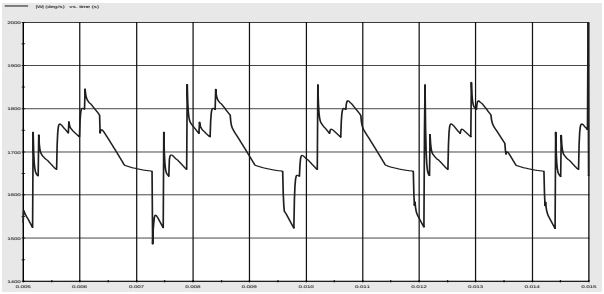


Рис. 2. График изменения угловой скорости колеса

Как правило, встроенные в CAE-пакет инструменты разбиения геометрии на конечно-элементную сетку позволяют создавать достаточно качественную сетку, но требуют дополнительной подготовки геометрии (разбиение на подобласти). Сеточные генераторы решают эту проблему созданием виртуальной блочной структуры, которая натягивает КЭ-сетку виртуальных блоков на вершины, грани и поверхности реальной геометрии (рис. 3).

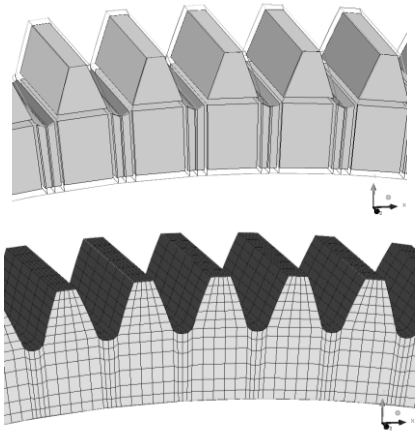


Рис. 3. Пример создания блочной сетки для моделирования взаимодействия зубьев передачи

При моделировании взаимодействия зубчатых передач в CAE-пакетах задаются свойства материалов, при этом следует учитывать, что при моделировании тяжело нагруженных передач целесообразно учитывать пластические свойства материалов и использовать как минимум билинейную модель пластичности. Данная модель помогает исключить сингулярность матрицы жесткости при возникновении критических напряжений в единичном узле (кромочное взаимодействие) и получить истинные напряжения в теле зуба.

Как правило, цилиндрические зубчатые колеса моделируют в 2-мерной постановке. В качестве граничных условий в модель задаются момент сопротивления на колесе, вращение шестерни и ограничение радиальных перемещений шестерни и колеса. Для учета сопряжения колес используются контактные элементы. Контактные элементы наносятся на взаимодействующие поверхности. При 2-мерной постановке задачи контактные элементы выполнены в виде линий (балок), в 3-мерной постановке в виде поверхностей.

В качестве параметров контакта задается алгоритм нахождения точки контакта, коэффициент контактной жесткости, автоматическое снижение взаимопроникновения контактных поверхностей либо снижение зазора между контактными поверхностями. Зазор между контактными элементами не позволяет проводить расчет передачи в статической постановке.

В статической постановке задачи моделирование происходит пошагово. В каждом шаге решатель останавливает расчет при условии соблюдения баланса внешних (приложенные силы) и внутренних (реакции, напряжения) сил и отсутствии перемещений в модели. Решение в статической постановке задачи не всегда возможно. В процессе пересопряжения зубчатых пар возможна потеря контакта, что приводит к невозможности продолжения решения.

Более целесообразно моделировать взаимодействие контактных пар в динамике. Тем не менее, при решении динамической задачи большое значение принимают массы элементов, следовательно, для корректного решения 2-мерной задачи взаимодействия зубчатой пары следует указывать толщину для плоских элементов и плотность материалов.

Наибольшие трудности моделирования взаимодействия зубьев возникают при задании вращения шестерни и момента сопротивления колеса. В описании плоских 4- или 8-узловых элементов отсутствует степень свободы вращения вокруг оси Z. Для решения данной проблемы авторы работы [4] используют балочные элементы, соединяющие сектор колеса и центр его вращения (рис. 4).

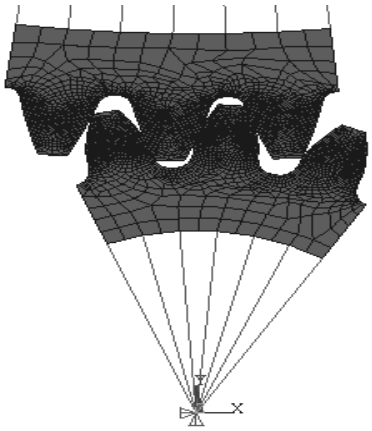


Рис. 4. Использование балочных элементов для задания вращения колеса

Более корректной с точки зрения конечно-элементного подхода альтернативой предлагается задавать вращение шестерни и момент сопротивления на колесе при помощи контактных элементов. Как правило, в пакетах конечно-элементного анализа существует несколько типов контактных тел: деформируемые, недеформируемые (жесткие) и недеформируемые контрольным узлом.

Для недеформируемого контактного тела задаются перемещения и ограничения степеней свободы. Для тела с контрольным узлом можно прикладывать перемещения, силы, моменты к контрольному узлу, которые в процессе решения переносятся на контактное тело. Также к контрольному узлу можно прикладывать присоединённую массу для имитации массы вала и конечные элементы в виде пружин с заданием податливости несущего вала, опор и величин демпфирования (рис. 3).

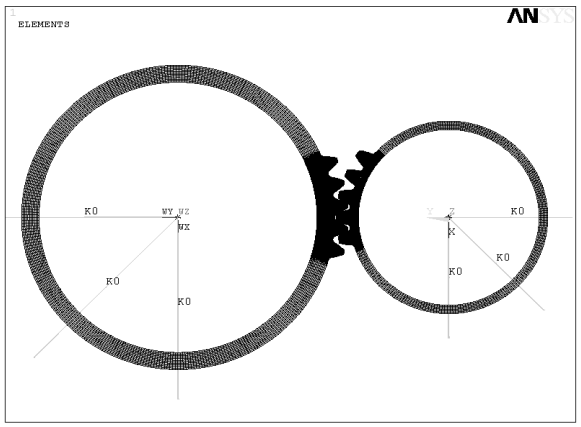


Рис. 5. Способ задания вращения шестерни и момента на колесе

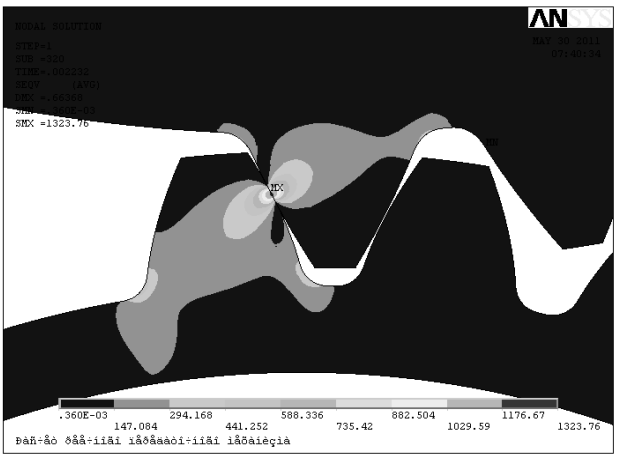


Рис. 6. Распределение напряжений в зоне контакта

В качестве результатов моделирования может быть получена передаточная функция с учетом податливости опор, прогибов валов и деформации зубьев под нагрузкой. Для прогнозирования работоспособности пары можно использовать картины напряженно-деформированного состояния, контактного давления, контактного трения и распределение деформаций в зубчатом венце.

Таким образом, представленная методика позволяет уже на этапе проектирования формировать расчетные схемы применительно к условиям эксплуатации, существенно уменьшить затраты на получение проектных решений, и, в конечном итоге, сократить время на проектирование передачи с заданными показателями качества и гарантированным ресурсом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Усаков, В.И. О профиле зуба, нарезаемого реечным инструментом / В.И. Усаков, А.К. Шлепкин, В.П. Рузанов. – Рук. Деп. ВНИИТЭМР, 1990, №125-МШ90, 11 с.
2. Вавилов, Д. В. Моделирование накатывания мелкомодульных цилиндрических зубчатых передач с заданными показателями качества / Д. В. Вавилов, А. А. Иптышев, В. И. Усаков // Вестник сибирского государственного аэрокосмического университета. Вып. 21. г. Красноярск: СибГАУ, 2008, С. 67–70.
3. Смирнов, А.П. Автоматизированный программный модуль для экспорта геометрии зубчатых колес в CAD-среду SolidWorks / А.П. Смирнов, Д.В. Вавилов, А.А. Иптышев, Д.Б. Елисеев // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2009613284.
4. Усаков В.И. Имитационное моделирование зубчатых передач с использованием пакетов программ инженерного анализа / В.И. Усаков, С.П. Ереско, С.Н. Скорняков // Информационные технологии №12 .:М 2002, С. 27–32.
5. Вавилов, Д.В. Исследование кинематических характеристик цилиндрических прямозубых передач формобразованных накатыванием средствами САПР / Д. В. Вавилов, А. А. Иптышев, Д. Б. Елисеев, М.М. Колегова // Вестник сибирского государственного аэрокосмического университета. Вып. 33. г. Красноярск: СибГАУ, 2011, С. 7–9.
6. Ереско, С.П. Анализ кинематической точности зубчатых и червячных передач / С.П. Ереско, Стайкова Т.М.// Мат-лы научно-практической конф. «Проблемы авиации и космонавтики». – Красноярск: СибГАУ, 2009. – С. 32–34.

УДК 330.341.4; 330.342

Новолодская Галина Ивановна,
д. э. н., профессор, заведующая кафедрой «Мировая экономика и экономическая теория» ИрГУПС, e-mail: gnovolodskaya@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ НАЦИОНАЛЬНОГО РЫНКА ТРУДА В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

G.I. Novolodskaya

FEATURES OF DEVELOPMENT OF THE NATIONAL LABOR MARKET UNDER CURRENT CONDITIONS

Аннотация. *В статье дан анализ развития национального рынка труда в условиях кризиса и определены его особенности на мировом, макроэкономическом, региональном и микроэкономическом уровнях.*

Ключевые слова: *национальный рынок труда, особенности, экономический кризис, уровневый подход.*

Abstract. *The article analyzes the development of the national labor market during the crisis, and its characteristics are defined at the global, macroeconomic, regional and microeconomic levels.*

Keywords: *national labor market, particularlities the economic crisis, layered approach.*

Национальный рынок труда подвержен изменениям, равно как и любой другой рынок под влиянием разных факторов: факторов глобальной среды, факторов национальной среды, факторов региональной среды и факторов на уровне микроэкономических субъектов национальной экономики – фирм и домохозяйств. Каждый из них как группа представляет не только уникальную комбинацию подфакторов, но и отражает специфику взаимодействия всех факторов в пространственно-временной модели формирования, функционирования и развития национального рынка труда. Именно отсюда формируются особенности национального рынка труда в современных условиях.

К факторам глобальной среды, в первую очередь, относится предстоящее вступление России в ВТО, членство в которой открывает для нашей страны возможности урегулирования спорных вопросов на пути движения товаров, капитала и рабочей силы на основе международного права. Урегулированы при посредничестве Швейцарии конфликтные вопросы в отношениях России и Грузии. Определены механизмы приграничного контроля через Осетию и Абхазию. Именно ВТО признала эти государства в качестве самостоятельных субъектов, несмотря на спекуляции вокруг этого вопроса, поднятые в СМИ. Свободное движение товаров при сокращении таможенных тарифов в установленные для России временные рамки уже в начале 2012 года приведет к снижению цен на многие импортируемые товары. Конечно, в силу действия ряда других факторов, снижение цен не приведет к равнотемповому повышению уровня жизни россиян, но окажет существенную роль в этом. Гораздо существеннее то, что национальные предприниматели, делающие сейчас свой выбор в пользу дешевой рабочей силы неквалифицированных гастарбайтеров, а не совершенствования своей технико-технологической базы, вынуждены будут в условиях конкурентного давления со стороны более технологичных импортных товаров уделять внимание не только импортозамещающим технологиям секонд-хэнд, но и их инновационному развитию. А это как раз именно та модернизация на инновационной основе, к которой нас так долго призывают, но к которой у бизнеса не было мотивации.

Не менее важным является и поведение рынка труда в условиях мирового кризиса. И если первая волна мирового кризиса носила финансовый характер, то вторая – экономический. Все страны мировой экономики прочувствовали на себе особенности первой и второй волны. Кто-то в первой волне пострадал больше, кто-то – меньше. Быстро развивающиеся рынки КНР, Индии, Бразилии вышли из первой волны с минимальными потерями за счет грамотной политики ориентации на внутренний спрос. Широта их внутреннего рынка была вполне для этого достаточной. России помог пережить первую волну кризиса рост цен на энергоносители – основной статьи экспорта страны. Появился целый ряд научных работ, отрицающих негативные последствия для страны от сырьевой иглы (по теореме Рыбчинского).

Вторая волна кризиса носит системный экономический характер. Достаточно упомянуть о процессах, разворачивающихся на наших глазах вокруг зоны евро, демонстраций и пикетов напротив Уолл-Стрита в США – все это свидетельствует о нарастании диспропорций экономического характера в глобальных масштабах. И в этих условиях снижение прогноза МВФ по росту экономики

России из-за замедления темпов мировой экономики и снижения цен на нефть до 4,3 % по сравнению с более ранним прогнозом на 4,8 % в этом году, а в следующем году его замедление до 4,1 % [1] все-таки можно, на наш взгляд, рассматривать как достижение, а не поражение. МВФ признает, что Россия лучше подготовлена к новому кризису, чем в 2008 году.

К факторам национальной среды, прежде всего, относится реакция национального рынка труда на такие экономические переменные, как фаза экономического цикла и малейшие признаки экономического оживления, уровень безработицы и инфляции в стране, приток (отток) капитала, в том числе иностранного, и инвестиционная привлекательность страны.

В России наблюдается критическое несоответствие между растущей потребностью экономики в кадрах и отрицательной динамикой численности трудовых ресурсов, вызванной «демографической ямой» 1990-х годов. Компания IBS обнародовала результаты исследования «Барьеры в сфере управления кадрами на пути развития российской экономики» [2], которое было проведено совместно со специалистами Национального исследовательского университета – Высшей школы экономики и ВЦИОМ в июне–ноябре 2010 года. Рисунки 1 и 2 доказывают данную тенденцию. По предварительным данным переписи населения 2010 г., по сравнению с переписью 2002 года население России сократилось с 145166,7 тысячи человек до 142905,2 тысячи человек, или на 2,2 миллиона человек (1,6 процента) [3], из-за естественной убыли населения (превышения числа умерших над числом родившихся) на фоне миграционного прироста в течение всего межпереписного периода.

Потребность в трудовых ресурсах в 2009 г. по сферам деятельности и предполагаемая эффективность инвестиций в человеческие ресурсы представлены на рис. 3 и 4.

Рис. 1. Рождаемость в России за год

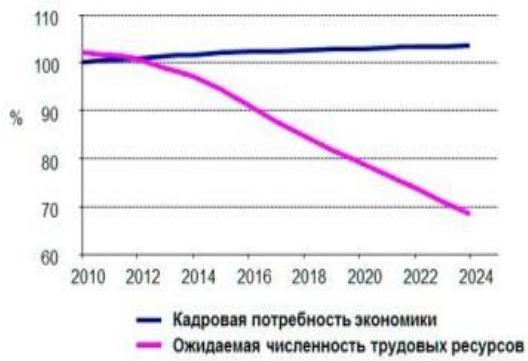


Рис. 2. Прогноз потребности и численности населения

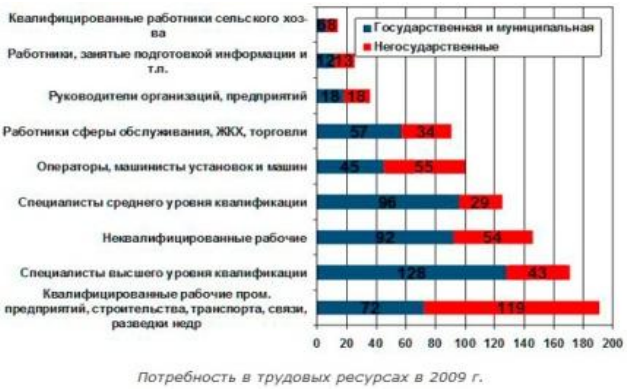


Рис. 3. Потребность в трудовых ресурсах в 2009 г. по сферам деятельности

Рис. 4. Предполагаемая эффективность инвестиций в человеческие ресурсы

Как видим, достаточно высокой остается оценка потребности в работниках неквалифицированного труда, о чем говорилось выше, и это – довольно тревожный симптом с точки зрения внедрения инноваций в производство. Необходимо повсеместно применять систему налоговых и иных мер стимулирующего характера, чтобы бизнес ощутил материальную выгоду от инноваций не только в краткосрочной, но и в долгосрочной перспективе.

В период с 19 октября по 2 ноября уровень официальной безработицы в России упал на 1 % и составил 1,217 миллиона человек. Уровень безработицы в сентябре в РФ составил 6 %, по со-

стоянию на октябрь 2011 года экономически активное население РФ составило 76,6 млн человек (свыше 54 % населения страны). По данным Минздравсоцразвития РФ, за три года (с начала октября 2008 года) общее количество уволенных работников достигло 2,015 миллиона человек. Правительство ожидает снижения уровня безработицы в России на 2012 год до 6,6 % с 6,8 % в 2011 году. В период с 5 по 19 октября (за две недели) 2011 г. численность безработных уменьшилась в 71 регионе [4]. В то же время установлен минимальный и максимальный размер пособий по безработице на 2012 год – в 850 рублей и 4,9 тысячи рублей соответственно [5]. Пособие по безработице в России устанавливается в процентном отношении к среднему заработку, который вычисляется за последние три месяца по последнему месту работы.

Относительно инфляции и реальных доходов населения необходимо отметить, что в среднем по стране за последние пять лет рост доходов граждан оказался в полтора раза больше роста цен на продукты питания. С 2006 по 2010 год зарплаты выросли в два раза. Минимальное увеличение доходов – на 53 процента с 26,53 до 40,64 тысячи рублей зафиксировано в Ханты-Мансийском округе. Максимальный рост – на 127 процентов, с 4,45 до 10,11 тысячи рублей произошел в Дагестане. Вывод о том, что рост зарплат за последние пять лет в полтора раза обогнал инфляцию [6], аналитики сделали, сравнив абсолютное увеличение доходов с ростом стоимости фиксированного набора продуктов. Тем не менее, увеличение покупательской способности заработных плат в разных регионах произошло неравномерно.

Как указывалось выше, нельзя вместе считать и период экономического роста, и период кризиса. До кризисного 2008 года зарплаты росли, а в 2009 году динамика заработных плат была отрицательной, в 2010 же году снова наметился небольшой рост. Безусловно, зарплаты выросли. В определенных сферах деятельности в настоящий момент уровень предлагаемого дохода в рублевом эквиваленте на 8 % (в среднем по рынку) выше уровня трехлетней давности. В разных сферах рост зарплат, так же как и рост безработицы, разный. При этом наиболее динамично падала и росла зарплата в сфере маркетинга, рекламы и PR.

Реальные располагаемые денежные доходы населения РФ в октябре 2011 года выросли на 0,4 % по сравнению с аналогичным периодом прошлого года после повышения на 2,9 % в сентябре, на 1,6 % – в августе, на 0,4 % – в июле, на 2,2 % – в июне и падения на 5,3 % в мае и 3,1 % – в апреле. За январь–октябрь 2011 года доходы снизились на 0,2 % в годовом сравнении. В номинальном выражении среднедушевые доходы в октябре составили 20691 рубль и увеличились на 7,5 % по сравнению с октябрем 2010 года. Среднемесячная номинальная начисленная заработная плата в октябре 2011 года, по предварительным данным Росстата, составила 23350 рублей (рост на 12,6 % по сравнению с октябрем 2010 года). Реальная зарплата, скорректированная на инфляцию, повысилась в годовом исчислении на 5,0 %. В 2010 году реальные доходы населения выросли на 4,2 %. В 2011 году Минэкономразвития ожидает роста реальных доходов на 1,5 % [7].

Прирост заработной платы к началу года, по данным «Финэкспертизы» [6], на начало ноября составлял 4,4 процента. Согласно прогнозу Минэкономразвития, инфляция в России по итогам 2011 года не превысит 7 процентов, а по итогам января–сентября 2011 года инфляция составила 4,7 процента. К концу 2011 г. все отрасли, серьёзно пострадавшие в кризис, вернутся на уровень докризисной оплаты труда.

Доля социальных расходов в общем объеме госрасходов Российской Федерации выросла более чем в полтора раза за годы кризиса. В предкризисном 2007 году в России на социальные расходы приходилось 25,1 % консолидированного бюджета, в 2009-м – 29,4 %, в 2011 году этот показатель по прогнозу достигнет 39,7 %. В 27 странах ЕС в среднем этот показатель в 2007 году составлял 38,9 %, в 2009-м – 39,5 %, в 2011 году должен составить примерно такую же цифру. И. Николаев отмечает, что нынешний российский показатель в сравнении с отдельными странами ЕС не является рекордным. Такие показатели имеют наиболее высокоразвитые страны: Германия – 45,6 %, Дания – 43,5 %, Люксембург – 42,6 %, Финляндия – 42,5 % (по данным на 2009 год). «Высокоразвитые страны могут себе позволить более высокую долю расходов на социальные нужды. Менее развитые страны ввиду меньшей эффективности их экономик относительно ограничены в таких тратах» [8].

Похожая динамика сложилась и в соотношении социальных расходов с ВВП. Если по странам ЕС этот показатель перед кризисом в 2007 году составлял 17,7 %, то в 2009 году он достиг 20,1 %. В России в 2007 году он составлял 8,6 %, в 2009-м – 12,2 %, в 2011 году он должен составить 12,4 %. «Популизм антикризисной политики, дополненный популизмом бюджетной политики накануне выборов, может дорого обойтись стране. Издержки такой политики уже в полной мере проявились в вынужденном повышении суммарной ставки страховых взносов во внебюджетные социальные фонды с 26 до 34 %» [8]. В то же время

правительство отдает себе отчет о «цене популизма». Еще до ухода с поста глава Минфина России подсчитал объем выпадающих доходов от снижения ставки страховых взносов – 400 млрд рублей. Президент Д. Медведев в бюджетном послании членам правительства озвучил, что страховые взносы для бизнеса в государственные внебюджетные фонды в 2012–13 годах будут снижены с 34 % до 30 %, а для малого бизнеса и некоммерческих организаций, которые осуществляют основную деятельность в области социального обслуживания населения, а также благотворительных организаций и компаний, применяющих УСН, – до 20 % [9].

К факторам региональной среды, прежде всего, относятся те же факторы, определяющие особенности национального рынка труда с той разницей, которая характерна данному конкретному региону. В частности, в плане демографической ситуации по-прежнему наиболее населенными являются Центральный, Приволжский и Сибирский федеральные округа, на территории которых проживает более 61 процента населения страны. По сравнению с переписью 2002 года численность населения сократилась в 63, а возросла в 20 субъектах Федерации [3]. Численность безработных за отчетный период снизилась в 58 регионах РФ. При этом максимальное уменьшение показателя зарегистрировано в Карачаево-Черкесской и Чувашской республиках, а также в Приморском крае и Бурятии. А в 22 субъектах страны, в том числе в Северной Осетии, Амурской области, Ямало-Ненецком автономном округе и Камчатском крае, отмечается рост числа безработных россиян.

Относительно заработной платы и ее динамики региональные отличия также существенны. У 15 регионов ВРП на душу населения за пять лет рос медленнее, чем зарплаты. Лидером является Вологодская область, где при 56-процентном росте зарплат ВРП вырос всего на 11 процентов. В то же время действительными лидерами роста ВРП являются либо регионы с низкой базой, либо те субъекты РФ, где за исследуемый период наблюдались масштабные экономические события (в Сахалинской области запущены проекты Сахалин-1 и Сахалин-2, завод по сжижению газа): ВРП взлетел, а заработные платы за этим ростом не поспевали. В Адыгее, Дагестане подъем валового регионального продукта связан с низкой технико-технологической базой и высокой дотационной поддержкой, с помощью которой пытаются запустить экономический механизм. Факторов, оказывающих влияние на региональные различия, много, и чтобы правильно понять реальную ситуацию в регионе, необходимо их учитывать на местах.

Кризис по-разному повлиял на экономику регионов, у одних регионов заработки упали значительнее, чем у других. Одни регионы росли быстрее в период роста, другие медленнее. Среди регионов, где рост зарплат соответствовал инфляции, в основном преобладают нефтяные районы с изначально высокой оплатой труда рабочих. В то же время в числе беднейших регионов традиционно находятся республика Ингушетия, Калмыкия, Тыва.

К факторам на уровне микроэкономических субъектов национальной экономики – фирм и домохозяйств, прежде всего, относятся проблемы, которые компаниям придется решать в ближайшее время: старение персонала, слабый приток молодежи, недостаточный уровень квалификации, высокий уровень текучести персонала и низкий уровень трудовой мотивации. Рассмотрим, как повлияли фазы кризиса на изменение мотивационной составляющей. Принципиально в 2010 г. не изменилась схема оплаты труда: предприятия стремились стимулировать работников на получение увеличенной переменной части оплаты труда, что позволяло им уменьшать риски расходов, а работников – ориентировать на достижение максимальных конечных финансовых результатов. Социальные пакеты и другие нематериальные формы поощрения имели второстепенное значение, продолжая тенденцию 2009 г. Наметившийся рост бизнеса в 2011 г, скорее всего, приведет к использованию уже привычного расширенного набора инструментов мотивации: обучение сотрудников, нестандартные приёмы в управлении персоналом (организация удобного рабочего времени, офисного пространства) и пр. Основными элементами социального пакета, предлагаемого сотрудникам, по-прежнему являются мобильная связь (92 %), обучающие программы (91 %), программы добровольного медицинского страхования (80 %). При этом бюджет на обучающие программы продолжает демонстрировать наиболее ярко выраженную разнонаправленную динамику. Около 38 % компаний повысят соответствующие расходы в 2011 г., тогда как порядка 8 % компаний планируют бюджет снизить [10]. Причем обучение персонала становится доминирующим инструментом в повышении конкурентоспособности предприятия.

В прошлом году на каждый доллар, инвестированный в персонал, компании РФ получили $1,5, тогда как среднеевропейский уровень равен $1,2. В то же время объем выручки компании в расчете на сотрудника сократился на 27 % до

Рис. 5. Динамика просроченной задолженности по заработной плате, млн руб

191868 долл. против 264602 долл. в 2009 году, тогда как в странах Европы в 2009 году этот показатель оказался выше – 218636 долл. [11]

Согласно исследованию Pricewaterhouse-Coopers 2010 года, медианное значение показателя «отношение вознаграждения к выручке» в странах Европы составляет около 21 %. В российских компаниях результативность работы сотрудников выше, однако, в кризис она несколько снизилась. Так, согласно свежим данным PwC, отношение вознаграждения к выручке составляет 10,6 %, тогда как годом ранее оно составляло 9,6 % [11].

На поведение работников и их отношение к труду оказывает влияние неисполнение контрактов со стороны работодателей. Так, на 1 ноября 2011 г., по сведениям организаций (не относящихся к субъектам малого предпринимательства), суммарная задолженность по заработной плате по кругу наблюдаемых видов экономической деятельности составила 2427 млн рублей и только за месяц по сравнению с 1 октября 2011 г увеличилась на 38 млн рублей (на 1,6 %). Просроченная задолженность по заработной плате из-за отсутствия у организаций собственных средств на 1 ноября 2011 г составила 98,2 % общей суммы просроченной задолженности (ее динамику можно увидеть на рис. 5). Из общей суммы невыплаченной заработной платы на долги, образовавшиеся в 2010 г., приходится 512 млн рублей (21,1 %) в 2009 г. и ранее – 547 млн рублей (22,5 %). В общем объеме просроченной задолженности по заработной плате 46 % приходится на обрабатывающие производства, 21 % – на строительство, 9 % – на сельское хозяйство, охоту и лесозаготовки, 8 % – на производство и распределение электроэнергии, газа и воды, 7 % – на транспорт [12].

В целом, как показывает аналитическая часть данной работы, рынок труда России относительно стабилизируется, по ряду показателей он сравним с рынками труда развитых стран, что подтверждает достаточно высокая оценка России в мировых рейтингах конкурентоспособности в этой сфере. Однако кризис внес свои коррективы, и по критерию «Эффективность рынка труда» положение России значительно ухудшилось наряду с такими слагаемыми, как качество институтов, здравоохранение и начальное образование, конкурентоспособность компаний и инновационный потенциал. Улучшение произошло лишь по двум слагаемым: макроэкономическая среда и технологический уровень. Именно кардинальные улучшения в макроэкономической сфере (рост на 35 позиций – с 79-го до 44-го места) позволили России не упасть в рейтинге еще более значительно (место России в рейтинге ВЭФ за минувший год снизилось с 63-го на 66-е место) [13].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. МВФ опустил прогноз по росту экономики РФ. http://top.rbc.ru/economics/20/09/2011/616445.shtml
2. Плакса М. Демографическая яма: Бизнес недооценивает проблему/ http://www.e-prof.ru/jurnal/rynok_truda_mneniya_ekspertov/demograficheskaya_yama.htm
3. Суринов А. Кем мы себя считаем http://www.rg.ru/2011/03/27/perepis-rosstat-site.html
4. http://www.bfm.ru/news/2011/10/24/v-rf-bezrabotica-za-2-nedeli-snizilas-na-2-1.html
5. Постановление Правительства Российской Федерации от 3 ноября 2011 г. N 888 г. Москва "О

размерах минимальной и максимальной величин пособия по безработице на 2012 год"
6. Опубликовано на сайте "Российской Газеты" 11 ноября 2011 г.
7. Доходы: от роста к снижению. http://www.finmarket.ru/z/nws/
8. http://www.fbk.ru/news/5419/1104470/
9. Кудрин назвал цену снижения страховых взносов: 400 млрд рублей. http://www.newsru.com/ /finance/29jun2011/koudrine.html
10. Компании увеличивают затраты на персонал – новая гонка зарплат? http://www.kellyservices.ru/web/ru/services/ru/pages/17062011.html
11. Россия обгоняет европейцев по показателю отдачи от инвестиций в персонал. По материалам сайта rosinvestproekt.ru.
12. О просроченной задолженности по заработной плате на 1 ноября 2011 года. http://www.gks.ru/bgd/free/B04_03/IssWWW.exe /Stg/d02/245.htm
13. Всемирный экономический форум: рейтинг глобальной конкурентоспособности 2011–2012. http://gtmarket.ru/news/state/2011/09/07/3330.

УДК 656.222

Нехорошков Владимир Петрович,
к. э. н., профессор зав. кафедрой «Мировая экономика и туризм», СГУПС, тел. 8383-291-22-78
Дмитренко Алексей Васильевич,
д. т. н., профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой», СГУПС
тел.: (8383) 2678200, сот. (8913 471-07-76) e-mail: dmitrenkoav@mail.ru
Казанцева Лариса Сергеевна,
преподаватель кафедры «УЭР», СГУПС, e-mail: Larik-nsk@yandex.ru
Тукенов Дархан Токтарович,
менеджер Департамента по управлению персоналом АО НК «КТЖ» Астана, Казахстан, тел. 8 701 998 78 02

ВАГОНОПОТОКИ И ГРУЗОПОТОКИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ И АВТОМОБИЛЬНОМ ТРАНСПОРТЕ

V.P. Nekhoroshkov, A.V. Dmitrenko, L. S. Kazantseva, D.T. Tukenov

CAR TRAFFIC AND CARGO TRAFFIC ON A RAILWAY AND AUTOMOBILE TRANSPORT

Аннотация. *Изложены особенности продвижения вагонопотоков и грузопотоков, с учётом мест их зарождения и дальности следования. Оценивается эффективная сфера применения различных видов транспорта.*

Ключевые слова: *железнодорожный, морской, перегон, поезд, путь, пропускная способность, станция, транспорт.*

Abstract. *The peculiarities of the railway car and freight traffic volume are given in the paper taking into account the place of their origin and traffic distance. The efficiency of various transport modes use is estimated.*

Keywords: *railway, sea, stage, port, train, way, throughput, repair, station, transport.*

На характер эксплуатационной работы всех видов транспорта значительное влияние оказывают структура имеющих место вагонопотоков и грузопотоков, их величина, а также направление следования. При оценке затрат, связанных с перевозками грузов и пассажиров, необходимо учитывать имеющее место наличие на сухопутной территории континента крупных городов и сельской местности. Устройства инфраструктуры, а также подвижных средств каждого вида транспорта должны обеспечивать своевременную сохранную доставку зарождающихся потоков грузов с пунктов их отправления до мест назначения.

В ранее изложенной научной литературе для железнодорожного транспорта при расчете оптимального варианта плана формирования использованы величины вагонопотоков только груженого направления для конкретных станций и участков [2, 4, 5, 6]. При этом не учитывались в комплексе объемы перевозок другого направления.

Для достижения более точных результатов в оценке вариантов освоения возрастающих объемов перевозок в целом всего хозяйства страны необходимо учитывать, что в практических условиях

эксплуатации как для железнодорожных линий, так и для других видов транспорта, имеют место не только вагонопотоки, но и грузопотоки**.** Они значительно различаются между собой как пунктами отправления и назначения, так и объемами перевозок.

Наличие грузопотоков и вагонопотоков окажет влияние на рациональную сферу применения автомобильного и железнодорожного транспорта в случае осуществления доставки грузов «**от двери до двери**».

Наличие начальных, конечных, а также транзитных технологических операций в пути следования грузов влияет на параметры технического оснащения и мощности устройств не только железнодорожного, но и автомобильного транспорта. Для всей территории континента должна быть установлена рациональная сфера применения также морского транспорта, широко используемого в настоящее время в перевозочном процессе.

В настоящее время оптимальный вариант плана формирования устанавливают для вагонопотоков, которые функционируют между опорными сортировочными станциями [2] (рис. 1).

В зависимости от величины вагонопотоков, с учетом затрат по простою вагонов и потерь от их переработки, на попутных сортировочных станциях, устанавливается оптимальный вариант плана формирования [2, 5, 6]. В то же время, в практических условиях эксплуатации железнодорожных линий с течением времени фактические вагонопотоки между станциями формирования, как по отдельным суткам, так и по сезонам, сильно изменяются по величине, а количество сортировочных путей по каждой конкретной станции в течение длительного времени остается постоянной величиной.

Из рис. 1 также видно, что план формирования грузовых поездов устанавливается для прямолинейной неразветвленной сети железных дорог. В то же время для каждой страны имеется разветвленная сеть железнодорожных линий. В большей части крупных городов функционирует речной транспорт, имеются аэропорты с большим объемом перевозок пассажиров и ценных грузов.

Наличие большого количества магистральных линий, в том числе и для разных видов транспорта, делает целесообразным создание мощных транспортных узлов с большими объемами переработки грузов и высокими экономическими показателями, по сравнению с пунктами, расположенными на неразветвленной сети железных дорог страны.

В реальных условиях эксплуатационной работы на железнодорожном транспорте вагонопотоки имеют значительные особенности, исходя из наличия крупных городов и сельской местности. В большей части территории страны вагонопотоки зарождаются преимущественно в сельской местности, а также в пунктах нахождения крупных месторождений полезных ископаемых. Подавляющая часть погруженных вагонов затем выгружается в крупных городах, где располагаются электростанции, металлургические заводы, предприятия с большим объемом выгрузки вагонов.

Данные рис. 1 показывают, что при расчете оптимального варианта плана формирования, рассчитанного между узловыми пунктами, учитываются только отдельные элементы технологии, когда вагон уже доставлен в узловой пункт на сортировочную станцию для формирования грузовых поездов. При этом начальные технологические операции по доставке вагонов с пунктов погрузки до станций формирования не учитывались в теории оптимального варианта плана формирования составов грузовых поездов на железнодорожном транспорте [2].

Фактически большая часть вагонов грузится

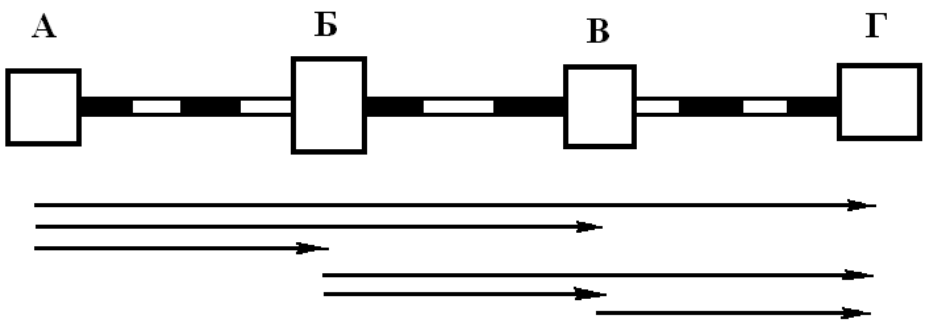


Рис. 1. Схема вагонопотоков между сортировочными станциями:

– сортировочные станции в пунктах организации вагонопотоков в поезда

на промежуточных станциях, расположенных вдали от сортировочных станций, пунктов формирования составов грузовых поездов. Погрузка в вагоны осуществляется на промежуточных станциях, преимущественно в сельской местности, а также в пунктах месторождений полезных ископаемых. Такая особенность зарождения вагонопотоков приводит к тому, что при малых объемах работы на начальных и конечных технологических операциях в случае формирования полновесных или полносоставных грузовых поездов дополнительно возникают длительные простои вагонов на станциях погрузки и выгрузки. Величина этих простоев в значительной степени возрастает с увеличением веса формируемых грузовых поездов.

Следует учесть, что на характер следования, затраты технических средств по доставке до пунктов назначения значительное влияние оказывает дальность следования погруженных вагонов. Для отдельных вагонов дальность их следования различается от нескольких десятков до 5 и более тысяч км.

При следовании на близкие расстояния до 300 км вагоны перерабатываются только на одной сортировочной станции и обычно включаются в сборные или участковые поезда (рис. 2). В пути следования вагоны в сборных поездах имеют частые и длительные остановки на промежуточных станциях участков. Скорость следования вагонов от моментов их погрузки до времени выгрузки в расчете на 1 км пробега грузов, имеет малую величину. С целью ускорения доставки грузов на всем пути следования становится целесообразным местные грузовые поезда на близкие расстояния формировать составами меньшего веса или длины.

В случае следования на расстояния, в пределах до 600 км, вагон проходит одно плечо между двумя сортировочными станциями (рис. 3). В этом случае дополнительно, кроме сборных и участковых поездов, будет выполняться формирование технических маршрутов.

В случае следования на самые дальние расстояния, в пределах более 3–5 тыс. км, вагон проходит несколько попутных сортировочных станций. Он может попадать в сформированные составы два и более раза (рис. 4).

Следует также указать, что грузы, следующие на расстояния свыше 3000 км, составляют

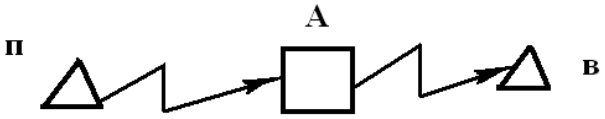


Рис. 2. Схема следования грузов на короткие расстояния:

– сортировочная станция А;

– грузовые пункты;

П, В – пункты погрузки и выгрузки вагонов;

– сборные и участковые поезда

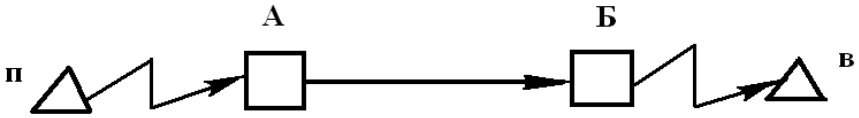


Рис. 3. Схема следования грузов на средние расстояния:

– сортировочные станции;

– пункты погрузки и выгрузки;

– сборные и участковые поезда;

– технические маршруты

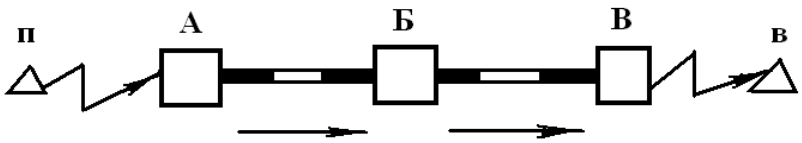


Рис. 4. Схема следования погруженных вагонов железнодорожным транспортом от станций погрузки до пунктов назначения:

– грузовые станции на железнодорожном транспорте;

– сортировочные станции;

– сборные и участковые поезда;

– технические маршруты между сортировочными станциями;

А., Б, В – сортировочные станции;

П, В – железнодорожные станции погрузки и выгрузки

Рис. 5. Схема следования грузов разными видами транспорта:

– перевозка грузов по железной дороге между станциями отправления и назначения;

– перевозка грузов автомобильным транспортом на начальном и конечном этапах их следования;

А, Б – станции погрузки и выгрузки грузов на железнодорожном транспорте;

П, В – пункты погрузки и выгрузки грузов на автомобильном транспорте

всего около 7 % от суммарного объема погрузки. Однако на их долю приходится более 40 % от суммарного пробега груженых и порожних вагонов, выполняемого на всей сети железных дорог страны [1, 2, 3]. Данные грузы следуют через ряд сортировочных станций и могут перерабатываться несколько раз.

В практических условиях хозяйственной деятельности предприятий грузы могут следовать не только железнодорожным транспортом. Так, подавляющая часть грузов образуется прежде всего в сельской местности на огромной территории и в крупных месторождениях полезных ископаемых. Зарождающиеся грузы затем доставляют автомобильным транспортом до железнодорожных станций на значительные расстояния (рис. 5).

Данные рис. 5 показывают, что грузопотоки следуют на большее расстояние, чем вагонопотоки. Значительная часть легковесных грузов, следующих на короткие расстояния, целиком доставляются только автомобильным транспортом, минуя железную дорогу. Следовательно, как по объему, так и по дальности следования грузопотоки имеют большую величину, по сравнению с вагонопотоками на железнодорожном транспорте.

В зависимости от технологических особенностей функционирования перевозочного процесса для железнодорожного и автомобильного транспорта грузопотоки и вагонопотоки можно классифицировать следующим образом:

а) вагонопотоки между сортировочными станциями, которые формируются в поезда на железнодорожном транспорте;

б) вагнонопотоки между станциями погрузки и выгрузки на железнодорожном транспорте.

в) вагонопотоки с учетом наличия груженого и порожнего направлений;

г) вагонопотоки с учетом наличия пунктов погрузки и выгрузки в целом по всей огромной территории страны.

Вагоны с крупных пунктов погрузки затем следуют маршрутами до пунктов назначения. В то же время с большинства малых станций погрузки, расположенных в сельской местности, погруженные вагоны доставляются в сборных и участковых поездах до ближайших сортировочных станций. Затем в сформированных технических маршрутах

вагоны доставляются до конечных сортировочных станций и далее сборными, а также участковыми или передаточными поездами в крупных железнодорожных узлах доставляются до станций назначения.

В реальных условиях перевозочного процесса для железнодорожного транспорта вагоны с грузами вначале фактически зарождаются не в узловых пунктах, не на станциях формирования транзитных грузовых поездов или на промежуточных станциях участков. Грузы обычно зарождаются на всей территории страны: как в пунктах нахождения железнодорожных линий, так и в местности, где эти линии отсутствуют. При этом от пункта образования грузов к перевозке до времени доставки этих грузов до станций погрузки происходит ряд технологических операций: образование грузов в пунктах их нахождения, хранение на складах, погрузка и доставка их автомобильным транспортом с мест зарождения грузов до пунктов погрузки на станциях железнодорожного транспорта (рис. 6). В дальнейшем происходит последующая доставка данных вагонов до пунктов расформирования поездов дальних назначений, расположенных на сортировочных станциях.

Наличие дополнительных технологических операций на автомобильном и железнодорожном транспорте делает необходимым выполнить анализ фактического появления вагонопотоков, как непосредственно на железнодорожном транспорте, так и с учетом их подвоза до пунктов погрузки и выгрузки автомобильным транспортом.

Фактически для отправления грузы обычно образуются непосредственно не на железнодорожных станциях. Как правило, произведенная продукция как в городах, так и в сельской местности, с территории или предприятий доставляется до железнодорожных станций автомобильным транспортом. Короткие подъездные пути железнодорожного транспорта обслуживают только малую часть территории для предприятий с большим объемом погрузки и выгрузки.

Ввиду короткой протяженности по территории страны вследствие большой дороговизны железнодорожный транспорт оказывается не в состоянии обслуживать любые точки суши, где образуются грузы для отправления по огромной территории страны. Прокладка железнодорожных линий до всех точек создания продукции вызовет огромные капитальные затраты, что нерационально. Поэтому с полей вся выращенная сельскохозяйственная продукция вначале доставляется потребителям, живущим в населенных пунктах, а также до железнодорожных станций автомобильным транспортом. Подавляющая часть предприятий свою продукцию доставляет автомобильным транспортом до железнодорожных станций погрузки. Вызвано это тем, что автомобильный транспорт сможет без капитальных затрат в строительство дорог обеспечивать доставку грузов с любой точки суши. Наличие автомобильного транспорта на пунктах погрузки и выгрузки грузов делает целесообразной организацию перевозок мелких партий грузов на короткие расстояния вместо железнодорожного автомобильным транспортом.

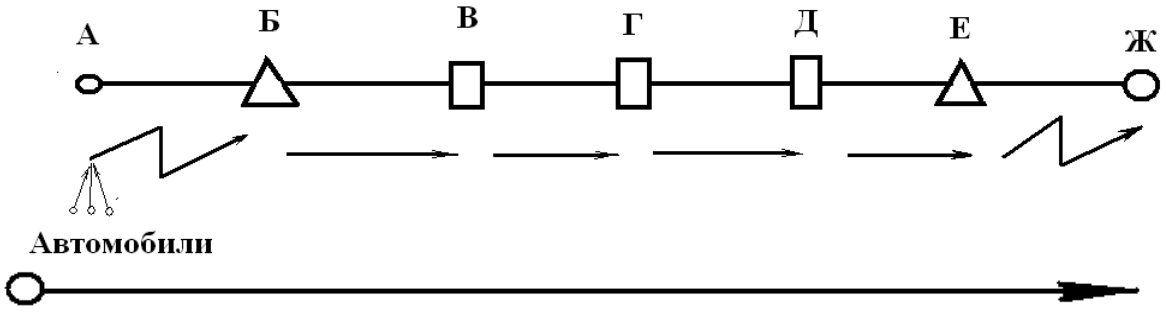


Рис. 6. Схема следования грузов с учетом использования автомобильного транспорта:

– доставка грузов до железной дороги автомобильным транспортом;

– сборные и участковые поезда;

– транзитные грузовые поезда;

– доставка грузов только автотранспортом на большие расстояния

В связи с особенностью погрузки и выгрузки вагонов по станциям в зависимости от наличия городской и сельской местности имеют место определенные особенности функционирования грузопотоков и вагонопотоков в целом по территории всей страны. Величина грузовых операций, продолжительность их выполнения будет оцениваться с учетом следующих факторов:

а) по объему погрузки и выгрузки, приходящейся на 1 км^2 конкретной территории данной области или в стране;

б) по характеру размещения пунктов погрузки и выгрузки, как в городах, так и в сельской местности;

в) по характеру размещения станций погрузки и выгрузки на сети железных дорог страны, а также характеру их размещения по территории страны, как в географическом её центре, так и на окраинах.

В связи с вышеизложенным, имеют место определенные закономерности в объемах погрузки и выгрузки грузов, характере использования в комплексе железнодорожного и автомобильного транспорта. Порядок использования разных видов транспорта в зависимости от объемов погрузки и выгрузки грузов возможно оценивать в зависимости от ряда факторов:

а) для производственных целей в связи с особенностями погрузки и выгрузки грузов;

б) при наличии характера размещения предприятий в городской и сельской местности, в отдельных областях по территории страны;

в) для характера появления общей суммарной погрузки и выгрузки вагонов в целом по территории одной страны;

г) для мирового грузооборота, с учетом наличия континентов на Земном шаре, а также характера размещения на континенте государств с различным уровнем развития.

Каждый из вышеприведенных факторов следует рассматривать в зависимости от объемов работы, характера развития средств транспорта и его размещения по территории континента, с учетом технического прогресса для характера исторического развития стран мира.

Для перевозки на транспорте по обширной территории страны образуются грузы промышленности и сельского хозяйства, которые затем доставляются в пункты назначения, расположенные в других областях или даже в соседних государствах. В пунктах погрузки обычно имеет место избыток определенных товаров, которые не будут полностью использоваться предприятиями и населением в данной местности. Так, на территории каждой страны имеются месторождения полезных ископаемых, избытки грузов которых реализуются в другой местности. В то же время, такие товары не имеются в достаточном количестве и качестве в других областях страны. Так, например, месторождения нефти имеются в малом числе государств. В то же время нефть в огромных масштабах потребляется во всех странах земного шара.

Сельскохозяйственная продукция или лес обычно выращиваются на всей территории в сельской местности страны. Так, лес, выращиваемый в центральных районах континента, затем в большой мере доставляется в южные районы. Продукты питания выращиваются на огромных обрабатываемых площадях сухопутной территории страны. Это приводит к тому, что в сельской местности, а также в пунктах месторождений полезных ископаемых объем погрузки в значительной степени превышает размеры выгрузки. Поэтому для осуществления погрузки в последующем из городов в сельскую местность железнодорожным транспортом подсылается значительная часть порожних вагонов.

Кроме того, следует учесть, что если в сельской местности грузится сырье и материалы, то из городов в другие районы, в том числе и в малонаселенные пункты с малыми размерами, направляются ценные грузы, имеющие повышенную стоимость после переработки сырья.

На рациональный вариант организации грузопотоков и вагонопотоков значительное влияние оказывает также характер осуществления выгрузки: как по объему, так и в целом по размещению на территории всей страны. Так, сельскохозяйственная продукция обычно потребляется пропорционально числу жителей в данном ограниченном пункте. В то же время, практически все продукты питания выращиваются в сельской местности. Это оказывает значительное влияние на объемы выгрузки по различным частям территории в целом для всей страны.

Несколько иное положение будет с характером величины вагонопотоков, наличием груженого и порожнего направлений, как для отдельных функционирующих железнодорожных линий, так и в целом для территории всей страны. В этом случае для оценки рациональных вариантов работы средств транспорта, особенно железнодорожного, необходимо дополнительно учитывать наличие груженого и порожнего направлений.

В существующей научной литературе, примерах и задачах при изучении данного вопроса изложено, что вагонопотоки в одном направлении следуют все груженными [2]. При этом для железнодорожного транспорта в обратном направлении часть вагонов будет следовать в порожнем состоя-

нии. Коэффициент порожнего пробега в значительной степени зависит от характера развития экономической деятельности страны, наличием городов различной величины. В последние годы коэффициент порожнего пробега вагонов значительно возрос.

Технико-экономические расчеты и полученные данные о вагонопотоках показали, что по Транссибирской магистрали в грузовом направлении суммарный вес грузовых поездов оказывается в среднем в два раза больше, чем в порожнем направлении [1, 2, 3]. Поэтому в случае следования сформированных поездов в порожнем направлении в недостаточной степени используется мощность локомотивов. Данные запасы их мощности возможно успешно направлять на увеличение скорости движения поездов. Для этого становится также целесообразным для порожнего направления снизить норму веса формируемых составов грузовых поездов.

На эффективность организации перевозочного процесса для железнодорожного транспорта значительное влияние оказывает также **наличие в стране грузораздельного пункта**. Дополнительные исследования показали, что для России в целом имеется грузораздельный пункт, где на ограниченном числе станций суммарная погрузка вагонов значительно преобладает над их выгрузкой. К такому грузораздельному пункту как в западном направлении, с Дальнего Востока и Забайкалья, так и в восточную сторону с Урала и Европейской части страны ежесуточно поступает значительная часть порожних вагонов под повышенную погрузку в Кузбасс. В то же время, в обратном направлении как на запад, так и на восток из Кузбасса следует только груженый вагонопоток. Наличие грузораздельного пункта позволяет при рациональном планировании погрузки по назначениям обеспечивать с меньшими затратами устойчивость в эксплуатационной работе не только в целом всей сети железных дорог России, но и в целом для всего континента (рис. 7).

При наличии грузораздельного пункта становится возможным изменением направления погрузки грузов на самые дальние расстояния в быстрые сроки уменьшить избыток вагонов на самом загруженном полигоне. Наличие грузораздельного пункта окажет также влияние на рациональные варианты распределения грузопотоков между морским и железнодорожным видами транспорта на континенте Европа – Азия.

В Средние века по территории континента проходил Шелковый путь, который в малых размерах обеспечивал передачу грузов между государствами на ранней ступени их экономического развития. Данные потоки были ограниченными и оказывали мало стимулирующего влияния на характер экономического развития стран мира.

Положение с характером изменения направления грузопотоков сильно изменилось с началом Великих географических открытий. В новых изменившихся условиях создалась возможность обеспечивать перевозки значительной части грузов, которые имелись в избытке на одном конце континента и для которых имелся дефицит в другой части континента. Так, жители северных областей Европы получили возможность в значительных объемах получать фрукты и другие плоды природы, значительно улучшающие жизненный уровень населения. Однако, несмотря на технический прогресс, возможность обеспечения сохранности большей части продуктов питания за счет обеспечения перевозки грузов морским транспортом вокруг Азии требует длительных сроков транспортировки. Так, в случае перевозки грузов из северной части Китая, Японии и России в страны Западной Европы возникнет перепробег грузов на 15–25 тыс. км, по сравнению с кратчайшим географическим направлением. Такое резкое увеличение дальности следования грузов вокруг Афри-

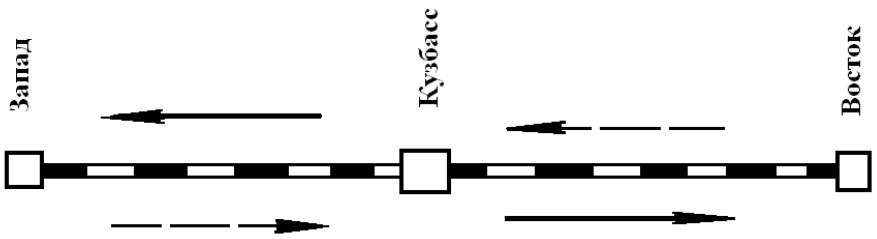


Рис. 7. Схема поездопотоков в стране при наличии грузораздельного пункта на сети железных дорог страны:
– груженые вагонопотоки;
– порожние вагонопотоки

ки, южной части Азии приводит к значительному увеличению сроков доставки грузов и вызывает резкий рост эксплуатационных расходов по перевозке грузов морским транспортом, по сравнению с более коротким путем транспортировки железнодорожным транспортом на континенте.

В то же время, следует учесть, что грузы зарождаются преимущественно на большой территории суши. Чтобы их доставлять до другой части суши континента, необходимо данные грузы доставлять до портов другими видами транспорта, и преимущественно железнодорожным. Поэтому необходимо оценивать эффективность передачи грузов с морского транспорта на железнодорожный между различными точками суши континента, где зарождаются и погашаются потоки грузов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аксененко Н. Е., Дмитренко А. В., Милованов А. И., Поздеев В. Н. Перспективы развития транспорта при переходе к рынку // Ж.-д. трансп. 1993. №2, С. 37–42.
2. Грунтов П. С. и др. Управление эксплуатационной работой и качеством перевозок на железнодорожном транспорте. М. : Транспорт. 1994. 544 с.
3. Дмитренко А. В. Организация поездной работы в условиях высокой грузонапряженности. – М. : Транспорт, 1985. – 40 с.
4. Николашин В. М., Синицына А. С. Основы логистики. Учебник для студентов вузов железнодорожного транспорта. М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2007. – 252 с.
5. Смехов А. А. Основы транспортной логистики. – М. : транспорт, 1995. – 197 с.
6. Логистика: Учебник / под редакцией Б. А. Аникина. – 3-ее изд., перераб. и доп. – М. : ИНФРА-М. 2002. – 368 с.

УДК 621.01 (07)

Жеребцов Вячеслав Александрович,
ст. преподаватель, аспирант, тел. 89144720072,
Забайкальский региональный общий центр обслуживания, г. Чита,
e-mail: ZherebtsovVA@mail.ru

ОРГАНИЗАЦИЯ УЧЕТНОГО ПРОЦЕССА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ, ВНЕДРЯЮЩИХ СИСТЕМУ «БЕРЕЖЛИВОЕ ПРОИЗВОДСТВО»

V.A. Zherebtsov

ORGANIZATION ACCOUNTING PROCESS AT THE ENTERPRISES ARE ADOPTINGING A SYSTEM OF «LEAN PRODUCTION»

Аннотация. *Внедрение бережливого производства невозможно без системных преобразований, в том числе и учете предприятия. Предложено внедрение нового вида учета – бережливого, представлены отличия от традиционных видов учета, этапы внедрения учета, использование новых показателей деятельности предприятия.*

Ключевые слова: *показатели, процесс, система, бережливый учет, бережливое производство.*

Abstract. *The introduction of lean production is not possible without a system of transformations, including accounting and enterprise. A new type of accounting – lean is introducted, difference from traditional accounting, stages of implementation of accounting, the use of new indexes of the enterprise perfomance.*

Keywords: *performance, process, system, lean accounting, lean production.*

Невозможно управлять тем, чего нельзя измерить.

Том Демарко

Эффективность разработки и применения системы менеджмента качества в организациях зависит от большого количества факторов. Не последнюю роль в этом играют применяемые системы учета. Так, традиционная система бухгалтерского учета, законодательно применяемая в орга-

низациях, большей частью направлена на удовлетворение потребностей внешней среды (государственных, налоговых и прочих контролирующих органов). Для производственного использования традиционный учет явно недостаточен и обладает следующими недостатками:

1. Сложность учета и отчетности в восприятии.

2. Учет ретроспективен, т. е. обращен к прошедшему времени, что не дает возможности повлиять на достигнутый результат и малоэффективно для прогнозирования будущего состояния.

3. Ориентация учета на количественные (финансовые) показатели в принятии управленческих решений однобоко и не дает полной картины работы предприятия.

Высказывания всемирно известных гуру качества подтверждают данные недостатки.

Основатель «производственной системы Тойота» Таити Оно предлагал бухгалтерам «изнашивать по две пары ботинок в год», посещая объекты и наблюдая, улучшились ли запасы, эффективность, качество и т. д. и как эти улучшения повлияли на снижение затрат, а в конечном счете – на рост прибыли.

Выступая с докладами о своем опыте, он говорил финансистам: «*Вам не понять, что я собираюсь сказать. Даже если вы это поймете, то не сможете реализовать, поскольку находитесь далеко от гемба. Зная, как вы заняты, я полагаю, что вы не станете терять время и вернетесь к своему рабочему столу, чтобы работать*» [1].

В философии Эдварда Деминга один из пунктов (тезисов) гласит: «разрушайте барьеры». Наличие барьеров между подразделениями, службами, отделениями, не дает возможности персоналу работать в командах и устранять проблемы, которые могут возникнуть с продукцией или услугами. Один из самых высоких барьеров, по его мнению, тот, который возникает между финансовыми и остальными подразделениями компании.

«Слишком часто сотрудники финансовых подразделений компании просто сокращают затраты, полагая, что любые затраты слишком велики. Они могли бы внести настоящий вклад в нашу экономику, если бы изучили новую философию и присоединились к ней, чтобы помочь свершить требуемые перемены» [2].

Р. Каплан и Д. Нортон, создатели системы сбалансированных показателей, в своих книгах также указывают:

«*Сбалансированная система показателей сохраняет традиционные финансовые показатели. Однако финансовые показатели рассказывают нам историю прошлого, историю, адекватную для компаний индустриальной эпохи, когда инвестиции в долговременную стабильность и длительные взаимоотношения с потребителями не были критическим фактором успеха. Но эти финансовые показатели неадекватны для выбора направления и оценки достигнутого при стремлении компаний информационной эпохи к созданию ценностей путем инвестиций в потребителей, поставщиков, работников, в процессы, в технологии, и в нововведения»* [3].

Необходимость изменений в учете привела к разделению бухгалтерского учета на управленческий и финансовый и выделению отдельного учета налогового. При этом недостатки старых систем учета перешли в новые и остаются тормозом развития учетного процесса предприятия.

Проведенные исследования российских предприятий показывают, что 40–50 % всей информации является избыточной, в то время как в учете отсутствует около 50 % необходимой для принятия решений информации.

На помощь российским системам управления пришел поток западных и восточных концепций менеджмента. Одна из таких концепций – *Кайдзен*, или *Непрерывное совершенствование*, – является целой философией бизнеса, вобравшей в себя лучшие инструменты и системы, такие как бережливое производство, JIT, 5С, Канбан и т. д., являющиеся основой модели Всеобщего управления качества (TQM). Благодаря идеям бережливого производства в России на таких предприятиях, как БрАЗ, КАМАЗ, ГАЗ, идет строительство новой производственной системы предприятия, затрагивающего все процессы организации (включая учет), и приводит к формированию нового «*бережливого мышления*».

Применяя в процессах учета инструменты бережливого производства, бухгалтерии предприятий смогут решить наиболее злободневные проблемы, такие как:

- излишняя сложность и бюрократизация процессов, которые влияют на ведение учета и препятствуют передаче информации;
- трудовые и временные затраты и связанная с этим переработка персонала по времени;
- низкая вовлеченность персонала в улучшения;
- наличие лишних трансакций в финансовом и оперативном учете;
- выполнение идентичных или одинаковых учетных операций на различных этапах обработки;
- наличие потерь в действиях сотрудников, которые не создают ценности в учете.

Согласно терминологии бережливого производства все, что не создает ценности, является потерями.

На рис. 1 представлены основные виды потерь, связанные с офисной работой.

Основная цель концепции бережливого производства – выявить и устранить данные потери.

Бухгалтерия в своей работе сталкивается в основном с двумя видами потерь – перепроизводства и ожидания. Рассмотрим, как проявляются потери (муды), и как их можно устранить. Потери от перепроизводства в бухгалтерии заметить сложно, но они есть. Для офисных работ *перепроизводство* заключается в следующем:

- печать документов прежде, чем они необходимы;

- организация процесса учета таким образом, что документы создаются и складываются в подшивку до того, как по ним совершается занесение в учет и бухгалтерская проводка;

- отсутствие оценки эффективности труда в бухгалтерии;

- ресурсы – материалы (накладные, счета), люди, запасы (канцтовары, бланки отчетности) – используются быстрее, чем это необходимо.

Потери от ожидания:

- Ожидание поступления документов, так называемый «синдром конца месяца», является основным фактором неравномерной загрузки, когда значительная часть операций совершается в последние числа месяца. Это явление характерно, прежде всего, для предприятий со сдельной оплатой труда или для предприятий, на которых расчет заработной платы осуществляется на основании производственного объема, выраженного в деньгах. Также в конце месяца идет поступление первичных документов за период от поставщиков, сдача внутренней отчетности от материально ответственных лиц, начисление и отработка прочей документации.

- Ожидание согласования, подписания отчетности и т. д.

Далее в данной статье предлагается внедрение в бухгалтерии проекта «Бережливый офис», с использованием инструментария бережливого производства – систем 5С, VSM-анализа, проведения стандартизации, использования методик «6 Сигм» и визуального менеджмента.

Один из самых простых, но в тоже время эффективных инструментов бережливого произ-

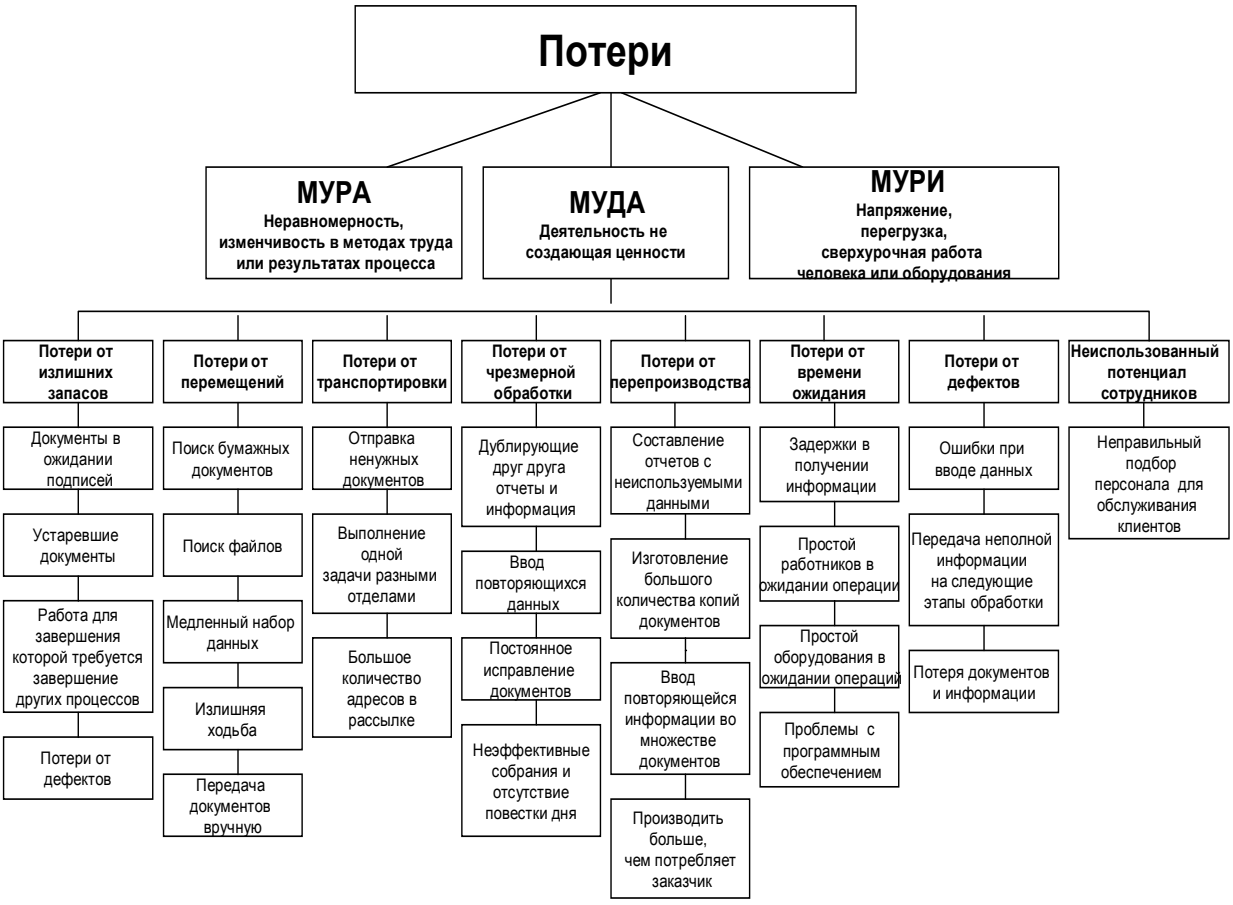


Рис. 1. Основные виды потерь в офисе

водства – система. «*5С» (Five S)* – это система организации рабочего места, основанная на визуальном контроле. Включает в себя пять принципов, каждый из которых по-японски начинается с буквы «С»:

Сортируй (сеири, япон.): отделить нужные инструменты, детали и документы от ненужных с тем, чтобы убрать последние подальше.

Создай свое место (сейтон, япон.): расположить (и маркировать) детали и инструменты на рабочем месте так, чтобы с ними было удобно работать.

Содержи в чистоте (сейсо, япон.): поддерживать чистоту на рабочем месте.

Стандартизируй (сейкецу, япон.): регулярно выполнять сеири, сейтон и сейсо (например, каждый день), чтобы поддерживать рабочее место в отличном состоянии.

Соблюдай, Совершенствуй (сицуке, япон.): сделать выполнение первых четырех «С» привычкой, стандартом работы.

Объектом изменений является занятость работников.

Цели проекта:

• повышение эффективности процессов;

• сокращение переработки персонала;

• повышение норм обслуживания;

• обеспечение вовлеченности персонала в непрерывные улучшения;

• снижение вариабельности учетных процессов.

Этапы реализации проекта представлены в табл. 1.

Кроме представленных в таблице целей и этапов проведения работ по внедрению проекта, необходимо закрепление за каждым этапом ответственных лиц и определение сроков реализации этапов.

Таблица 1

Этапы проекта «Бережливый офис»

№ п\п	Этап проекта	Цель этапа	Ожидаемый результат
1	***Предпроектный этап***		
1.1	Проведение разъяснительной работы с работниками о сущности планируемых изменений	Вовлечение персонала в изменения	Подготовленный к изменениям коллектив
1.2	Назначение ответственных за «проблемные» области	Формирование рабочей группы	Подготовленный к изменениям коллектив
№ п\п	Этап проекта	Цель этапа	Ожидаемый результат
2	***Проектный этап***		
2.1	Визуальный менеджмент	Оформление стенда по повышению качества работы	Вовлечение персонала в изменения
2.2	Составление карт текущего состояния	Оценка текущего состояния	Качественное изменение операций работы бухгалтера
2.3	Составление структурного графика работы бухгалтера	Определение потерь переработок	Снижение потерь рабочего времени, контроль за переработкой
2.4	Внедрение 5С	Повышение эффективности	Вовлечение персонала в изменения, снижение всех видов потерь
2.4.1	Сортировка	Сортировка документов	Вовлечение персонала в изменения
2.4.2	Самоорганизация	Каждому документу свое место	Сокращение времени поиска документов
2.4.3	Систематическая уборка	Создание безупречной рабочей зоны	Вовлечение персонала в изменения,
2.4.4	Стандартизация	Установить правила и стандарты выполнения работ	Повышение дисциплины, поддержка достигнутых изменений
2.4.5	Совершенствование	Поддержка достижений	Наличие новых предложений по улучшению
2.5	Применение инструментов бережливого офиса (5С)	Устранение всех видов потерь	Качественное изменение операций работы
3	***Постпроектный этап***		
3.1	Мониторинг	Контроль за выполнением	Анализ эффективности изменений

Внедрение проекта «Бережливый офис» в бухгалтерии позволит провести:

1) структурный анализ работы бухгалтера;

2) выявление трудозатрат на выполнение операции;

3) определение факторов влияющих на неравномерность загрузки (переработки);

4) стандартизацию работы бухгалтера.

Главной целью проведения политики бережливого производства в бухгалтерии должно стать:

1. Создание «бережливого мышления» работника.

2. Устранение оторванности от общих целей предприятия.

3. Налаживание стабильной обратной связи между учетом и управлением.

«Бережливое мышление» предполагает использование в работе правил успешных улучшений:

- не соглашайтесь с тем, что «нельзя» улучшить;

- улучшения не имеют границ;

- забудьте «идеи фикс» о том, как «надо» работать;

- идея десяти лучше идеи одного;

- не тратьте большие деньги на улучшение;

- проводите улучшение сразу;

- не стремитесь к совершенству, выполните хотя бы 50 % задачи, но сразу;

- думайте о том, как сделать это, а не о том, почему это сделать нельзя.

Полученное высвободившееся рабочее время бухгалтера надо направить на самосовершенствование, повышение квалификации, непосредственное участие в производственных процессах предприятия.

Хочется верить, что проводимые мероприятия помогут создать из *бухгалтера–счетовода* и простого регистратора фактов хозяйственной деятельности *бухгалтера-универсала,* владеющего знаниями по разным участкам учета, и *бухгалтера-аналитика,* умеющего работать с полученной информацией и принимающего непосредственное участие в построении «бережливого предприятия».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Синго С. Изучение производственной системы Тойоты с точки зрения организации производства / Пер. с англ. — М.: Институт комплексных стратегических исследований, 2006.
2. Генри Р. Нив. Пространство доктора Деминга. Принципы построения устойчивого бизнеса/ Пер. с англ. — М.: Альпина Бизнес Букс, 2005.
3. Каплан Р., Нортон Д. Сбалансированная система показателей. От стратегии к действию/ Пер. с англ. – М.: «Олимп-Бизнесс», 2003.

УДК 330.322

Викулова Евгения Юрьевна,
к. э. н., доцент кафедры «Экономика»
Забайкальского института железнодорожного транспорта

ИНВЕСТИЦИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ РЕГИОНА

E.Yu. Vikulova

INVESTIVE POTENTIAL OF THE REGION

Аннотация. *Рассмотрены понятия «инвестиционный потенциал», «инвестиционная привлекательность», научные подходы к определению инвестиционного потенциала региона. Представлена характеристика инвестиционного потенциала Забайкальского края.*

Ключевые слова: *инвестиционный потенциал, инвестиционный проект.*

Abstract. *Concepts «investment potential», «investment appeal», scientific approaches to definition of investment potential of region are considered. The characteristic of investment potential of the Transbaikalian region is presented.*

Keywords: *investment potential, the investment project.*

Экономика России в настоящее время требует активизации инвестиционных процессов во всех субъектах Российской Федерации, что возможно путем повышения инвестиционной привлекательности отдельных регионов.

В научной экономической литературе зачастую понятия «инвестиционная привлекательность» и «инвестиционный потенциал» являются приблизительно тождественно равными.

Термин «инвестиционная привлекательность» региона (района) трактуется как совокупность объективных и субъективных характеристик региона, влияющих на результаты инвестиционной деятельности и определяющих положение региона для субъекта инвестирования. Инвестици-

онный потенциал – это количественная характеристика, учитывающая основные макроэкономические характеристики, насыщенность территории факторами производства (природными ресурсами, рабочей силой, основными фондами, инфраструктурой), потребительский спрос населения и другие показатели. По нашему мнению, понятие «инвестиционный потенциал» является одной из составляющих инвестиционной привлекательности региона, другой – инвестиционный климат. Таким образом, понятие «инвестиционная привлекательность» рассматривается шире понятия «инвестиционный потенциал».

Региональный инвестиционный потенциал представляет собой упорядоченную совокупность инвестиционных ресурсов, расположенных на определенной территории, позволяющую добиться ожидаемого эффекта при их использовании. Существует несколько подходов к трактовке данного термина. Отраслевой подход базируется на исследованиях Т.С. Хачатурова и В.П. Красовского, которые проводят аналогию между инвестиционным потенциалом и комплексом фондосоздающих отраслей. По их мнению, в комплекс фондосоздающих отраслей помимо строительной индустрии, осуществляющей строительные работы и монтаж оборудования, входят также производство машин и оборудования для новых, расширяемых и реконструируемых предприятий и производство конструкционных материалов и строительных машин, используемых в капитальном строительстве.

Ресурсный подход к трактовке понятия «инвестиционный потенциал» изложен в работах Ф.С. Тумусова. По его мнению, инвестиционный потенциал – это «совокупность инвестиционных ресурсов, составляющих ту часть накопленного капитала, которая представлена на инвестиционном рынке в форме потенциального инвестиционного спроса, способного и имеющего возможность превратиться в реальный инвестиционный спрос, обеспечивающий удовлетворение материальных, финансовых и интеллектуальных потребностей воспроизводства капитала».

Результативный подход базируется на оценке экономических результатов текущей и будущей хозяйственной деятельности, а потенциал трактуется как способность к достижению максимального результата.

Основываясь на ресурсном подходе, на наш взгляд, инвестиционный потенциал представлен

- ресурсно-сырьевым потенциалом (средневзвешенная обеспеченность балансовыми запасами основных видов природных ресурсов);
- производственным потенциалом (совокупный результат хозяйственной деятельности);
- инфраструктурным (экономико-географическое положение региона и его инфраструктурная обустроенность);
- интеллектуальным или кадровым (образовательный уровень населения или наличие и качество трудовых ресурсов в регионе);
- институциональным (степень развития ведущих институтов рыночной экономики);
- инновационным (уровень внедрения достижений научно-технического прогресса в регионе).

В большинстве методик определения инвестиционного потенциала авторы стремятся увеличить количество его частных потенциалов с тем, чтобы более точно учесть все региональные особенности и дать его количественную характеристику. В данных исследованиях мало внимания уделяется специфике самих инвестиционных ресурсов, их значимости в будущем развитии региона и страны в целом. Таким образом, инвестиционный потенциал региона сегодня не будет равен инвестиционному потенциалу в будущем. Это зависит не только от инвестиционной привлекательности региона и развитости инвестиционной инфраструктуры, но и от исчерпаемости некоторых инвестиционных ресурсов, в частности ресурсно-сырьевых и частично кадровых. Внешняя политика государства также может быть переориентирована на иных политических партнеров, что коренным образом изменяет инфраструктурный потенциал региона и его роль во внешнеэкономических связях.

На сегодняшний день многие приграничные регионы, имеющие по этой позиции инвестиционных потенциалов преимущество, относятся к наиболее бедным и социально неблагополучным субъектам Российской Федерации. Кроме того, многие регионы Сибири и Дальнего Востока относятся к дотационным субъектам Российской Федерации, обладая богатейшими запасами минерально-сырьевых ресурсов. Поэтому при рассмотрении инвестиционного потенциала региона необходимо рассматривать специфику инвестиционных ресурсов как в настоящем, так и в перспективном развитии, а также в сравнении с другими регионами, обладающими аналогичными особенностями инвестиционного потенциала. Разница между инвестиционным потенциалом региона сегодня и инвестиционным потенциалом в будущем может характеризовать перспективу его динамики движения.

Оценивая инвестиционный потенциал Забайкальского края, можно сделать следующие выводы. Забайкальский край имеет приграничное положение. На юго-востоке регион граничит с Китайской Народной республикой, на юге с Монголией. Население региона составляет 1117 тыс. человек, из них городского населения – 712,5 млн чел., сельского – 404,5 млн чел.

Забайкальский край богат разнообразными минерально-сырьевыми ресурсами и перспективными транспортными выходами на рынки Азиатско-Тихоокеанского региона. По природно-

ресурсному рангу инвестиционного потенциала Забайкальский край занимает первое место среди всех регионов России, второе место занимает Республика Саха (Якутия). В недрах края содержится 42 % разведанных запасов плавикового шпата России, 31 % циркония; 28 % молибдена, 21 % меди; 18 % титана, 13 % серебра и 12 % свинца. В числе крупнейших месторождений Забайкальского края Удоканское, Быстринское, Лугоканское, Култуминское (медь), Тасеевское (золото), Ново-Широкинское (полиметаллы с золотом и серебром), Чинейское (железо, ванадий, медь, никель, платина). Для преобразования природно-ресурсного потенциала в производственный необходимо развивать инвестиционную инфраструктуру в регионе, в том числе транспортную, особенного на юго-востоке края для скорейшего освоения минерально-сырьевых ресурсов.

В 2010 году объем валового регионального продукта, по оценке, составит 172018,1 млн руб, что практически на 12 % выше показателя 2009 года. В структуре валового регионального продукта наибольший удельный вес занимают другие виды деятельности, затем транспорт и связь, далее оптовая и розничная торговля.

В общем объеме промышленного производства ведущее место занимает добыча полезных ископаемых, производство и распределение электроэнергии и газа. В структуре обрабатывающих производств наиболее развитыми видами деятельности являются пищевая промышленность, производство строительных материалов, металлургическое производство и машиностроение.

Во внешнеэкономической деятельности за период 2008–2010 гг. прослеживается динамика снижения внешнеторгового оборота, в частности сокращения экспортных поставок древесины в КНР, а также импорта. Основу товарной структуры экспорта до 2009 года составляла древесина и изделия из неё, в настоящий момент времени это металл, изделия из него, природно-сырьевые ресурсы. Основу импорта составляют продовольственные товары и сельскохозяйственное сырье; машины, оборудование и транспортные средства; металлы и изделия из них.

Транспортная составляющая в крае представлена автомобильным, железнодорожным и воздушным видами транспорта, а также пассажирским речным транспортом. Протяженность автомобильных дорог общего пользования с твердым покрытием 16 тыс. км. Основные автомобильные дороги проходят в центральных и юго-восточных районах Забайкальского края, обеспечивая выход на Транссибирскую магистраль. Железнодорожный транспорт является ведущим по объему грузооборота. Протяженность железных дорог региона составляет 2,4 тыс. км. Железнодорожная сеть представлена Забайкальским участком Транссибирской магистрали и Байкало-Амурской магистралью. В краевом центре, г. Чите, расположен международный аэропорт. Взлетно-посадочная полоса позволяет принимать все типы воздушных судов. Через территорию края проходят кроссполярные воздушные трассы (над акваторией Северного Ледовитого океана). В период навигации осуществляются пассажирские перевозки по р. Шилка, протяженность маршрута составляет 134 км.

Продолжается развитие транспортных путей региона. С 2007 года на территории региона реализуется проект создания транспортной инфраструктуры для освоения полиметаллических месторождений юго-востока Забайкальского края, в его рамках идет строительство железнодорожной ветки Нарын–Лугокан протяженностью 375 км. В 2007–2009 гг. производилась реконструкция участка железной дороги Карымская–Забайкальск, строительство федеральной автомобильной дороги «Амур» Чита–Хабаровск и строительство участков автомобильной дороги Чита–Забайкальск.

В сфере инвестиционной деятельности Забайкальский край среди других регионов России занимает лишь 46 место из 83 субъектов. В 2008 году объем инвестиций (в основной капитал) за счет всех источников финансирования составил 47445,2 млн руб., в 2009 г. – 39794,1 млн руб., в 2010 г. по оценке составит 39429,29 млн руб. Динамика снижения объясняется экономическим кризисом, нехваткой финансовых средств у инвесторов и «замораживанием» инвестиционных проектов. В отраслевой структуре инвестиций преобладают инвестиции в транспорт и связь, далее в строительство, что формирует инвестиционную инфраструктуру, способствующую росту инвестиционной привлекательности региона.

Несмотря на богатейшие запасы природно-сырьевых ресурсов Забайкальский край имеет инвестиционный рейтинг 3С1, что означает пониженный потенциал – высокий риск. По инвестиционному потенциалу регион в 2008 году занимал 51-е место, по факту 2009 года – 46-е, поднявшись на 5 позиций. При этом по показателю инвестиционного риска край занимает только 74-е место. Наименьший инвестиционный риск – законодательный, наибольший – управленческий.

Рассматривая инвестиционный потенциал Забайкальского края по составляющим, финансовые аналитики «S&P» и журнал «Эксперт» по итогам 2009 года присвоили следующие ранги: трудовой потенциал – 56-е место; потребительский потенциал – 52-е; производственный потенциал – 67-е; финансовый потенциал региона – 54-е; институциональный – 65-е; инновационный потенциал – 40-е место; инфраструктурный – 67-е; природно-ресурсный потенциал – 1-е место; туристический – 30-е место.

По рейтингу финансовой устойчивости регион относится к группе умеренного спада, по рейтингу экономической устойчивости – к группе значительного спада, по рейтингу социальной устойчивости – к группе умеренного спада и по комплексному рейтингу антикризисной устойчивости – к группе умеренного спада.

В 2010 году Президент РФ Дмитрий Медведев обозначил пять приоритетных направлений в развитии Забайкальского края:

1) развитие транспортной инфраструктуры за счет создания системы транспортных коридоров и улучшение логистических возможностей, создание системы логистических центров;

2) комплексное освоение минерально-сырьевой базы;

3) развитие строительной индустрии и жилищного строительства;

4) развитие малого и среднего бизнеса;

5) развитие социальной инфраструктуры.

Основным документом, регулирующим вопросы государственной поддержки инвесторов в регионе, является Закон «О государственной поддержке инвестиционной деятельности». Данный документ является одним из основных нормативно-правовых актов, формирующих благоприятный инвестиционный климат на территории края. Законом определены основные формы государственной поддержки:

- предоставление налоговых льгот в соответствии с Налоговым кодексом Российской Федерации и законами субъекта Российской Федерации;
- предоставление льгот по аренде имущества, являющегося государственной собственностью субъекта РФ;
- субсидирование за счет средств регионального бюджета части процентной ставки за пользование кредитом;
- субсидирование за счет средств регионального бюджета лизинговых платежей в части дохода лизингодателя;
- субсидирование за счет средств регионального бюджета части вознаграждения за предоставление банковской гарантии;
- субсидирование за счет средств регионального бюджета части затрат на уплату купонов по корпоративным облигационным займам;
- предоставление государственных гарантий по инвестиционным проектам за счет средств регионального бюджета;
- предоставление инвестиций в уставной капитал.

В настоящее время на территории края реализуются следующие инвестиционные проекты, которым присвоен статус регионального значения:

- проект освоения Верхне-Чинейского участка Чинейского месторождения комплексных руд;
- проект освоения Голевского месторождения сынныритов, добыча сынныритов для производства калиевых бесхлорных удобрений;
- проект освоения участка «Контактовый» Чинейского месторождения комплексных руд;
- проект освоения Кручининского месторождения апатит-титаномагнетитовых руд;
- проект освоения Зашулакского месторождения каменного угля;
- проект освоения Нижне-Сакуканского участка Чарского месторождения железных руд;
- проект освоения участка «Сквозной» Чинейского месторождения комплексных руд;
- проект освоения Читкандинского месторождения каменного угля;
- проект освоения Южно-Сулуматского участка Чарского месторождения железных руд;
- проект комплексного освоения месторождений юго-востока Забайкальского края;
- проект создания Могойтуйской промышленной зоны на территории Агинского Бурятского округа.

Таким образом, инвестиционный потенциал региона, его будущее развитие связаны с освоением природных и минерально-сырьевых ресурсов, что в дальнейшем должно стать катализатором для развития таких составляющих инвестиционного потенциала, как трудовой, производственный, потребительский и финансовый потенциалы. Для чего сегодня необходимо в крае развивать транспортную и инвестиционную инфраструктуру, делая регион инвестиционно привлекательным для потенциальных инвесторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Климова, Н.И. Инвестиционный потенциал региона / РАН. – Екатеринбург, 1999.
2. Прогноз социально-экономического развития Забайкальского края на 2011 год и плановый период 2012 и 2013 годов. Одобрен распоряжением Правительства Забайкальского края 26 октября 2010 года № 597-р.
3. Тумусов Ф.С. Инвестиционный потенциал региона: теория, проблемы, практика. – М. : Экономика, 1999. – 272 с.
4. Хачатуров, Т.С. Эффективность капитальных вложений. – М. : Экономика, 1979. – 336 с.

УДК 658.3 65.01

Лескова Татьяна Михайловна,
д. э. н., профессор, доцент кафедры «Экономика»,
Забайкальский институт железнодорожного транспорта
Черникова Елена Сергеевна,
ст. преподаватель, кафедра «Экономика»,
Забайкальский институт железнодорожного транспорта

КАДРОВАЯ ПОЛИТИКА ОАО «РЖД» В УСЛОВИЯХ КРИЗИСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА

T.M. Leskova, E.S. Chernikova

PERSONNEL SELECTION OF OPEN SOCIETY «RUSSIAN RAILWAY» IN THE CONDITIONS OF CRISIS WITH USE OF SYSTEM OF A QUALITY MANAGEMENT

Аннотация. *Охарактеризовано понятие кадровой политики, представлен алгоритм кадрового планирования в системе обеспечения потребности в кадрах на примере Забайкальской железной дороги. Рассмотрены аспекты деятельности ОАО «РЖД» и Забайкальской железной дороги по привлечению и использованию кадрового потенциала с применением системы менеджмента качества.*

Ключевые слова: *кадровая политика, система менеджмента качества.*

Abstract. *The concept of personnel selection is characterised, the algorithm of personnel planning in system of maintenance of requirement for shots on an example of the Transbaikalian railway is presented. Aspects of activity of Open Society «Russian Railway» and the Transbaikalian railway on attraction and use of personnel potential with application of system of a quality management are considered.*

Keywords: *personnel selection, quality management system.*

Каждое предприятие имеет собственные приоритеты в области управления персоналом, которые составляют основу политики управления персоналом.

Под политикой управления персоналом понимают совокупность взглядов, целей, средств и методов, определяющих и обеспечивающих потребности предприятия в персонале. Разработке политики предприятия в области управления персоналом предшествует значительная аналитическая работа.

Возрастание роли кадровой политики на железнодорожном транспорте вызвано коренными изменениями экономических и социальных условий, в которых функционирует отрасль.

Для разработки и реализации фирменной кадровой политики по разработке системы обеспечения потребностей Забайкальской железной дороги в квалифицированном персонале ключевое значение приобретает философия предприятия, которая определяет «дерево целей», а следовательно, и содержание стратегий менеджмента, позволяющих согласовывать и уравновешивать интересы работодателей и работополучателей.

Внедряемая система управления качеством в ОАО «РЖД» (в том числе на основе стандартов ISO серии 9000) включает ряд принципов, прямо касающихся персонала и системы управления им, в частности, принципы лидерства, вовлеченности, командной работы, непрерывного совершенствования деятельности холдинга. В этой связи в Стратегию развития кадрового потенциала системно встраиваются те задачи, которые диктуются международными и российскими стандартами, функциональной стратегией управления качеством, в частности, внедрение ряда конкретных механизмов развития работников, оценки их деятельности и мотивации на постоянные улучшения, реализация принципа лидерства руководителей.

Основная цель менеджмента заключается в том, чтобы предоставить работающим рабочие места в нужное время и в необходимом количестве в соответствии как с их способностями и склонностями, так и с требованиями производства. Рабочие места, с точки зрения производительности и мотивации, должны позволить работающим оптимальным образом развивать свои способности, обеспечивать эффективность труда и отвечать

требованиям создания достойных человека условий труда и обеспечения занятости.

Современная стратегия в области менеджмента персонала на Забайкальской железной дороге предполагает четкое определение приоритетов научных исследований проблем привлечения и развития персонала, а также разработку современных технологий решения кадровых проблем, среди которых разработка алгоритма кадровой политики в системе обеспечения потребности в персонале Забайкальской железной дороги – филиала ОАО «РЖД». Алгоритм кадрового планирования в системе обеспечения потребности в кадрах на примере Забайкальской железной дороги представлен на рис. 1.

Ускорить работу по разработке политики

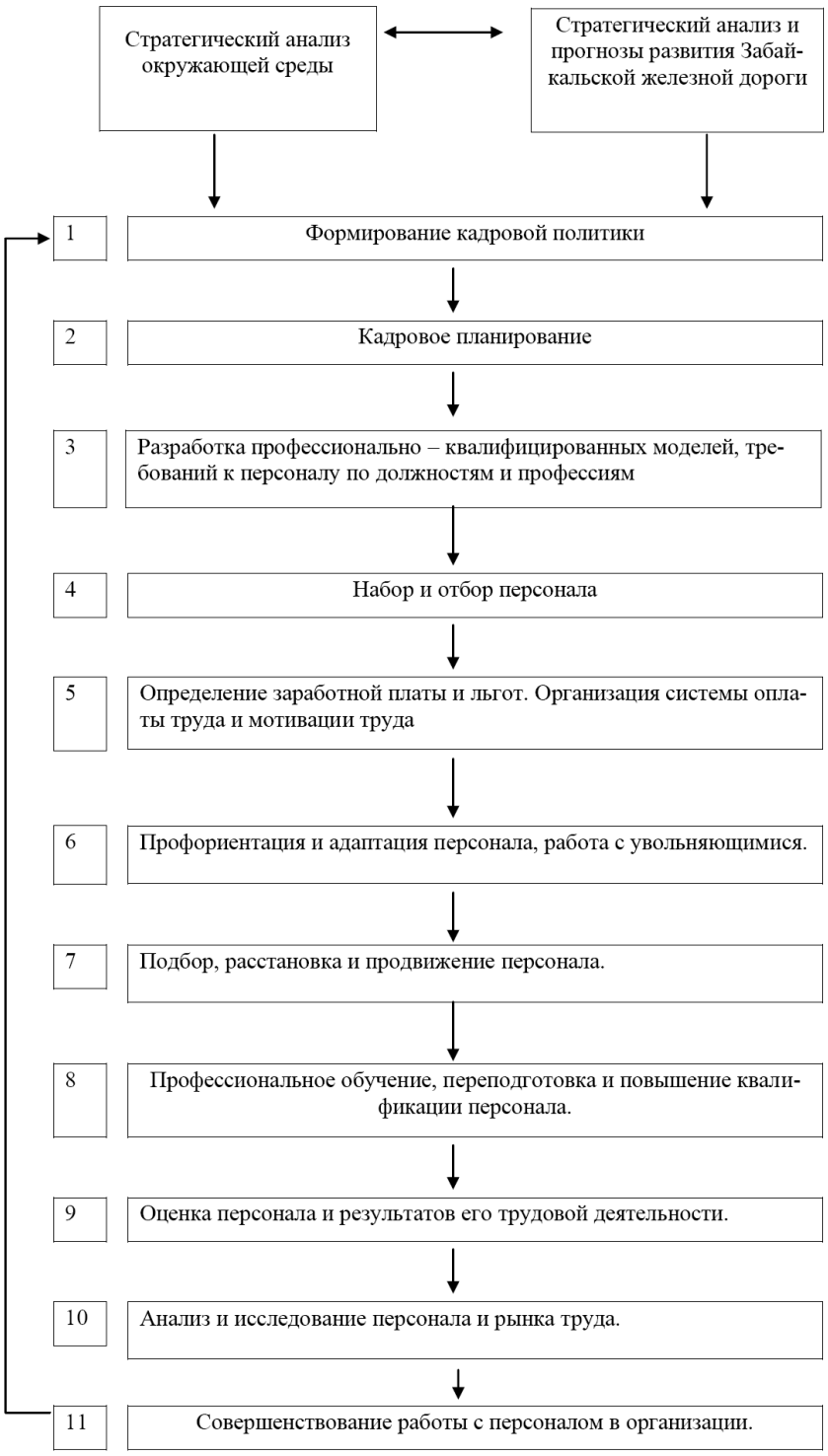


Рис. 1. Алгоритм кадрового планирования в системе обеспечения потребности в кадрах

предприятия в области управления персоналом позволяет глубокий, комплексный анализ положения дел на предприятии – так называемый SWOT-анализ, который является одним из основных инструментов, используемых в системе менеджмента качества. Исходя из всесторонней оценки, как внешнего окружения, так и внутреннего состояния предприятия и сделанных на этой основе выводов становится возможным формулирование концепции его развития. На основе концепции осуществляется корректировка взглядов и целей руководства относительно дальнейшего развития предприятия. Уточнение взглядов и целей позволяет выработать стратегию развития предприятия, в том числе и области управления персоналом на последующий период.

Анализ влияния состояния кадров на выполнение стратегической задачи Забайкальской железной дороги с помощью SWOT-анализа выглядит следующим образом.

Сильные стороны:

- стабильность функционирования железнодорожного транспорта;
- рост доли объема перевозок на региональном рынке грузовых перевозок;
- ОАО «РЖД», один из крупнейших работодателей региона среди российских и западных компаний;
- решение индивидуальных проблем работников дороги групповым методом (предоставление социального пакета);
- наличие профессионально подготовленного технического персонала.

Слабые стороны:

- недостаточная мотивация персонала;
- падение престижа профессии железнодорожника;
- низкая механизация труда;
- высокий удельный вес тяжелого и низкоквалифицированного труда на ремонте и содержании подвижного состава и других производствах;
- ограниченность применения на железной дороге женского труда.

Возможности:

- повышение конкурентоспособности;
- привлечение иностранной рабочей силы (применение прорывных технологий)
- развитие организационной культуры;
- передача непрофильных видов работ в аутсорсинговые компании;
- социальное партнерство Забайкальской железной дороги и Дорпрофсож;
- концепция жилищной политики;
- молодежная программа.

Угрозы:

- сокращение численности населения региона, в том числе трудоспособного;
- рост потребности развивающихся отраслей региона в квалифицированных специалистах и рабочих;
- высокие требования к состоянию здоровья для работы на железной дороге.

Сильные и слабые стороны внешней и внутренней среды Забайкальской железной дороги в такой же мере, как угрозы и возможности, определяют условия выполнения задачи по обеспечению кадрами.

При рассмотрении парных комбинаций: сила и возможности; сила и угрозы; слабость и возможности; слабость и угрозы, выделяются те, которые должны быть учтены при формировании кадровой политики.

Используя «силу и возможности», предусматривают использование сильных сторон Забайкальской железной дороги, чтобы получить отдачу от возможностей:

- стабильность функционирования железной дороги повышает конкурентоспособность в обеспечении кадрами;

- являясь крупнейшим работодателем, дорога привлекает иностранную рабочую силу;

- профессионально подготовленный персонал дает возможность передачи непрофильных работ в аутсорсинговые компании.

Рассматривая «слабость и возможности», разрабатывают меры по преодолению слабости за счет появившихся возможностей:

- повышение мотивации персонала за счет социального партнерства с профсоюзами;
- вовлечение персонала в процессы;
- повышение механизации труда за счет изменения технологии перевозочного процесса;
- реализация концепции жилищной политики с тем, чтобы привлечь на дорогу высококвалифицированных специалистов.

Комбинация «силы и угрозы» предполагает использование силы для устранения угроз:

- стабильность функционирования железнодорожного транспорта обеспечивает сохранение и поддержание здоровья работников за счет содержания профилактических и лечебных учреждений;
- решение индивидуальных проблем работников дороги групповым методом (социальные пакеты).

Анализируя последнюю комбинацию «слабости и угрозы», предполагают избавление от слабостей и предотвращение угроз посредством управления рисками.

Стратегические подходы к развитию кадрового потенциала нашли отражение в функцио-

нальной стратегии развития кадрового потенциала ОАО «РЖД». Данная функциональная стратегия разработана в порядке детализации и расширения положений стратегической программы развития ОАО «РЖД» в области управления персоналом и повышения качества использования человеческих ресурсов, в соответствии с требованиями внедряемой в ОАО «РЖД» системы менеджмента качества.

Реализация функциональной Стратегии развития кадрового потенциала в 2006–2010 гг. способствовала созданию надежных механизмов, которые позволили достичь главной стратегической цели – обеспечение потребности холдинга «Российские железные дороги» в квалифицированном персонале и эффективное развитие кадрового потенциала на среднесрочную перспективу. Базовые задачи в основном выполнены, достигнуто большинство прогнозных показателей.

Сформирована действенная система управления персоналом, позволяющая оперативно и эффективно решать задачи кадрового обеспечения и корпоративного развития персонала в рамках нормативно-правовой базы и среднесрочных приоритетов.

В целом Забайкальская железная дорога на 1 января 2010 г. квалифицированными кадрами на выполняемый объем работы укомплектована на 97,5 %. Оптимизирован качественный и количественный состав персонала с учетом региональных и профессиональных особенностей, усилена его инженерная составляющая. Так, по локомотивному хозяйству укомплектованность локомотивными бригадами составляла 95,2 %; по вагонному хозяйству – 97 %, по путевому хозяйству – 95,6 %

На этой основе обеспечен запланированный рост производительности труда. Накоплен опыт внутрикорпоративной ротации персонала в процессе реформирования, создаются базы данных, позволяющие эффективнее использовать персонал.

Создана целостная система подготовки, переподготовки и повышения квалификации персонала на основе сотрудничества с университетскими комплексами железнодорожного транспорта, с другими ведущими российскими образовательными учреждениями, использования собственных корпоративных образовательных ресурсов.

Получил развитие комплекс мотивационных мероприятий материального и нематериального характера, учитывающий наиболее важные аспекты труда, влияющие на заинтересованность персонала в улучшении производственных и качественных показателей. Предпринимаются меры к росту вовлеченности персонала в решение задач Компании за счет улучшения внутренних коммуникаций, системы информирования работников о деятельности компании и структурных подразделений.

Сложилась единая корпоративная система социальной поддержки работников, медицинского и жилищного обеспечения, содействия культурному развитию и оздоровлению.

Реализуется молодежная политика Компании, осуществляются корпоративные программы поддержки пенсионеров и ветеранов железнодорожного транспорта, нацеленные на сохранение и преумножение традиций железнодорожного транспорта.

Персонал успешно адаптировался к корпоративным условиям, сложился базис корпоративной культуры, корпоративных ценностей.

Функциональная стратегия развития кадрового потенциала продолжает оставаться важнейшим документом, основой системной работы в сфере управления персоналом. Однако в период 2006–2010 гг. за счет достигнутых в ходе реализации Стратегии результатов появились новые точки потенциального роста, существенно изменились факторы внутренней и внешней среды, в условиях кризиса возникли дополнительные экономические риски, что в совокупности диктует необходимость актуализации задач развития кадрового потенциала.

Основу концепции кадровой политики в условиях кризиса составляет обеспечение выживаемости организации в результате более высоких темпов формирования и развития ее кадрового потенциала по сравнению с изменениями внешней среды и других объективных факторов.

Иначе говоря, задача состоит главным образом в адаптации персонала не к изменениям внешних факторов, а к скорости этих изменений, в опережении их.

Рыночная экономика предъявляет жесткие требования к управлению персоналом, поскольку организация и ее персонал функционируют в условиях неопределенности и риска. Отсюда особая значимость управления персоналом, высокая ответственность кадровых служб.

Стратегия управления персоналом кризисной организации включает комплекс мер, реализуемых руководством и направленных на мобилизацию кадрового потенциала организации в сжатые сроки. Следует обратить внимание на то, что, как правило, кризисы характеризуются сокращением объемов производства, высвобождением персонала, снижением заработной платы – это классические проявления кризиса. Вместе с тем, возникают локальные ситуации в различных отраслях, приводящие к проблемам использования кадрового потенциала, но по совсем противоположным причинам.

Так, кризис 2008 года привел к ситуации на железнодорожном транспорте, когда значительно увеличились объемы перевозок по Транссибу в восточном направлении по причинам неплатежеспособности европейских клиентов и увеличением спроса на ряд грузов в странах азиатско-тихоокеанского бассейна. В связи с этим, в 2009 году значительно превысивший уровень 2008 года грузопоток вызвал необходимость строительства и ввода в эксплуатацию парка «Д» на станции Карымская, что способствовало увеличению пропускной способности крупных составов. Кроме того, в плановом порядке построен и введен в эксплуатацию нефтеналивной терминал на станции Сковородино для обеспечения перевозок нефти со станции Сковородино в бухту Козьмино. В связи с этим введены 1163 дополнительных штатных единицы по основным хозяйствам дороги, из них по локомотивному хозяйству 889 единиц.

Существенное увеличение объема работ за короткий отрезок времени потребовало нового подхода к комплектованию дороги кадрами. Принимались меры по приему работников локомотивных бригад и ремонтного персонала. Всего принято 1102 помощника машиниста локомотива и 486 слесарей по ремонту локомотивов и вагонов.

В соответствии с Постановлением Правительства РФ от 31.12.2008 г. № 1089 на Забайкальской железной дороге – филиале ОАО «РЖД» организованы мероприятия, направленные на снижение напряжённости на рынке труда, в т. ч. опережающая профессиональная подготовка, временное трудоустройство и стажировка выпускников образовательных учреждений, ищущих работу, в целях приобретения опыта работы. Дорогой заключены договоры с Государственной службой занятости населения Забайкальского края «О предоставлении субсидий на реализацию мероприятий по снижению напряженности на рынке труда Забайкальского края в 2009 году». В 2009 году данными мероприятиями было охвачено 1064 участника программ. Размер софинансирования мероприятий службой занятости составил 6,5 млн рублей. Данные мероприятия уже были предусмотрены функциональным проектом «Разработка системы обеспечения потребности Забайкальской железной дороги – филиала ОАО «РЖД» в квалифицированном персонале и развитии кадрового потенциала», что значительно облегчило выполнение задачи комплектования дороги кадрами.

Одной из ключевых функциональных задач по развитию кадрового потенциала ОАО «РЖД» является непрерывное развитие персонала и переход к обучающейся организации, имеющей эффективную по результатам и используемым ресурсам систему непрерывного индивидуализированного обучения и профессионального развития персонала.

Ежегодно дорога определяет перспективные объемы подготовки, переподготовки и повышения квалификации работников дороги. Оценка потребности в обучении персонала проводится на основе штатных расписаний структурных подразделений, фактической численности персонала, показателей работы с кадрами структурных подразделений в целом.

Планирование объемов подготовки, переподготовки и повышения квалификации рабочих кадров на Забайкальской железной дороге осуществляется службой управления персоналом совместно с отраслевыми службами и дирекциями, исходя из фактической потребности структурных подразделений в квалифицированных кадрах. Службы дороги, определяя численность контингента на планируемый год, учитывают перспективы развития подведомственных подразделений, задания по производительности труда, поступление новой техники и многие другие факторы.

За 2010 год на Забайкальской железной дороге было обучено 3491 рабочий, что составило 150 % от годового плана. Значительное перевыполнение плана связано, в первую очередь, с резким возрастанием объемов перевозимых грузов и, как следствие, дополнительной потребностью в подготовке рабочих кадров, обеспечивающих перевозочный процесс. В течение 2011 года значительно увеличивается объем подготовки рабочих кадров. Так, на 1 мая 2011 г. план по обучению уже перевыполнен по следующим профессиям: помощник машиниста локомотива – на 175 %, осмотрщики вагонов и осмотрщики-ремонтники вагонов – на 86 %, слесари по ремонту подвижного состава (вагоны) – на 70 %, составители поездов – на 392 % (почти в четыре раза), монтеры пути – на 98 %, электромонтеры контактной сети – 245 %. По программам повышения квалификации в 2010 году прошли обучение 6525 рабочих, что составляет 102 % от годового плана.

Переподготовка и повышение квалификации руководителей и специалистов осуществляется в соответствии с ежегодно заключаемыми договорами и планами обучения с образовательными учреждениями железнодорожного транспорта, учреждениями дополнительного профессионального образования, иными образовательными учреждениями.

Всего за 2010 год повысили квалификацию 2229 человек, или 118 %. Значительное перевыполнение плана повышения квалификации руководителей и специалистов связано с внедрением и опробованием новых систем обучения – в очно-дистанционном режиме, в формате модульных видеоклассов, а также внеплановым обучением

системе менеджмента качества и лидерства на шестом каскадном уровне руководителей среднего звена совместно с центром ООО «Приоритет-стратегия», г. Нижний Новгород.

Забайкальская железная дорога заинтересована в повышении уровня профессионализма персонала. Для реализации этого стремления дорога создаёт благоприятные условия для обучения, профессионального развития и саморегуляции работников во всех структурных подразделениях.

Они включают в себя обучение и повышение квалификации персонала, формирование механизмов планирования карьеры, совершенствование работы с кадровым резервом, а также развитие и совершенствование материально-технической базы дорожных технических школ.

Так, согласно проекту «Обновление основных фондов Забайкальской железной дороги» производились работы по объекту «Реконструкция полигона дорожной технической школы № 1 на ст. Чита». Для удовлетворения возрастающей потребности дороги, дирекций и дочерних предприятий Южного хода в подготовке и переподготовке рабочих кадров приказом начальника дороги создан Борзинский Центр обучения в составе Дорожной технической школы № 1.

Эти действия вытекают из функционального проекта по развитию и использованию кадрового потенциала на Забайкальской железной дороге, разработанного в рамках внедрения системы менеджмента качества.

Антикризисное управление персоналом должно учесть целый спектр вопросов адаптации сотрудника к внешним и внутренним условиям функционирования и развития предприятия. Особое внимание должно уделяться анализу мотивационных установок, умению их формировать и направлять в соответствии с задачами, стоящими перед организацией. Сюда же следует отнести проблемы взаимодействия руководителей организации с профсоюзами и службами занятости, обеспечение безопасности персонала, разработку принципиально новых подходов к приоритету ценностей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кане М.М. Системы, методы и инструменты менеджмента качества: Учебник для вузов / М.М Кане, Б.В. Иванов, В.Н. Корешков, А.Г. Схиртладзе. Издательство: Питер, 2009. – 560 с.
2. Кондо И. Мотивация персонала – ключевой фактор менеджмента. / Под. ред. И.Кондо. – Н. Новгород: СМЦ «Приоритет», 2007 – 206 с.
3. Лапидус В.А. Всеобщее качество (TQM) в российских компаниях. – М. : Новости, 2002. – 432 с.
4. Лукашевич, В.В. Основы управления персоналом: учебное пособие для вузов / В.В. Лукашевич. – М. : КНОРУС, 2008. – 240с.
5. Рогожин, М.Ю. Управление персоналом/М.Ю. Рогожин. – Изд. 2-е – М. : Издательство ИндексМедиа, 2007. – 304с
6. Функциональная стратегия развития кадрового потенциала ОАО «РЖД».

УДК 621.314.632

Михеев Алексей Александрович,
аспирант Иркутского государственного технического университета (ИрГТУ), кафедра электропривода и электрического транспорта, тел. 89086411111, e-mail: gosu87@bk.ru

СПОСОБ КОМБИНИРОВАННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ В ЛЕСОСУШИЛЬНОЙ КАМЕРЕ

A.A. Mikheev

THE METHOD OF COMBINED CIRCULATION IN TIMBER DRYING CHAMBER

Аннотация. *Рассматривается задача разработки автоматизированной системы управления лесосушильной камерой с естественной циркуляцией, с применением осциллирующих режимов и периодического продува камеры при помощи вентилятора.*

Ключевые слова: *сушильная камера, комбинированная циркуляция, энергосберегающий электропривод, осциллирующие режимы сушки, прогрев, продув, экспериментальная установка.*

Abstract. *We consider the problem of developing an automated control system of timber drying chamber with natural circulation, with the use of oscillating modes and periodic camera blow using a fan.*

Keywords: *drying chamber, combined circulation, energy-efficient electric drive, oscillating modes of drying, heating, blowing, experimental plant.*

Введение

В деревообработке одним из самых энергозатратных технологических процессов является камерная сушка пиломатериалов. При этом разукрупнение деревообрабатывающей промышленности, произошедшее в период рыночных реформ, потребовало создания простых, недорогих, надежных в эксплуатации лесосушильных камер сравнительно небольшой производительности (от 500 до 3000 м^3 условного пиломатериала в год). В этой связи разработка энергосберегающей технологии сушки пиломатериалов в камерах малой мощности на основе научно обоснованных решений является актуальной научно-технической проблемой. Радикальным методом снижения энергозатрат на камерную сушку является применение естественной циркуляции сушильного агента.

К преимуществам камер с естественной циркуляцией воздуха можно бесспорно отнести следующее:

1. Простота конструкции.

2. Относительно более низкая стоимость самой камеры и, соответственно, более низкий уровень амортизационных затрат.

3. Отсутствие затрат электроэнергии на привод вентиляторных узлов и их обслуживание.

Наряду с указанными преимуществами камеры с естественной циркуляцией имеют и существенные недостатки:

1. Неравномерное высыхание материала по высоте штабеля (низ штабеля несколько «отстает»).

2. Низкий коэффициент заполнения штабеля пиломатериалом, вследствие необходимости укладки со шпациями.

3. Относительно большая продолжительность процесса сушки.

Постановка задачи

Согласно сложившемуся мнению [1–3], причины недостатков камер с естественной циркуляцией воздуха кроются в крайне низкой скорости циркуляции (в пределах 0,2 м/с). Действительно, с увеличением скорости циркуляции воздуха по материалу сокращается продолжительность сушки и увеличивается производительность камер, но возрастают эксплуатационные расходы. При малой скорости движения воздуха доски просыхают неравномерно, наблюдается перепад влажности материала, лежащего у входа воздуха в штабель и выхода из него. Проходя через штабель, воздух увлажняется. При малой скорости движения часть пути он проходит в насыщенном состоянии и поэтому не может захватывать с собой влагу из досок, лежащих относительно дальше от входа в штабель. Если скорость воздуха сравнительно большая, то благодаря большому количеству его и быстрому прохождению по материалу каждое место штабеля равномерно омывается воздухом. Также на поверхности древесины вследствие ее шероховатости образуется слой покоящегося воздуха, который задерживает переход влаги из древесины в окружающую среду. Для перемещения насыщенного слоя и замены его более сухим необходимо увеличить скорость циркуляции воздуха. Этого можно добиться путём установки вентилятора.

Теоретическое обоснование

Наиболее экономичным [4–6] для процессов сушки является применение дискретной (прерывистой) циркуляции сушильного агента. Продолжительность циклов циркуляции и пауз в работе вентилятора зависит от породы древесины, геометрических размеров, сечений и влажности пиломатериалов. При этом переменному тепло- и массообменному воздействию подвергается лишь тонкий, поверхностный слой материала. Возникают затухающие тепловые волны, совершающие гармонические колебания от поверхности внутрь материала. Чем труднее просыхает материал (толще сортимент, плотнее древесина, ниже текущая влажность) и выше скорость воздуха, тем больше относительное время пауз. Процесс миграции влаги из средних зон материала продолжается непрерывно и при периодически отключенном вентиляторе.

Это позволяет достичь:

- двух-четырехкратного сокращения расхода электроэнергии при сушке большинства сортиментов (больше для трудносохнущих сортиментов и материалов, при повышенных требованиях к качеству сушки, до более низкой конечной влажности, а также в теплое время года);

- гибкого регулирования приведенной средней скорости воздуха в штабеле в продолжении всего процесса сушки; например, в условиях применения регулируемого электропривода (1500 – 1000 – 750 об/мин) потребляемая мощность изменяется как 8; 3,4; 1;

- более равномерного просыхания древесины по объему штабеля, т. е. повышения качества сушки за счет высоких абсолютных скоростей воздуха по материалу с прерывистой циркуляцией по сравнению с линейными скоростями при непрерывной циркуляции при сравнимых удельных расходах энергии;

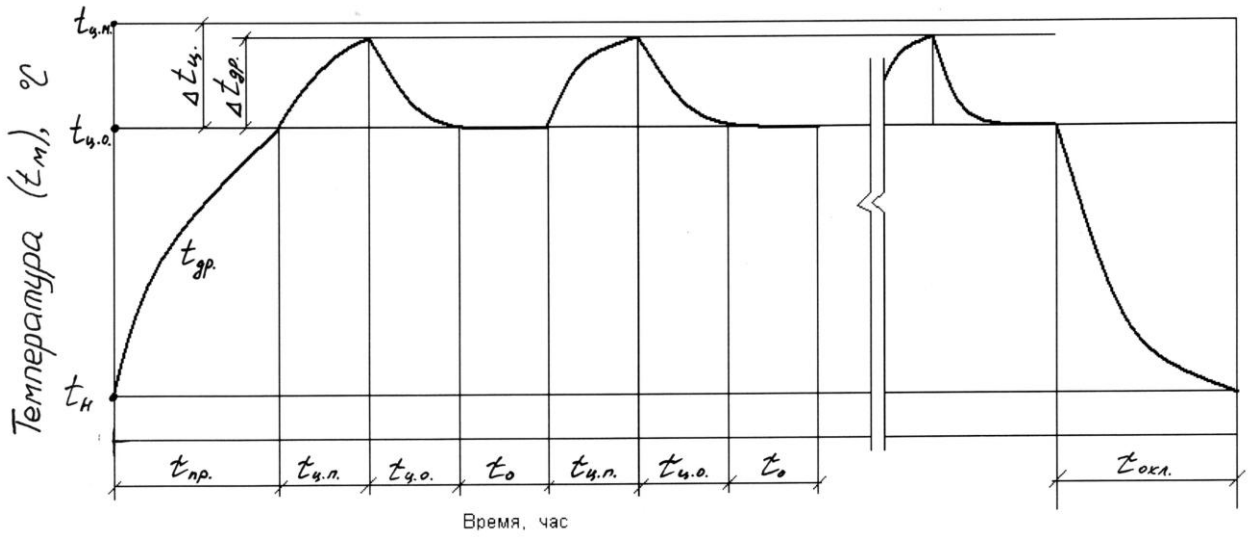


Рис. 1. Структура осциллирующего режима сушки в камере с естественной циркуляцией

- сокращения продолжительности процесса сушки.

Также снижение продолжительности сушки возможно осуществить с помощью применения осциллирующих режимов.

Сущность циклового (осциллирующего) прогрева заключается в том, что общее время сушки по ступеням режима делится на циклы прогрева материала и его охлаждения по нормативной их продолжительности. Температурный разрыв между циклами прогрева и охлаждения принят в пределах 10–15 °С (рис. 1).

Сначала температура в камере повышается, повышая тем самым температуру верхних слоёв древесины. При последующем понижении влажности и температуры воздуха в камере наружные слои древесины начинают отдавать влагу, в результате чего их температура становится ниже температуры внутренних слоёв. В этом и заключается основной смысл применения осциллирующих режимов, т. к. продвижение влаги происходит от более нагретых слоёв к менее нагретым. Таким образом, главное преимущество режима заключается в ускорении сушки. Помимо этого, усушка происходит равномернее, т. к. периодическое увлажнение наружных слоёв приводит к устранению опасных напряжений.

На рис. 1 обозначено: $t_н$ – начальная температура, °С; $t_{ц.о.}$ – температура циклового охлаждения, °С; $t_{ц.н.}$ – температура циклового нагрева, °С; $\tau_{пр.}$ – продолжительность первоначального прогрева, час; $\tau_{ц.}$ – продолжительность циклового прогрева, час; $\tau_{ц.о.}$ – продолжительность циклового охлаждения, час; $\tau_о$ – продолжительность открытия вытяжного канала, час; $\tau_{охл.}$ – продолжительность конечного охлаждения, час; $\Delta t_ц$ – амплитуда осциллирования температуры, °С.

Экспериментальная установка

В лаборатории В-113 Иркутского государственного технического университета смонтирована экспериментальная установка, моделирующая лесосушильную камеру с комбинированной системой, работающую с применением осциллирующих режимов сушки.

Установка представляет собой камеру с естественной циркуляцией, где воздух нагревается посредством ТЭНов (теплоэлектронагревателей). К камере подключен осевой вентилятор с автоматической системой управления (на основе преобразователя частоты Danfoss). Периодически, согласно текущим значениям параметров сушильного агента (контролируются с помощью датчиков), вентилятор включается на продув камеры, открываются впускной и выпускной клапаны. Таким образом, под действием избыточного давления внутри камеры увлажнённый воздух удаляется в окружающую среду; одновременно с этим штабель охлаждается.

Достигнув заданных значений температуры и влажности, вентилятор автоматически отключается, и продолжается сушка с естественной циркуляцией.

Заключение

Таким образом, реализуются:

- увеличение скорости прохождения воздуха по штабелю;

- прерывистая циркуляция агента сушки;

- осциллирующие режимы (нагрев штабеля – с помощью ТЭНов, охлаждение – за счёт обдува).

Вкупе с применением современной автоматики такое сочетание способно улучшить показатели сушки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Селюгин Н.С. Сушка древесины / Н.С. Селюгин. – М. : Гослестехиздат, 1940.
2. Кречетов И.В. Сушка пиломатериалов. / И.В. Кречетов. – М. : Гослестехиздат, 1946.
3. Альтшулер И.С. Расчет сушильных камер для древесины. / И.С. Альтшулер. – М. : Гослесбумиздат, 1953.
4. Кречетов И.В. Сушка древесины / И.В. Кречетов. – М. : Лесная промышленность, 1977.
5. Кречетов Н.В. Эффективность режимов сушки пиломатериалов с прерывистой циркуляцией воздуха / Н.В. Кречетов // Рациональное использование энергетических ресурсов при сушке пиломатериалов. – Саласпилс, 1983.
6. Михеев А.А. Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири/ Дунаев М.П., Михеев А.А. // Материалы МНПК. – Иркутск, 2010 – С. 50–54

УДК 658.012.2: 656.2

Дегтярева Олеся Станиславовна,
к. э. н., доцент кафедры «Экономика» Забайкальского института железнодорожного транспорта – филиала ИрГУПС, тел. 8-914-468-72-48, 92-59-37
Козырева Екатерина Владимировна,
соискатель Забайкальского института железнодорожного транспорта – филиала ИрГУПС, тел. 8-924-377-29-78, 28-23-42

ПЛАНИРОВАНИЕ ОБЩЕПРОИЗВОДСТВЕННЫХ РАСХОДОВ В СТРУКТУРНЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЯХ ОАО «РЖД»

O.S. Degtyareva, E.V. Kozyreva

PLANNING OF THE WHOLE PRODUCTION EXPENSES IN THE STRUCTURAL SUBDIVISIONS OF THE PUBLIC STOCK COMPANY «RUSSIAN RAILWAYS» BRANCHES

Аннотация. *Рассматривается методика планирования общепроизводственных расходов в структурных подразделениях филиалов ОАО «РЖД», предлагаются меры по ее совершенствованию, которые могут быть использованы предприятиями других отраслей экономики.*

Ключевые слова: *планирование, затраты, подразделения.*

Abstract. *The planning method of the whole production expenses in the structural subdivisions of the Public Stock Company «Russian Railways» Branches is considered. The measures on its improvement which can be used by enterprises in other fields of economics are suggested.*

Keywords: *planning, expenses, subdivisions.*

После перехода России к рынку темпы инфляции, непредсказуемость бухгалтерского и налогового законодательства снизили интерес предприятий и организаций к финансовому планированию. Даже текущие годовые планы стали составлять в основном только государственные предприятия и крупные корпорации. Однако по мере стабилизации экономики, снижения темпов инфляции, роста конкуренции на внутренних и международных рынках, с приходом нового поколения собственников и менеджеров возрос интерес к финансовому планированию, особенно к его новым рыночным аспектам.

Внедрение качественно новых рыночных механизмов управления финансами в организации позволяет снизить дефицит денежных средств, эффективно управлять оборотным капиталом, осуществлять анализ и управление инвестициями, проводить эффективную ценовую политику.

Коллектив авторов Самарского института Российского государственного торгово-экономического университета в своей работе «Финансы и кредит» отмечает, что в развитых зарубежных странах корпоративное финансовое планирование рассматривают как процесс, состоящий из четырех основных циклов:

1) цикла стратегического анализа инвестиционных возможностей и возможностей финансирования, которыми располагает предприятие;

2) цикла прогнозирования последствий принимаемых решений во избежание ущерба от несогласованности текущих и будущих решений;

3) операционного цикла, т. е. цикла выбора из ряда возможных и обоснования решения, отражающего стратегическую цель;

4) цикла бюджетирования, т. е. планирования, учета и контроля движения денежных средств, формирования финансовых результатов и моделирования последствий принимаемых решений [4, с. 301].

На железнодорожном транспорте планированию эксплуатационных расходов всегда уделялось пристальное внимание, а в последние годы активизирована работа по созданию методики формирования бюджетов, в том числе и в структурных подразделениях филиалов ОАО «РЖД», главным оценочным показателем работы в которых является в настоящее время уровень эксплуатационных расходов.

Общепроизводственными расходами называются расходы цехов, участков и других структурных подразделений предприятия, образование которых обусловлено производственными процессами.

На железнодорожном транспорте их состав одинаков для всех обычных видов деятельности и мест возникновения затрат, но удельный вес по структурным подразделениям филиалов ОАО «РЖД» различен: наибольший процент общепроизводственных расходов отмечается в дистанции погрузочно-разгрузочных работ, путевой машинной станции, вагонном ремонтном депо и дистанции электроснабжения (табл. 1).

Таблица 1

Распределение общепроизводственных расходов

Структурное подразделение филиала ОАО «РЖД»	Удельный вес общепроизводственных расходов, %
Локомотивное депо (ТЧ)	15,2
Дистанция электроснабжения (ЭЧ)	20,9
Дистанция пути (ПЧ)	11,2
Железнодорожная станция (ДС)	10,3
Вагонное ремонтное депо (ВЧДР)	27,0
Вагонное эксплуатационное депо (ВЧДЭ)	15,2
Путевая машинная станция (ПМС)	44,7
Дистанция погрузочно-разгрузочных работ (МЧ)	47,0

Поэтому необходимо обоснованное и детальное планирование общепроизводственных расходов для повышения эффективности работы вышеуказанных структурных подразделений.

Общепроизводственные расходы можно разделить на две группы.

К первой относятся расходы, связанные с содержанием, ремонтом и амортизацией основных средств.

Вторую группу общепроизводственных расходов образуют затраты по содержанию производственного персонала.

На железнодорожном транспорте общепроизводственные расходы учитывают и планируют по статьям и элементам затрат. Методика планирования общепроизводственных расходов существует, но ее необходимо доработать, что связано с введением Номенклатуры доходов и расходов по видам деятельности ОАО «РЖД» (2007 г.) и других новых нормативных документов.

Поскольку затраты по оплате труда производственного персонала за непроработанное время включают затраты на оплату ежегодных и дополнительных отпусков, времени, связанного с прохождением медицинских осмотров и выполнением государственных обязанностей и т. п., их можно запланировать по формуле

$$Z_n = FP_{pl} \times \left(K_{ot} + K_d\right), \quad (1)$$

где FP_{pl} – запланированный фонд заработной платы;

K_{ot} – коэффициент замещения работников на время очередных (ежегодных) отпусков;

K_d – коэффициент замещения работников по другим неявкам, разрешенным законом, кроме неявок по болезни.

По этой же статье планируют и отчисления на социальные нужды:

$$Z_n \times 1{,}344. \quad (2)$$

По статье 0758 отражается стоимость форменной одежды, выдаваемой производственному персоналу бесплатно или с частичной оплатой и остающейся в их личном постоянном пользовании, которая зависит от числа работников, получающих ее бесплатно или на льготных условиях и цены приобретения:

$$Z_f = K_f \times C_{pl}\left(Ck_{pl}\right) \times I_i, \quad (3)$$

где K_f – численность работников, которым в плановом периоде будет выдана форменная одежда;

C_{pl} – плановая стоимость форменной одежды;

Ck_{pl} – скидка со стоимости форменной одежды;

I_i – индекс прогноза инфляции на планируемый период.

По статье 0761 планируют затраты по охране труда производственного персонала, в том числе на обеспечение смывающими и обезвреживающими средствами, молоком или другими равноценными пищевыми продуктами, рассчитанными на нормативной основе по элементам затрат:

$$Z_{ox} = \left(V_o - V_o^n\right) \times I_i \times \frac{K_{ox}}{100}, \qquad (4)$$

где $\left(V_o - V_o^n\right)$ – расходы по обычным видам деятельности структурного подразделения в предплановом отчетном периоде за вычетом непроизводительных расходов, тыс. руб.;

K_{ox} – коэффициент для расчета расходов на финансирование мероприятий по улучшению условий и охраны труда ($\geq 0{,}7$) (доводится вышестоящим органом управления – управлением железной дороги или Дирекцией).

По статье 0765 планируют расходы, связанные с содержанием и эксплуатацией механизмов, по элементам затрат: на материалы для смазывания и содержание в чистоте оборудования, запасные части для ремонта оборудования, топливо для горнов, нагревательных печей, электроэнергию для работы электромолотов, компрессоров, затраты на оплату труда и отчисления на социальные нужды работников, обслуживающих механические и силовые установки, рабочих по текущему ремонту механизмов.

Аналогично планируют расходы по статьям «Содержание и эксплуатация оборудования и объектов природоохранного назначения», «Обслуживание и текущий ремонт зданий, сооружений и инвентаря производственного назначения».

Расходы на содержание резервного подвижного состава планируют исходя из величины парка запаса в плановом периоде, выраженного в локомотиво- или вагоно-сутках, и соответствующей расходной ставки, которая определяется на основе анализа данных за соответствующий отчетный период с учетом особенностей планового периода.

По статье 0770 отражаются затраты на капитальный ремонт основных средств, непосредственно участвующих в процессе производства, кроме затрат, учитываемых по статьям прямых производственных и общехозяйственных расходов. Их планируют, исходя из программы капитального ремонта и сметы затрат на каждый вид ремонта.

Плановую сумму амортизации основных средств производственного назначения предлагается определять исходя из стоимости основных средств на начало планируемого периода, норм амортизационных отчислений с учетом плана по вводу и выбытию основных средств.

По статье 0778 планируются затраты на оплату труда бригадиров, рабочих, обслуживающих электрокары, автотележки, автопогрузчики, локомотивы и дрезины, работающие на хозяйственные нужды, материалы для смазки, запасные части, электроэнергию, топливо для транспортных средств, затраты по оплате счетов за их ремонт.

Планирование расходов по статьям «Эксплуатация автомобилей» и «Техническое обслуживание и текущий ремонт автомобилей и автомобильных прицепов» необходимо осуществлять по элементам затрат, если данное структурное подразделение использует собственную автотехнику. При использовании автомобилей, принадлежащих другим хозяйствующим субъектам, по статье «Эксплуатация автомобилей» необходимо запланировать расходы на оплату счетов за данные услуги в соответствии с заключенными договорами.

Следует также отметить, что по статьям «Командировки и подъемные работников, не относящихся к аппарату управления», «Арендные и лизинговые платежи» известен только состав расходов, но не разработана методика их планирования.

Поэтому предлагается командировочные расходы планировать по согласованию с секторами или отделами по управлению персоналом, которые должны своевременно предоставлять данные о планируемом числе командировок и приеме на работу молодых специалистов.

Арендная плата устанавливается за все арендуемое имущество в целом или отдельно по каждой из его составных частей в виде:

1) определенных в твердой сумме платежей, вносимых периодически или единовременно;

2) установленной доли полученных в результате использования арендованного имущества продукции, плодов или доходов;

3) предоставления арендатором определенных услуг;

4) передачи арендатором арендодателю обусловленной договором вещи в собственность или в аренду;

5) возложения на арендатора обусловленных договором затрат на улучшение арендованного имущества.

Стороны могут предусматривать в договоре аренды сочетание указанных форм арендной платы или иные формы оплаты аренды. Добавим, что арендная плата может рассчитываться как минимум двумя способами:

- с учетом коммунальных расходов, т. е. когда арендной платой покрываются все расходы арендодателя;

- без учета стоимости коммунальных услуг, т. е. арендная плата покрывает амортизацию, налог на имущество, земельные платежи и прочие расходы, которые арендодатель как собственник несет по сдаваемому в аренду имуществу.

Для определения лизинговых платежей используют методы, характеристика которых представлена в табл. 2.

Таблица 2

Методы расчета лизинговых платежей

Метод	Сущность метода
С фиксированной общей суммой	Общая сумма платежей начисляется равными долями в течение всего срока договора в соответствии с согласованной сторонами периодичностью
Аванса	Лизингополучатель при заключении договора выплачивает лизингодателю аванс в согласованном размере, а остальная часть общей суммы начисляется и уплачивается в течение срока действия договора при начислении платежей
Минимальных платежей	В общую сумму платежей включаются: сумма амортизации лизингового имущества за весь срок, плата за использование лизингодателем заемных средств, комиссионное вознаграждение и плата за дополнительные услуги лизингодателя, предусмотренные договором, а также стоимость выкупаемого лизингового имущества, если выкуп предусмотрен договором

Периодичность выплат по аренде и лизингу может быть ежегодной, ежеквартальной, ежемесячной.

Таким образом, можно сделать вывод, что способ планирования арендных и лизинговых платежей зависит от содержания договора аренды (лизинга) и не представляет сложности, поэтому с успехом может применяться в структурных подразделениях ОАО «РЖД».

Вышеперечисленные методические подходы к планированию общепроизводственных расходов могут быть использованы не только на железнодорожном транспорте, но и в организациях других отраслей экономики.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Порядок ведения раздельного учета доходов, расходов и финансовых результатов по видам деятельности, тарифным составляющим и укрупненным видам работ открытого акционерного общества «Российские железные дороги» (утв. Приказом Минтранса России от 17.08. 2007 г.)
2. Васильева Л.С. Финансовый анализ: учебник / Л.С. Васильева, М.В. Петровская. – 3-е изд, стер. – М. : КНОРУС, 2008. – 316 с.
3. Тарасевич Л.С., Гребенников П.И., Леусский А.И. Теория корпоративных финансов: учебник. – М. : Высшее образование, 2008. – 237 с.
4. Финансы и кредит : учебник / М.Л. Дьяконова, Т.М. Ковалева, Т.Н. Кузьменко и др.; под ред. проф. Т.М. Ковалевой. – 4 изд., перераб. и доп. – М. : КНОРУС, 2008. – 384 с.

УДК 534.631; 625.042

Зубкова Дарья Андреевна,
соискатель, кафедра «Телекоммуникационные системы», ИрГУПС,
тел.: (3952)638-338, e-mail: zihaker@rambler.ru
Климов Николай Николаевич,
д. ф.-м. н., профессор, заведующий кафедрой «Телекоммуникационные системы», ИрГУПС,
тел.: (3952) 638-323, e-mail: klinn@irgups.ru
Куценко Сергей Михайлович,
к. т. н., доцент кафедры «Телекоммуникационные системы», ИрГУПС,
тел.: (3952) 638-338, e-mail: kucenko_s@irgups.ru
Дудаков Сергей Владимирович,
заведующий лабораториями кафедры «Теоретические основы электротехники», ИрГУПС,
тел.: (3952) 638-444

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ АКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ БЕССТЫКОВОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

D.A. Zubkova, N.N. Klimov, S.M. Kutsenko, S.V. Dudakov

THE AUTOMATION OF THE PROCESSES OF THE DATE PROCESSING OF ACOUSTIC DIAGNOSTICS OF THE INTENSE CONDITION OF THE LONG-WELDED RAILS

Аннотация. *При разработке методики измерения напряженного состояния бесстыкового пути возникает необходимость определения скоростей распространения различных типов волн. В частности, нормальные асимметричные волны Лэмба имеют значительную дисперсию, и требуется определять кроме временной задержки времени прихода сигнала на разнесенные датчики ещё и время задержки сигнала на разных частотах. Описана работа алгоритма, использующего взаимокорреляционную функцию и метод скользящего среднего, позволяющего автоматизировать процесс обработки данных акустических измерений. Продемонстрированы результаты обработки данных.*

Ключевые слова: *автоматизация обработки, акустическая диагностика, взаимокорреляционная функция, спектральный анализ, бесстыковой путь.*

Abstract. *During development of a technique of measurement of the intense condition of long-welded rails there a necessity of definition of speeds of distribution of various types of waves. In particular, the normal asymmetric Lamb`s waves have significant dispersion and it is required to determine besides a temporary delay of time of arrival of a signal on the carried gauges the time of delay of a signal on different frequencies. The work of algorithm using mutual correlation function and the method, sliding average, allowing to automate the process of data processing of acoustic measurements is described. The results of processing are shown.*

Keywords: *automation of processing, acoustic diagnostics, mutual correlation function, spectral analysis, long-welded rails.*

Введение

Тенденции развития железнодорожного транспорта требуют применения современных технологий для увеличения участковой скорости поездов, повышения надежности и качества обслуживания объектов железной дороги. Одним из основных элементов является бесстыковой путь, безотказность которого определяет всю работу железной дороги. Применение бесстыкового пути на железных дорогах существенным образом улучшает условия работы подвижного состава: уменьшается износ колесных пар, уменьшается шум. Недостатком является необходимость изменять вставки между плетями при смене времён года с целью уменьшения напряжённого состояния рельсов. Кроме этого, существует опасность так называемого выброса пути при превышении силы сжатия из-за удлинения рельсов при их нагреве до критической величины, при которой возможен выброс.

Акустические методы широко используются для выявления различных дефектов в изделиях и

конструкциях [1] и их напряжённого состояния [2]. В результате работ, изложенных в [2], разработан и внедрён в практику прибор, измеряющий напряжённое состояние на основе измерения изменения скорости распространения ультразвуковых волн Лэмба [3].

Нами предпринята попытка использовать для диагностики напряженного состояния бесстыковой плети железнодорожного пути изменение скоростей распространения различных длин волн в рельсе, связанное с напряжённым состоянием пути в звуковом диапазоне частот [4, 5]. Форма регистрируемых сигналов достаточно сложна, так как в рельсе после удара образуются волны различных типов и частот. Схема эксперимента показана на рис. 1.

Для приёма и измерения параметров звуковых волн в низкочастотном диапазоне использовались стандартные пьезоэлектрические преобразователи двух типов с резонансной частотой 2,5 МГц (датчик от ультразвукового дефектоскопа УД2-12) [5]. Первый тип преобразователей – прямой (для регистрации поперечных волн). Второй – наклонный с переключаемыми углами ввода 50° и 65° (оба угла больше первого критического волн ультразвукового диапазона, то есть чувствительны к продольным и поперечным волнам ($\theta = \arcsin c_{гр} / c_{ф}$)).

Метод определения напряженного состояния бесстыкового пути заключается в определении скорости распространения различных типов волн на отдельных частотах в рельсе. На рис. 2 приведены осциллограммы и их спектры, полученные во время эксперимента при ударе молотком массой 0,5 кг на расстоянии 1 м от первого датчика.

Признаком напряженного состояния (натяжения) должно служить распространение поперечного возмущения (изгибная волна), возникающего при ударе, со скоростью, которая является суммой скорости распространения изгибной волны и волны натяжения [5, 6]. Как следует из монографии Лэмба [6], квадрат скорости возмущения C равен сумме квадратов скорости изгибной волны $C_{изг.}$ и скорости волны натяжения $C_{н.}$, т. е. $C^2 = C_{изг.}^2 + C_{н.}^2$. Здесь, в первом приближении, групповая скорость изгибной волны равна

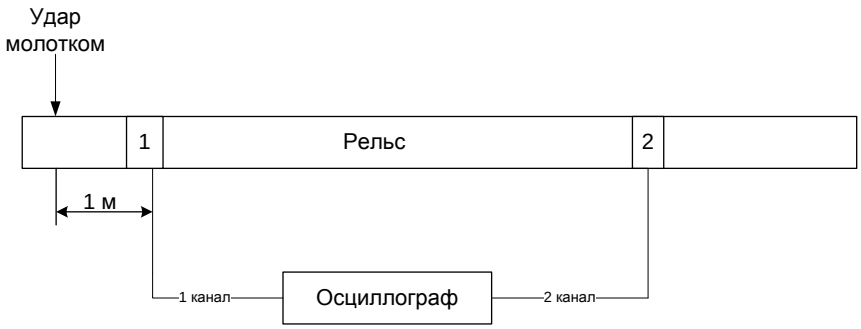


Рис. 1. Схема эксперимента, где 1, 2 – пьезоэлектрические датчики

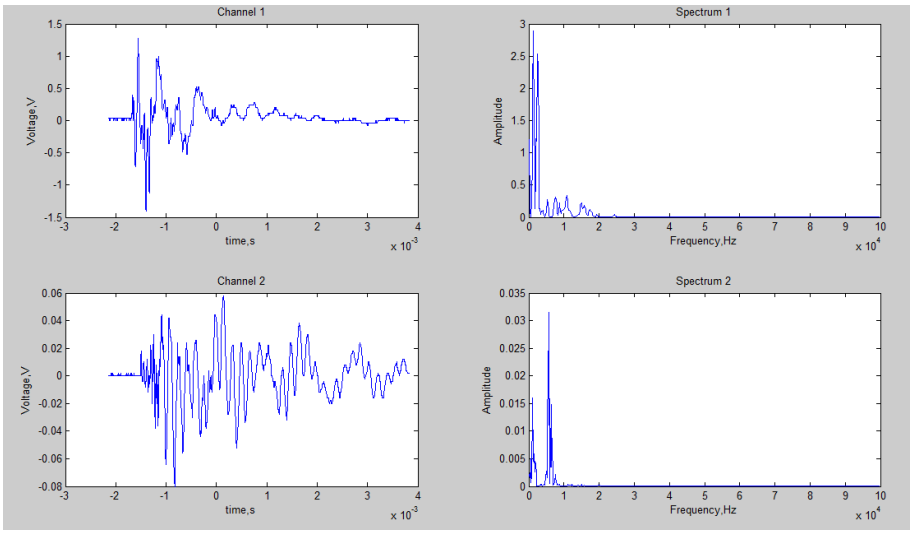


Рис. 2. Осциллограммы сигналов с первого и второго датчиков и спектры для 1-го случая табл. 1

$$C_{изг.} = 2k \cdot i \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (1)$$

где E – модуль Юнга, равный для рельсов $2{,}2 \cdot 10^{11} H/м^2$; ρ – плотность, равная 7850 кг/м^3; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число; i – радиус момента инерции площади поперечного сечения рельса относительно горизонтальной оси, равный 6,5 см^2 [5].

Скорость волны натяжения

$$C_{н.} = \sqrt{\frac{P}{\rho_{лин.}}}, \quad (2)$$

здесь P – натяжение бесстыкового пути, обусловленное понижением температуры относительно тех условий, при которых происходила укладка, $\rho_{лин.}$ – линейная плотность для рельса Р65, равна 64,88 кг\м . Как следует из сравнительного анализа различных теорий, описывающих распространение упругих волн в стержнях, проведённого в монографии [5], до сравнительного высоких частот результаты, полученные Бернулли для продольных волн, согласуются с экспериментальными данными. Верхняя частота определяется соотношением $\frac{\omega H}{C_{попер.}} = \frac{\pi}{2}$, когда удвоенная высота стержня H равна половине длины сдвиговой волны, скорость которой определяется следующим соотношением:

$$C_{попер.} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\sigma)}}, \quad (3)$$

где σ – коэффициент Пуассона в нашем случае равный 0,28, что даёт величину скорости 3309 м\с. Приведённые выше для рельса параметры дают значение частоты порядка 5 кГц.

Для определения напряженного состояния (в рассматриваемом случае только натяжения) необходимо выделить изгибную волну с наименьшей частотой, которая возникает в рельсе при ударе, определить её скорость и сопоставить с ожидаемой скоростью из расчёта. Поэтому необходимо знание частоты и скорости распространения волны с известной частотой. Разработке метода выделения этих параметров и посвящена предлагаемая работа.

Использование в эксперименте цифрового осциллографа позволяет передать зарегистрированную информацию в компьютер и автоматизировать обработку данных.

Для автоматизации обработки данных по оценке напряженного состояния бесстыкового железнодорожного пути был использован математический редактор Matlab, в котором разработана программа вычислений взаимокорреляционных функций (ВКР) и спектров измеряемых сигналов. Эта программа позволяет автоматизировать определение временных задержек различных частот сигнала на разных датчиках.

Описание алгоритма

В статье разработан алгоритм обработки данных:

- вычисление спектра;
- построение взаимокорреляционной функции (ВКР);
- нахождение временной задержки различных частот между датчиками.

Для обработки регистрируемые сигналы импортируются в программу MaTLab, где производится вычисление спектров исходных сигналов и совпадающих частот этих сигналов. Для нахождения временной задержки какой-либо частоты в исследуемых реализациях сигналов используется метод взаимной корреляции.

Этот метод состоит в следующем: берётся функция, представляющая отрезок синусоиды, равной периоду той частоты, временную задержку которой необходимо определить. Затем находятся ВКР отрезка синусоиды с первым и вторым исходными сигналами.

Далее вычисляется ВКР между полученными функциями, и по максимуму этой функции определяется временная задержка выбранной частоты [4]. Действия алгоритма (рис. 3) выполняются в стандартной среде MaTLab Editor.

Описание алгоритма:

1. X1(t), X2(t) – исходные осциллограммы с первого и второго датчиков.
2. Вычисление длины вектора *t*.
3. Вычисление частоты дискретизации сигналов.
4. Осуществляется быстрое преобразование Фурье и находится спектральный диапазон исходных сигналов, $k = n/2$ – поскольку, согласно теоремы Лемма 2 (о делении пополам), спектр при разложении Фурье будет симметричным.
5. Построение исходных осциллограмм и их спектров (рис. 2).
6. Нахождение максимальных элементов в спектрах первого и второго сигналов для определения порогового значения выборки частот спектра.
7. Нахождение частот в спектрах исходных осциллограмм, которые выше порогового значения.
8. Выявление общих частот в спектрах сигналов.
9. Нахождение взаимокорреляционных функций синусоид совпадающих частот с сигналами первого и второго каналов (рис. 4).

Рис. 3. Алгоритм обработки акустических сигналов диагностики состояния бесстыкового пути

Нахождение максимума ВКР, а также временной задержки между различными частотами в сигналах.

10. Нахождение временной задержки между наблюдаемыми сигналами на 1-м и 2-м датчиках с использованием скользящего среднего.
11. Сравнение задержки между сигналами и задержек между совпадающими частотами: если эта задержка меньше, чем задержка какой-либо частоты в этом сигнале, то эти данные считаются ложными и не учитываются в анализе.

Суть использования скользящего среднего заключается в следующем. Определяется среднее значение наблюдаемых данных (измеренные значения величин берутся по модулю) по нескольким (3–5) точкам и находится их дисперсия. Если на следующем шаге величина следующего значения функции превышает величину среднего на величину утроенной ошибки, то это определяет момент времени прихода сигнала от удара к данному датчику.

Обсуждение результатов обработки

Для проверки работоспособности реализованного алгоритма были обработаны данные наблюдений, проведённых в лаборатории кафедры ИрГУПС «Путь и путевое хозяйство» на отрезке пути с длиной рельса 12 м. Суть эксперимента состояла в измерении скорости прохождения волн, возбуждаемых при ударе по головке рельса мо-

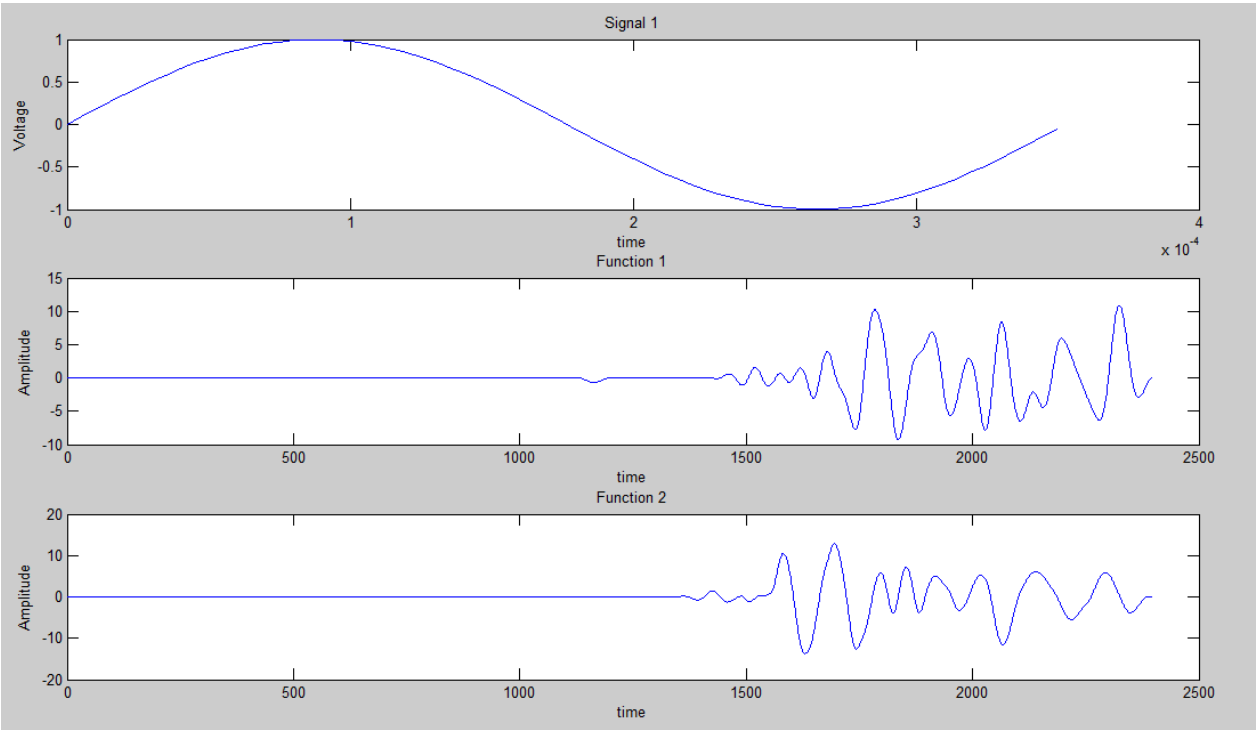


Рис. 4. Верхний – синусоида той частоты, временную задержку которой надо определить; средний – взаимокорреляционная функция отрезка синусоиды и сигнала с первого канала; нижний – взаимокорреляционная функция отрезка синусоиды и сигнала со второго канала

лотками различной массы и формы. Скорости прохождения волн были определены визуально по осциллограммам, с помощью маркеров (рис. 5) и при помощи разработанного алгоритма. Данные обработки сведены в таблице 1.

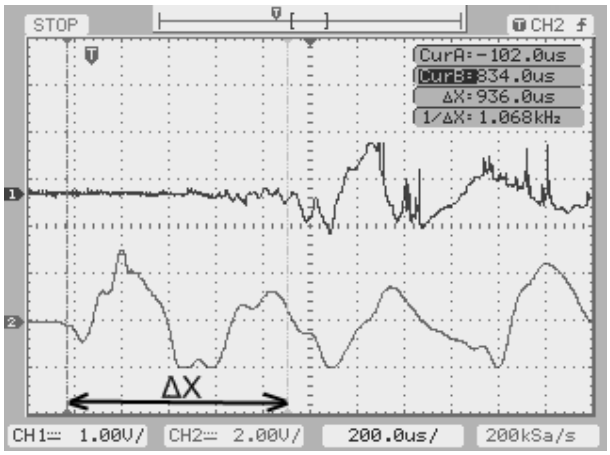


Рис. 5. Пример визуальной обработки результатов измерений. Значение ΔX показывает время регистрации сигнала вторым датчиком относительно первого датчика

Как следует из анализа, проведённого в монографии [7], для нашего случая в эксперименте на частотах ниже 5 кГц должны быть зарегистрированы продольная волна (волна растяжения-сжатия), скорость которой определена формулой (4), и изгибные (поперечные) волны – (1). Первая имеет скорость:

$$C_{прод.} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \qquad (4)$$

Это выражение при величинах модуля Юнга и плотности даёт скорость волны растяжения 5294 м\с.

В настоящее время укладка бесстыкового пути в соответствии с техническими условиями [8] на ВСЖД производится при температуре (+25 ±5) ^{o}C. Это означает, что при температурах ниже +20 ^{o}C бесстыковый путь находится в состоянии растяжения. В этом случае возможно возникновение поперечных колебаний рельса как струны. Скорость распространения таких колебаний не будет зависеть от частоты, направления возбуждения колебаний (поперёк или вдоль рельса) и будет определяться выражением (2).

Как показано ранее в работе [5], при изменении температуры на 50 градусов относительно температуры укладки бесстыкового пути скорость поперечной волны натяжения составит порядка 130 м\с. Погрешность измерения интервалов времени задержки определяется частотой опроса каналов и передаточной функцией используемых датчиков. При частоте опроса 200 кГц ошибка определения отсчёта времени не превышает 1 %. Ошибка, определяемая чувствительностью датчиков, силой их прижима, составляет величину единицы процентов. Таким образом, суммарная ошибка измерения времен задержек составляет величину порядка 5 %. Из этого следует, если натяжение существует, то точность измерений скорости позволяет выявить увеличение скорости поперечной волны, обусловленное натяжением.

В таблице 1 приведены результаты обработки полученных данных различными методами. Определение временной задержки визуально с помощью осциллографа по началу увеличения амплитуды сигнала на датчике и полученные скорости приведены в столбце 2, а вычисленные скорости разработанным алгоритмом приводятся в столбце 3.

За исключением 5-го значения (обсудим ниже), в пределах ошибки полученные величины скорости распространения совпадают с нулевой бесдисперсионной скоростью распространения симметричной моды волны Лэмба. Величина скорости, полученная визуальным определением временной задержки для 5-го случая (она практически не отличается при определении её скользящим средним) соответствует скорости изгибной волны. Этот результат получен при ударе по головке рельса кувалдой массой 4,6 кг. Остальные результаты получены при ударах молотками массой от 0,5 кг до 1,3 кг.

Определение временной задержки по максимуму взаимокорреляционной функции (столбец 3) для 1-го, 3-го, 5-го случая даёт величины скорости, соответствующие нулевой моде поперечной асимметричной волне Лэмба. Три других значения являются проявлением искажений формы огибающей, связанной или с передаточной функцией датчиков, или особенностями спектра возбуждаемых различными молотками.

Проведенный спектральный анализ позволил выделить одинаковые частоты, из наблюдаемых данных на датчиках (величины частот в Гц приведены в столбце 4), а величины временных задержек в миллисекундах, полученные для наблюдаемых совпадающих частот с использованием ВКР, и соответствующие им скорости в м\с представлены в столбце 5. В большинстве случаев (9 из 14) временные задержки измерений дают скорости изгибных волн, величины которых не совсем соответствуют теоретическим оценкам по формуле (4) выделенным частотам. Например, для частоты 1 кГц вычисленная скорость равна 1140 м\с, а для частоты 4 кГц – 2280 м\с. Скорости для верхнего диапазона частот существенно меньше определённых с помощью ВКР. Это может быть связано с тем обстоятельством, что рельс закреп-

Таблица 1

№ измерения	Задержка визуально, в мс; групповая скорость, м\с	Задержка ВКР, в мс; «групповая» скорость, м\с	Частоты, в Гц	Задержка ВКР, в мс; кажущиеся скорости, в м\с
1	**2**	**3**	**4**	**5**
1	0,68 5582	1,1 3636	999 4833	2,88 1389 0,605 6612
2	0,808 4950	0,38 10530	999 1833	2,45 1633 0,38 10530
3	0,808 4950	1,49 2685	1499	0,65 6154
4	0,808 4950	0,315 12700	1166 1833 3166 3999	2,43 1646 3,43 1166 3,49 1146 3.51 1140
5	1,64 2439	1,27 3150	999 4666 4833	1,33 3030 3,12 1282 3,12 1282
6	0,8 5000	0,26 15380	333 1833	0,235 17020 0,260 15380
среднее	5086±124	3157±305		

лён на шпалах, что может привести к снижению скорости распространения изгибных волн по сравнению с теоретическими, оценки которых проведены для свободного стержня.

Вывод

Пробная обработка данных наблюдений показывает, что реализация данного алгоритма в стандартной программе MaTLab Editor упрощает процедуру обработки сигналов, нахождения временных задержек между различными частотами, а также затрачивается меньше времени на анализ сигналов. Но при этом следует каждый раз внимательно анализировать полученные данные.

В заключение авторы выражают благодарность профессору В.М. Бардакову, доценту М.В. Лопатину, В.И. Муратову за полезное обсуждение результатов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Л. Бергман «Ультразвук и его применение в науке и технике», из-во иностранной литературы, М., 1956 г., глава 5.
2. Н.Е.Никитина. Акустоупругость. Опыт практического использования – Н.Новгород : ТАЛАМ, 2005. – 208 с.
3. Прибор для измерения механических напряжений ИН-5101А. Руководство по эксплуатации ИН.000.000.000 РЭ. ООО «ИНКОТЕС». 2010. – 48 с.
4. С.В. Дудаков, Д.А. Зубкова, .И.Муратов, Куценко С.М**.** Использование взаимокорреляционной функции для обработки акустического сигнала при диагностике напряженного состояния бесстыкового пути // Современные проблемы радиоэлектроники и связи. Материалы IX Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов, и молодых ученых г. Иркутск, 26 мая 2010г. – С. 97–103.
5. В.М. Бардаков, С.В. Дудаков, Н.Н. Климов, М. В. Лопатин, В.И. Муратов, С.М. Куценко, Е.В. Филатов // Проблемы и перспективы изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации железных дорог: труды IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Иркутск: ИрГУПС. – 2010. – Т. 1. – С. 341–354.
6. Г. Лэмб. Динамическая теория звука. ФИЗМАТГИЗ, М., 1960. &50, 372 с.
7. В.И.Ерофеев, В.В.Кажаев, Н.П. Семерикова. Волны в стержнях. Дисперсия. Диссипация. Нелинейность. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 208 с.
8. Технические указания по устройству, укладке, содержанию и ремонту бестыкового пути/ МПС России. – М. : Транспорт. 2000. – 96 с.

УДК 332.012

Бубнов Вячеслав Анатольевич,
к. э. н., доцент, зав. кафедрой «Бухгалтерский учет и налогообложение», ИрГУПС,
тел.: 89021777259, e-mail: bubnov v@irgups.ru

ВЛИЯНИЕ БЮДЖЕТНОЙ РЕФОРМЫ НА РЕГИОНАЛЬНУЮ ЭКОНОМИКУ

V.A. Bubnov

INFLUENCE OF BUDGETARY REFORM ON REGIONAL ECONOMY

Аннотация. *Переход к рыночной экономике изменил взаимоотношения федерального центра и субъектов Российской Федерации. Наиболее важным инструментом воздействия органов власти на региональную экономику является бюджет. Реформирование российской бюджетной системы осуществляется в течение последних 20 лет. Это напрямую влияет на темпы развития региональной экономики, при этом ее прирост опирается на финансовую основу, формируемую за счет бюджетных поступлений в региональные бюджеты и их эффективное распределение. Современная бюджетная система не позволяют сформировать доходную часть региональных бюджетов, необходимую для инновационного развития. Необходимо провести ряд мероприятий, которые позволят повысить эффективность региональной экономики.*

Ключевые слова: *региональная экономика, бюджет, модернизация, субъект РФ.*

Abstract. *Passing to the market economy changed the mutual relations of federal center and subjects of Russian Federation. The most essential instrument of influence of organs of power on a regional economy is a budget. Reformation of the Russian budgetary system is carried out during the last 20 years. It influences directly on the rates of development of regional economy, which increase leans against financial basis, formed due to the budgetary entering to the regional budgets and their effective distribution. Modern budgetary system does not allow to form profitable part of regional budgets, necessary for innovative development. It is necessary to conduct the row of measures which will allow to promote efficiency of regional economy.*

Keywords: *regional economy, budget, modernization, subject of Russian Federation.*

Модернизация российской экономики и переход к инновационному развитию невозможны без существенных перемен в региональной экономике Российской Федерации.

Региональные органы власти имеют в своем распоряжении ряд инструментов для управления экономикой, и наиболее значимым среди них является региональный бюджет, который формирует значительные финансовые ресурсы, от правильного и эффективного распределения которых зависит социально-экономическое развитие субъекта РФ.

Разработка и утверждение регионального бюджета напрямую зависит от федерального бюджета и федеральных органов власти.

29 июня 2011 года Президент России представил Бюджетное послание [1], которое содержит основные принципы и направления бюджетной политики на 2012–2014 годы.

Важность Бюджетного послания для российской экономики трудно переоценить, т. к. в соответствии со ст. 170 Бюджетного Кодекса [2]:

«Бюджетное послание Президента Российской Федерации направляется Федеральному Собранию Российской Федерации не позднее марта года, предшествующего очередному финансовому году.

В Бюджетном послании Президента Российской Федерации определяется бюджетная политика Российской Федерации на очередной финансовый год и плановый период».

Бюджетная политика на настоящем этапе определяется в соответствии с Распоряжением Правительства РФ от 17.11.2008 № 1662-р (ред. от 08.08.2009) «О Концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года» [3].

При этом данное Распоряжение направлено на достижение целей макроэкономической политики по следующим приоритетным направлениям:

1) снижение инфляции до 3 процентов в год;

2) переход к новым денежно-кредитным механизмам обеспечения спроса экономики на деньги, базирующимся на пополнении ликвидности преимущественно за счет рефинансирования банков Центральным банком Российской Федерации;

3) усиление стимулирующего влияния налоговой системы на развитие экономики при одновременном устойчивом выполнении фискальной функции;

4) увеличение государственных расходов на устранение инфраструктурных и институциональных ограничений и создание условий для инновационного развития экономики, повышения уровня и качества жизни населения;

5) повышение эффективности бюджетных расходов и системы бюджетирования.

Следовательно, бюджетная политика направлена на повышение эффективности бюджетных расходов и системы бюджетирования.

Важность данной деятельности трудно переоценить, однако, что понимать под эффективностью бюджетных расходов и какие использовать критерии для этого, не определено ни в одном нормативном документе.

Существующие отдельные нормативные акты, например в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности [4], носят локальный характер и не позволяют сделать выводы в целом по региональному бюджету, а разграничение полномочий между регионами и муниципалитетами делает эту задачу практически не решаемой.

При этом переход к планированию и утверждению бюджетов на 3 года должен обеспечиваться гибкость бюджетных процедур в случае изменения экономических условий или тактических приоритетов.

Бюджетное послание Президента РФ от 29 июня 2011 г. в качестве основных проблем и вызовов бюджетной политики выделяет следующие:

1) многие элементы государственной политики, в том числе в бюджетной и налоговой сферах, пока не в полной мере настроены на стимулирование инновационного развития страны;

2) не завершено формирование условий для модернизации экономики и изменения модели экономического роста;

3) для бюджетной системы страны сохраняются риски, обусловленные высокой зависимостью экономики и, соответственно, бюджетных доходов от внешнеэкономической конъюнктуры;

4) система государственного управления во многом функционирует в ручном режиме, требует постоянной подстройки;

5) по-прежнему существует ряд барьеров, препятствующих созданию бюджетными научными учреждениями и образованными государственными академиями наук научными учреждениями хозяйственных обществ, занимающихся внедрением результатов интеллектуальной деятельности;

6) рост с 1 января 2011 г. суммарной ставки страховых взносов в государственные внебюджетные фонды с 26 до 34 процентов оказало негативное влияние на перспективы экономического роста;

7) система государственных заказов не стимулирует производство инновационной продукции, а искусственное занижение цен имеет очевидный обратный эффект в виде падения качества поставляемой продукции или срыва исполнения заказа;

8) инструменты программно-целевого планирования слабо увязаны с формируемыми государственными программами;

9) сохранение высокой инфляции и бюджетного дефицита.

Для решения вышеперечисленных проблем необходимо:

1) сформировать список государственных приоритетов и задач, под решение которых использовать инновационные методы, например, повышение качества образования и здравоохранения;

2) не изменять модель экономического роста, основанную на сырьевых отраслях, а применять модернизацию экономики в них, путем углубленной переработки сырья и повышения добавленной стоимости в готовой продукции;

3) снизить риски бюджетной системы страны, обусловленные высокой зависимостью бюджетных доходов от внешнеэкономической конъюнктуры, за счет развития потребления сырьевых ресурсов внутри страны;

4) для отказа управления государством в ручном режиме разработать план мероприятий при различных социально-экономических ситуациях, тем более что количество возможных вариантов крайне мало;

5) стимулировать создание хозяйственных обществ, занимающихся внедрением результатов интеллектуальной деятельности, создав условия для тесного взаимодействия науки и реального сектора экономики;

6) признать, что пенсионная реформа, реформа здравоохранения и социальной защиты фактически провалились, а затем разработать принципиально новые подходы, основанные на минимальных государственных гарантиях;

7) систему государственных заказов изменить путем ужесточения отбора компаний, допускаемых к конкурсам, увязав сумму контракта и размер собственного капитала конкурсантов, а также разработать жесткие меры ответственности для недобросовестных участников;

8) перейти к формированию государственных программ только обеспеченных финансовыми ресурсами и при условии наличия соглашения о сохранении цен, заложенных в них;

9) запретить возможность бюджетного дефицита при бюджетном планировании, а для борьбы с высокой инфляцией изменить налоговую политику в отношении сверхдоходов отраслей, где она формируется, строительство, нефтегазовая отрасль и т. д.

Реализация вышеперечисленных мероприятий позволит сформировать новую модель экономического роста, основанную в значительной степени на частной инициативе, постоянных инновациях, эффективной системе предоставления публичных услуг, качественной финансовой и производственной инфраструктуре – цели, которые руководство государства считает приоритетными.

В настоящее время в мировой экономике сложилось два прямо противоположных подхода к бюджетным расходам: экономный и заемный.

Экономный подход характеризуется высокой долей накопления при получении сверхдоходов. Типичными представителями его являются Российская Федерация и Китай.

Заемный подход основывается на существенном превышении расходов бюджета над его доходами, разница при этом покрывается за счет внешних заимствований. Основоположником данного подхода явились Соединенные Штаты Америки, а затем их опыт подхватили страны Западной Европы – Италия, Испания, Греция и т. д.

Фактически, сложилась ситуация, когда страны, живущие по принципу «заемного подхода» живут за счет средств государств, придерживающихся «экономного подхода».

В отличие от стран с более диверсифицированной экономикой, Россия не может позволить себе иметь хронический дефицит бюджета и высокий уровень государственного долга, ставящих национальную экономику в зависимость от внешних условий и «вымывающих» из нее инвестиционные ресурсы.

Вместе с тем, «подушка безопасности», хорошо зарекомендовавшая себя в 2008–2010 гг., не может использоваться постоянно по следующим причинам:

- она существенно сократилась;
- рейтинг надежности США снижен;
- появилась возможность дефолта ряда стран, придерживающихся «заемного подхода».

Российской экономике необходимо перейти к системным действиям по следующим ключевым направлениям [5]:

1) интегрировать бюджетное планирование в процесс формирования и реализации долгосрочной стратегии развития страны;

2) закрепить, начиная с 2015 года, правила использования нефтегазовых доходов и ограничения на размер дефицита федерального бюджета;

3) на 2012–2013 годы снизить ставки страховых взносов в государственные внебюджетные фонды с 34 до 30 процентов, а для малого бизнеса и некоммерческих организаций, осуществляющих основную деятельность в области социального обслуживания населения, а также благотворительных организаций и организаций, применяющих упрощенную систему налогообложения, – до 20 процентов;

4) российская налоговая система должна отвечать современным вызовам в условиях глобализации экономики, обеспечивать справедливое налогообложение доходов экономических агентов и способствовать устойчивому развитию России как федеративного государства;

5) бюджетная политика должна быть нацелена на улучшение условий жизни человека, адресное решение социальных проблем, повышение качества государственных и муниципальных услуг, стимулирование инновационного развития страны;

6) повысить отдачу от использования государственных расходов, в том числе за счет формирования рациональной сети государственных учреждений, совершенствования перечня и улучшения качества оказываемых ими услуг;

7) должна быть существенно снижена роль государства в непосредственном управлении экономическими активами, за счет приватизации крупных пакетов акций в ключевых контролируемых государством компаниях, за исключением ряда организаций, работающих в инфраструктурных секторах или непосредственно связанных с обеспечением безопасности государства;

8) требуется кардинальная перестройка системы государственных закупок;

9) необходимо расширение применения механизмов государственно-частного партнерства при реализации инвестиционных проектов модернизации производства и внедрения инноваций;

10) в 2011 году необходимо завершить разработку поправок и внести изменения в Бюджетный кодекс Российской Федерации по вопросам государственного и муниципального финансового контроля, а также применения мер ответственности за нарушения бюджетного законодательства Российской Федерации;

11) требуется обеспечить эффективную децентрализацию полномочий между уровнями пуб-

личной власти в пользу субъектов Российской Федерации и местного самоуправления, за счет увеличения доли доходов региональных и местных бюджетов в структуре консолидированного бюджета РФ, соответствующие новому распределению полномочий;

12) Правительство РФ должно утвердить Концепцию создания и развития интегрированной информационной системы управления общественными финансами (электронный бюджет), направленную на повышение открытости, прозрачности и подотчетности финансовой деятельности публично-правовых образований, обеспечение доступности и достоверности информации для всех заинтересованных пользователей, повышение качества финансового менеджмента в секторе государственного управления, и начать реализацию этой Концепции.

Осуществление вышеперечисленных действий невозможно без участия субъектов Российской Федерации и муниципальных образований.

Для этого органы государственной власти субъектов Российской Федерации и органы местного самоуправления должны иметь больше возможностей влиять на формирование инвестиционного климата и решение социальных вопросов. Но для этого им необходима прочная финансовая основа, что потребует децентрализации полномочий, в том числе в налоговой сфере и сфере межбюджетных отношений, между федеральным, региональным и муниципальным уровнями власти.

Важно определиться, какие полномочия, в большей степени отвечающие целям и задачам органов государственной власти субъектов Российской Федерации, стоило бы передать на региональный уровень, полномочия, отвечающие целям и задачам органов местного самоуправления, – на муниципальный уровень. Соответственно этому должны определяться как расходные обязательства, так и источники доходов.

С нашей точки зрения современный подход во многом устарел. Рассмотрим пример с расходами на образование и здравоохранение. Эти целостные системы разделены между всеми тремя уровнями.

С 2012 года предполагается передать субъектам Российской Федерации федеральные государственные учреждения в сферах образования, здравоохранения, культуры, сельского хозяйства. Аргументируется это тем, что федеральные органы государственной власти должны заниматься правовым регулированием в соответствующих сферах, а не управлением имуществом, а финансовое обеспечение полиции должно производится за счет средств федерального бюджета.

С 1 января 2012 г. будут разграничены полномочия между органами государственной власти субъектов РФ и органами местного самоуправления в области охраны здоровья, которые предусматривают передачу вопросов оказания медицинской помощи населению в ведение органов государственной власти регионов. Это требует соответствующего перераспределения источников доходов между региональными и местными бюджетами.

В субъектах РФ существенно отличается структура расходов региональных бюджетов, и такая реорганизация без определения реальных возможностей по финансовому обеспечению работы учреждений, предлагаемых к передаче на региональный уровень, приведет к дополнительным проблемам.

В результате опять возникнет необходимость в виде субсидий региональным бюджетам и других форм поддержки из федерального бюджета, для чего необходимо определиться с формами, механизмами и объемами их предоставления. Сделать это до наступления нового финансового года не удастся, а текущие проблемы придется решать в режиме «ручного управления», затрачивая значительные бюджетные ресурсы для обеспечения социальной стабильности, при одновременно существующей «позиции просителя» со стороны региональных органов власти.

Для дополнительного стимулирования деятельности субъектов Российской Федерации по наращиванию регионального налогового потенциала требуется активнее использовать механизм финансового поощрения регионов, достигших наилучших результатов в сфере развития предпринимательства, привлечения инвестиций и, как следствие, обеспечивающих увеличение поступлений доходов в бюджеты всех уровней. На эти цели Правительству Российской Федерации необходимо предусматривать в федеральном бюджете дотации в размере не менее 10 млрд рублей ежегодно.

Перечислить данные регионы можно легко, и все они известны – Москва, Санкт-Петербург и т. д. Регионы, имеющие проблемы, будут все больше отставать от лидеров по социально-экономическому развитию. Фактически создается «замкнутый экономический круг».

Предложения по увеличению доли субсидий, распределяемых между бюджетами субъектов РФ до начала финансового года федеральным законом о федеральном бюджете, которая в настоящее время составляет около 15 процентов от их общего объема, а также закрепления за субъектами РФ права самостоятельно определять объемы

расходов, осуществляемых за счет соответствующих субвенций, по каждому из установленных направлений их расходования, без формирования системы общественного финансового контроля только приведет к снижению эффективности бюджетных расходов.

Необходимо ужесточить политику заимствований для покрытия дефицитов бюджетов со стороны регионов, т. к. в условиях экономического роста и улучшения ситуации на финансово-кредитном рынке возможен рост облигационных займов, без увязки их с реализацией инвестиционных проектов.

Осуществление преобразований в бюджетной сфере носит разнонаправленный характер, что не позволяет определить их влияние на экономику.

Государству необходимо для поддержки бюджетной реформы:

1) сдерживать рост цен (тарифов) на товары и услуги инфраструктурных отраслей, что будет играть создание эффективного механизма регулирования ценообразования как в монопольном, так и в конкурентном сегментах параллельно с расширением предложения этих товаров и услуг при последовательном восстановлении естественных монополий на рынке электроэнергии и услуг железнодорожного транспорта;

2) для сдерживания роста цен на рынках нефтепродуктов, строительных материалов и других сырьевых товаров перейти к заключению с ними органами государственной власти долгосрочных контрактов по заранее согласованным ценам;

3) для сдерживания инфляции на продовольственных рынках субъектов Российской Федерации воссоздать систему снабженческо-сбытовых сельскохозяйственных потребительских кооперативов с участием региональных органов власти;

4) создать условия для финансовых институтов кредитовать реальный сектор экономики, а не просто потребительский рынок;

5) усилить создание при государственном участии новых производств, развития бизнеса с высокой добавленной стоимостью, развития малого предпринимательства, прежде всего в высокотехнологичных секторах;

6) упростить администрирование налогов и сборов, за счет совершенствования налоговой системы, снижения издержек налогоплательщиков, связанных с исполнением налогового законодательства;

7) изменить амортизационную политику для целей налогообложения в части сокращения сроков полезного использования машин и оборудования, а также повышения размера амортизационной премии до 30 процентов по активной части основных фондов;

8) разработать реальный механизм частно-государственного партнерства на основе лизинга;

9) повысить уровень самостоятельности субъектов бюджетной системы, что связано в том числе с укреплением их доходной базы, умеренным повышением доли субъектов в доходах и расходах бюджетной системы. Изменение распределения доходов и обязательств в бюджетной системе должно происходить одновременно с согласованием стратегических задач, решаемых на всех уровнях системы государственного управления.

Реализация вышеприведенных предложений позволит провести бюджетную реформу на всех ее уровнях, в том числе, на региональном, что в свою очередь позволит субъектам Федерации повысить эффективность своих экономик.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. О бюджетной политике в 2012–2014 годах: бюджетное послание Президента РФ Федеральному собранию от 29.06.2011. Опубликовано на сайте "Российской Газеты" 29 июня 2011. URL: http://www.rg.ru/2011/06/29/poslanie-sten.html.
2. Бюджетный кодекс Российской Федерации: федеральный закон от 31.07.1998 N 145-ФЗ (принят ГД ФС РФ 17.07.1998) (ред. от 19.05.2010).
3. О Концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года: распоряжение Правительства РФ от 17.11.2008 № 1662-р (ред. от 08.08.2009).
4. Об оценке эффективности деятельности органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации и органов местного самоуправления городских округов и муниципальных районов в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности: указ Президента РФ от 13.05.2010 № 579.
5. О бюджетной политике в 2012–2014 годах: бюджетное послание Президента РФ Федеральному собранию от 29.06.2011. Опубликовано на сайте "Российской Газеты" 29 июня 2011. URL: http://www.rg.ru/2011/06/29/poslanie-sten.html.

УДК 334.012.23 (100) (063)

Потехина Анна Михайловна,
аспирант кафедры «Менеджмент», ИрГУПС, e-mail: Potiekhina84@mail.ru

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОРГАНИЗАЦИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УЧАСТНИКОВ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА: МАРКЕТИНГОВЫЙ ПОДХОД

A.M. Potiekhina

NEW PRODUCTION ENGINEERING OF THE ORGANIZATION OF INTERACTING PARTICIPANTS OF TRANSPORTATION PROCESS: THE MARKETING APPROACH

Аннотация. *Представлена новая технология взаимодействия собственников подвижного состава и компании ОАО «РЖД». Эта технология базируется на откорректированной нормативно-правовой базе и представляет собой тесное сотрудничество на линейном уровне. Данное маркетинговое предложение позволяет увеличить доходность перевозок за счет уменьшения времени доставки груза и улучшения показателей эффективности использования подвижного состава, а также улучшить маневренность станции, уменьшить время формирования поездов на грузовых станциях.*

Ключевые слова: *маркетинговый подход, новая технология, участники перевозочного процесса.*

Abstract. *The new technology of interaction of stock owners and 'RZD' Company is presented in this work. This technology is based on the adjusted regulatory and legal framework and represents the close co-operation at the line-level. This marketing proposal allows to increase the traffic profitability by reducing the time of cargo delivery and improving the rate of the efficiency of the rolling stock use. This proposal allows to improve the flexibility of the station, to reduce the time of forming trains at freight stations as well.*

Keywords: *marketing approach, new technology, participants in the transportation process.*

Появление на рынке грузовых перевозок новых участников перевозочного процесса – явление закономерное и уже произошедшее. Однако процессы взаимодействия между этими участниками остаются до сих пор не отрегулированными, что, в свою очередь, стало причиной снижения эффективности использования подвижного состава.

По утверждению некоторых специалистов, передача вагонов в аренду способствует увеличению оборота вагонов в 1,52 раза [1]. Вместе с тем, ряд ученых-транспортников отмечают, что эффективность использования вагонов в таких компаниях очень низка, так как порожний пробег вагонов при этом практически сравнивается с груженым [2]. На некоторых направлениях возникают устойчивые встречные пробеги вагонов одного рода. Но компания ОАО «РЖД» в своей работе продолжает ориентироваться на традиционные показатели, основным из которых является оборот вагона.

По данным профессора ПГУПСа В.В. Кудрявцева, средний оборот вагона в нашей стране достиг своего минимального показателя в 1965 году: 5,23 суток. В то время в США он составлял 26 суток. Соответственно данным пономерного учета подвижного состава, сегодня показатели оборота вагона у компании ОАО «РЖД» – 9 суток, у операторских компаний – 12 суток. Таким образом, согласно традиционной методике эффективность работы подвижного состава инвентарного парка выше, чем приватного [2].

В.В. Кудрявцев отмечает, что операторы учитывают не порожний пробег как таковой, а деньги, маржу от перевозки груза. Соответственно, у компании ОАО «РЖД» и собственников подвижного состава разные цели и миссии в работе.

Подвижной состав принадлежности МПС, а затем и ОАО «РЖД» всегда использовался для того, чтобы обеспечить имеющиеся заявки на перевозку грузов, то есть для удовлетворения транспортных потребностей экономики страны, обеспечения обороноспособности и целостности государства, его национальных интересов на международной арене. «А вот приватный вагон, принадлежащий типичной операторской компании, выходит на линию лишь для того, чтобы заработать на конкретной перевозке груза» [3].

Так, сейчас в России 85 % перевозок осуществляется по железной дороге, железнодорожный транспорт играет существенную роль регулятора и стимулятора экономики, выполняет важные соци-

альные функции, в том числе и отвечает за обороноспособность страны. А цель любого коммерческого предприятия – прибыль. Собственник иногда сознательно выжидает более выгодную перевозку в ущерб перевозочному процессу.

Основная тенденция последнего времени в этой связи – резкое увеличение парка приватных вагонов и соответственно их доли в общем объеме. Этот процесс шел, как известно, по двум направлениям. Во-первых, за счет роста вагонов сторонних организаций. С начала 2005 года этот парк вырос в полтора раза. Второе направление – передача инвентарных вагонов в дочерние компании, в частности в ОАО «ПГК». В результате доля приватного подвижного состава в общем парке увеличилась только за один год с 37 до 55 %.

Согласно «Программе структурной реформы на железнодорожном транспорте» весь инвентарный парк компании ОАО «РЖД» должен перейти в частные руки компаний-операторов. На сегодняшний день в частных руках находится 80 % подвижного состава на ВСЖД (рис. 1).

Соответственно, и объемы перемещаемого груза в собственных вагонах растут в геометрической прогрессии. При проведении исследований Суховского узла ВСЖД оказалось, что простой порожних вагонов растет прямо пропорционально увеличению числа собственников подвижного состава (рис. 2).

Структура взаимодействия изменилась в корне, и с выходом на рынок новых участников грузовых перевозок возникли принципиальные проблемы.

Механизм взаимодействия между участниками отсутствует, это объясняется в первую очередь отсутствием функциональной нормативно-правовой базы, соответствующей реалиям сегодняшнего дня. До сих пор нет закрепления статуса перевозчика, имеют место разногласия по Уставу, нет новых нормативных актов взаимодействия компаний-операторов и компании ОАО «РЖД».

Из-за несогласованности действий железных дорог и компаний-операторов в выборе вагонов, принимаемых к перевозке, эффективность использования подвижного состава снижается, коэффициент порожнего пробега достиг своего максимального значения – от 28 % до 41 %. Из-за множества «узких» мест в тарифной политике (Прейскурант 10-01), компания ОАО «РЖД» теряет доходы от перевозочной деятельности.

Не учитывается взаимосвязь инфраструктуры и подвижного состава на железнодорожном транспорте, где их работа объединена единым технологическим процессом. Железнодорожную инфраструктуру нельзя рассматривать как сеть, пассивно обеспечивающую возможность перемещения вагонов. Ни один вагон не может двигаться независимо от технологии работы инфраструктур-

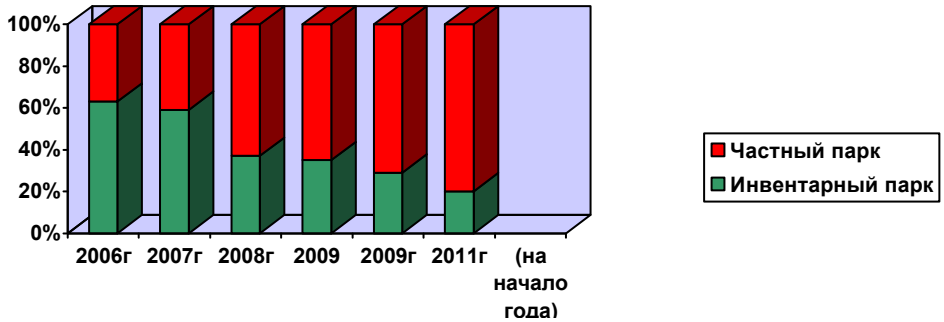


Рис. 1. Динамика соотношения показателей «инвентарный парк – частный»

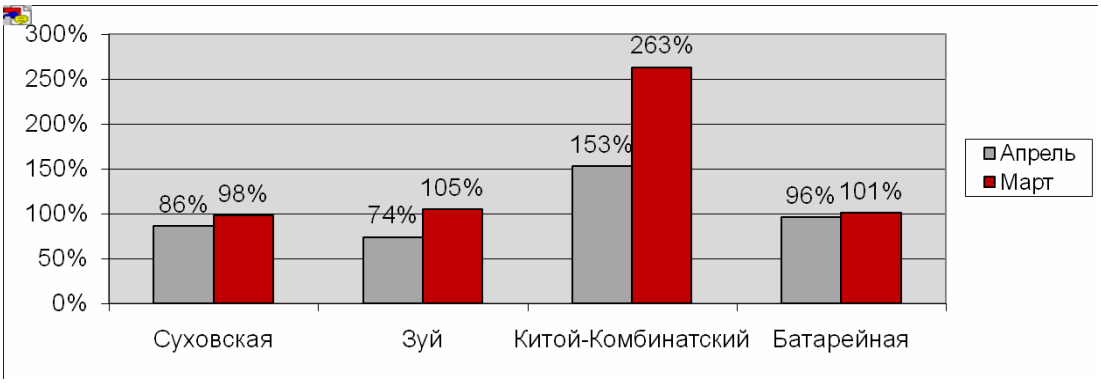


Рис. 2. Загруженность опорной станции Суховская подвижным составом

ных объектов, причем для качественного удовлетворения спроса на перевозки разными вагонами должна обеспечиваться разная скорость передвижения, а значит, они должны по-разному обслуживаться инфраструктурными объектами.

Скопление оформленных порожних вагонов ведет к ухудшению маневренности станции, возрастают расходы на маневровые операции, расходуется дополнительное время на эти операции, что имеет результатом неисполнение сроков доставки груза и, в конечном счёте, – предъявление претензии от собственника или оператора вагона. Неэффективное использование подвижного состава ведет к снижению качества перевозок и уменьшению конкурентоспособности компании ОАО «РЖД».

Цель данной статьи не только описать проблему, но, предложить пути её решения. В первую очередь это разработка универсального технологического процесса взаимодействия компании ОАО «РЖД» и компаний-операторов.

Прежде всего, эта технология включает создание нового механизма взаимодействия, базирующегося на откорректированной нормативно-правовой базе. Сейчас процесс становления рыночных отношений на транспорте опережает создание нормативных документов. Соответственно, создание прочной, отрегулированной нормативно-правовой базы, полностью соответствующей потребностям дня, является первоочередной задачей (табл. 1).

Стоит отметить, что правотворчество в данном вопросе должно учитывать мнения всех участников перевозочного процесса.

Взаимодействие ОАО «РЖД» и компаний-операторов не должно сводиться лишь к проведе-

Таблица 1

Этапы реализации проекта

Этапы реализациии	Действия
1. Изменение нормативно-правовой документации в соответствии со сложившимся положением. Четкое прописание всех необходимых постулатов для исключения двойственного понимания. 1.1. Изменение Устава	Изменение следующих статей: Статья № 1. Дополнить пункт «регулирует отношения между лицами, владеющими на праве собственности или ином другом праве подвижным составом»
	Статья № 2. Груз – объект (в том числе груз на своих осях, изделия, предметы, полезные ископаемые, материалы, сырье, отходы производства и потребления), принятый в установленном порядке для перевозки на основании договора о перевозке
	Статья № 10. В договорах об организации перевозок внести пункт, оговаривающий выбор конкретных вагонов, предъявляемых к оформлению в зависимости от их положения на станции, а также от общей поездной ситуации и иные условия организации перевозок
1.2. Изменение Правил перевозок	Изменение следующих пунктов: Пункт 25 Правил приема грузов к перевозке ж. д. транспортом (приказ МПС России 18.06.03 № 28), необходимо внести дополнения относительно приема к перевозке собственных порожних вагонов
	Пункт 31 Правила оформления порожних собственных вагонов. Взыскания штрафов в безакцептном порядке при отказе от подписи акта общей формы
2. Изменение договора на организацию перевозок	Доработать договор на организацию перевозок индивидуально с каждым крупным собственником (Дорожный центр фирменного транспортного обслуживания, сектор обслуживания клиентов), а также технологию взаимодействия с уточнением пунктов выбора подвижного состава
3. Доработка и внесение коэффициента доступности в Прейскурант 10-01	Рассчитать коэффициент доступности службой по тарифам в зависимости от анализа убытков компании от простоя собственных вагонов
4. Проведение круглого стола с крупными собственниками подвижного состава	Ознакомить с принятыми изменениями, выявить и наглядно представить положительные эффекты как для компании ОАО «РЖД», так и для компаний-собственников, обсудить вопросы, касающиеся данной проблемы
5. Ознакомление работников компании ОАО «РЖД» с принятыми изменениями	Довести до сведения всех причастных лиц изменения, внесенные в основную документацию. Провести дополнительные технические занятия по правилам оформления актов общей формы, правилам приема груза к перевозке. Установить ответственность должностных лиц на всех уровнях

нию рабочих встреч и совещаний, требуется ежедневное оперативное сотрудничество на всех уровнях.

После корректировки основополагающих документов следует внести некоторые пункты в договор на организацию перевозок. Так, например, туда стоит включить пункт, оговаривающий выбор подвижного состава в зависимости от его положения на станции. Клиент может подписать данный договор, тем самым решая проблему оперативного регулирования вагонного парка для железной дороги. При отказе от сотрудничества в выборе порожнего подвижного состава, что означает самостоятельный выбор в своих интересах и влечёт за собой повышение тарифа, в договорных отношениях должен фигурировать пункт об изменении тарифа на порожний пробег, и произведен перерасчет затрат ОАО «РЖД» на перевозку порожнего вагона, в зависимости от реальных затрат.

В тарифе на порожний пробег учитывается род груза, из-под которого следует вагон, род вагона, дальность перевозки. «2.16.1. Плата за порожний пробег с локомотивом РЖД собственных (арендованных) вагонов определяется по ставкам за ось в зависимости от расстояния перевозки и количества осей вагона по тарифным схемам, указанным в таблице, с применением коэффициентов, в зависимости от тарифного класса груза предшествующей перевозки» [4]. К примеру, в настоящее время тариф на перевозку груженого крытого собственного вагона для груза «прочие изделия швейной и текстильной промышленности» на расстояние Тайшет – Наушки составляет 47378,18 руб., а в порожнем – 19183 руб. В такой тариф предлагается включить дополнительный коэффициент, зависящий от количества порожних вагонов, находящихся на конкретной станции.

После устранения всех спорных моментов технология взаимодействия выглядит следующим образом. Собственник подвижного состава предоставляет начальнику станции или лицам, его заменяющим, заявку с указанием всех номеров вагонов к отправлению. Начальник станции или лица, его замещающие, рассматривают заявку, анализируют станционное положение, а также оценивают поездную обстановку. Выбирают наиболее «удобные» вагоны в нужном количестве и отсылают с помощью электронной почты откорректированную заявку собственнику подвижного состава. Далее собственник приступает к оформлению отобранных порожних вагонов.

При внедрении данного проекта ожидаются следующие результаты:

1. Уменьшение времени доставки груза.
2. Эффективное использование подвижного состава.
3. Улучшение маневренности станции и уменьшение времени формирования поездов на грузовых станциях.
4. Приведение нормативно-правовой базы в соответствие с изменившимися условиями грузовых перевозок.
5. «Прозрачность» договорных отношений, а также заинтересованность в сотрудничестве с компанией ОАО «РЖД» (рис. 3).

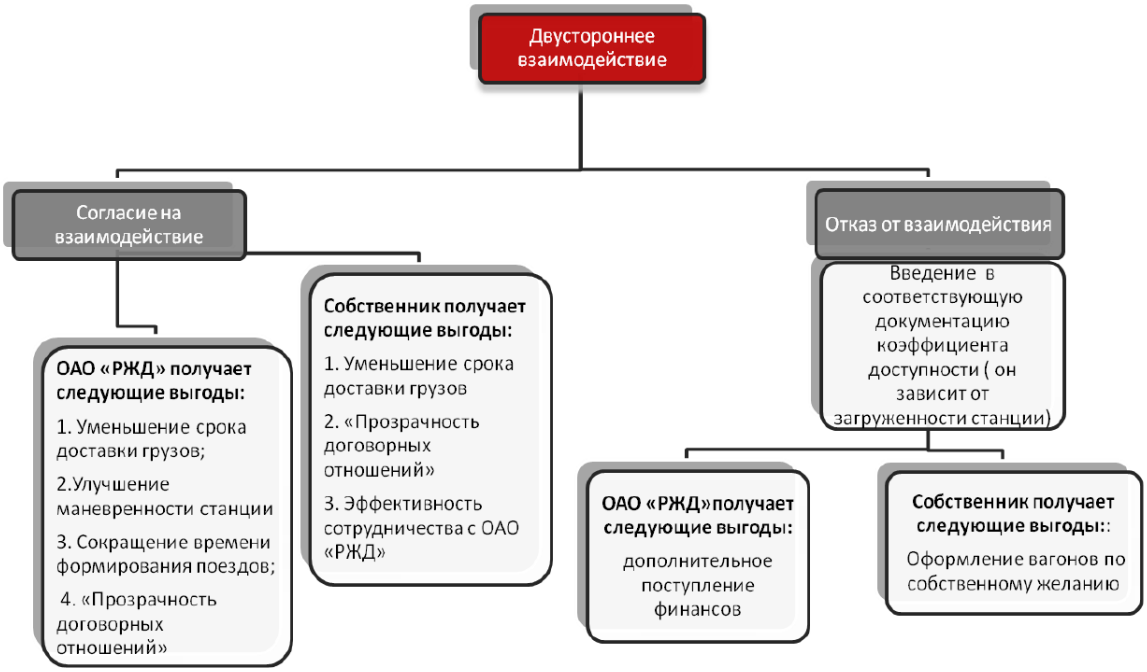


Рис. 3. Положительные эффекты после внедрения проекта

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бубнова Г.В. Модели управления грузовых перевозок. – М.: Маршрут, 2003. – стр. 94.
2. Кожевников Ю.Н. Экономическое обоснование механизма ценообразования в сфере грузовых перевозок на железнодорожном транспорте. – М., 2000.
3. Гурьев А.И. Порожний пробег: показатель вчерашнего дня? // Деловой журнал РЖД – Партнер — 08 (108) апрель 2007
4. Прейскурант 10–01, Федеральная энергетическая комиссия РФ, Постановление 47-т/5 от 17.06.2003.
5. Егизаров В.А., Ляндрес В.Б. Комментарий к Уставу железнодорожного транспорта Российской Федерации. – М.: Юридическая фирма «Контракт», 2005. – 271 с.
6. Правила перевозок грузов железнодорожным транспортом. Сборник-книга 1 – М. : Юридическая фирма «Юртранс», 2003 – 712 с.
7. Евпаков В.В. «Союзгрузпромтранс»: наши опасения и предложения. // Деловой журнал РЖД – Партнер – 07 (179) апрель 2010.
8. Интерактивный опрос: Нужна ли российскому рынку грузовых железнодорожных перевозок единая виртуальная биржа подвижного состава? // Деловой журнал РЖД – Партнер – 09 (181) май 2010.
9. Кучеренко П.Г. Реформирование-процесс международный. // Деловой журнал РЖД – Партнер – 09 (181) май 2010.
10. Материалы заседания круглого стола на тему «Реформа железнодорожного транспорта в РФ: состояние, проблемы и перспективы». // Деловой журнал РЖД – Партнер – 04 (176) февраль 2010.
11. Материалы 5-го Международного бизнес – форума «Стратегическое партнерство 1520». // Деловой журнал РЖД – Партнер – 13–14 (185–186) июль 2010.
12. Лемешко В.Г. Новая экономика и старые технологии трудности роста. // Деловой журнал РЖД – Партнер – 16 (140) август 2008.

УДК 657.9

Зиборева Ольга Юрьевна,
старший преподаватель кафедры «Бухгалтерский учет и налогообложение», ИрГУПС,
тел. 8(3952) 22-66-69, e-mail: botanist@yandex.ru

ВНУТРЕННИЙ АУДИТ РАСЧЕТОВ ПО НАЛОГАМ И СБОРАМ

O.U. Ziboreva

THE INTERNAL TAX AUDIT

Аннотация. *Совершенствование организации учетных процессов в корпорациях предполагает изменение подходов к контролю за расчетами по налогам и сборам. Данная проблема рассматривается автором.*

Ключевые слова: *аудит, налог, тариф, доход, расчеты.*

Abstract. *Perfection of organization of registration processes in corporations supposes change of approach to control of calculations on taxes and collections. This problem is examined by the author.*

Keywords: *audit, tax, tariff, profit, calculations.*

Развитие внутреннего аудита расчетов по налогам и сборам, а также усиление его роли в хозяйственной деятельности актуально для многих транспортных организаций. В результате проведения реформ в транспортных отраслях за последние годы созданы новые частные компании, а также акционированы и приватизированы государственные, муниципальные организации.

Законодательное утверждение ведения налогового учета, появление новых систем налогообложения, по-нашему мнению, ведет и к изменению взглядов на осуществление внутреннего аудита в организациях, поскольку трансформировались и система экономической информации, и организация учета (появились отделы налогового учета в крупных и средних организациях).

«Бухгалтерия крупной корпорации представляет собой самостоятельный технологический процесс производства, практически, вид деятельности. Учитывая количество структурных подразделений, их территориальную удаленность и многообразие хозяйственных операций, бухгалтерская служба превращается в огромный инертный механизм, требующий отдельной структуры управления и контроля. В данных условиях для формирования качественной отчетности корпорации, как налоговой, так и бухгалтерской (финансовой), недостаточно просто набрать квалифицированных специалистов. Требуется построить систему внутреннего бухгалтерского контроля, цель которого

не только снижение финансовых рисков, но и обеспечение достоверности бухгалтерской и налоговой отчетности» [1].

Реформирование организации учетных процессов требует, чтобы объектом пристального внимания внутренних аудиторов при централизации учета стало не только головное подразделение, но и структурные подразделения, которые территориально удалены, их первичный учет, внутренняя отчетность; а для консолидации учетных данных – деятельность дочерних, зависимых обществ. Необходимо формировать единые требования, правила и учетные принципы для всей корпорации. Особенно это касается дочерних компаний, так как какие-либо отклонения от единой учетной политики отдельных дочерних компаний даже при положительных финансовых результатах существенно осложняют процесс формирования отчетности группы и могут негативно отразиться на результатах деятельности корпорации в целом.

Мировая практика осуществления контроля в организациях показывает, что сложилась потребность во внешнем и внутреннем аудите.

Внутренний аудит – это контрольная деятельность внутри организации в рамках помощи специалистам и органам управления. Внутренний аудит наиболее эффективен тогда, когда его функции, как элементы одной системы, осуществляются в полной мере, взаимно дополняют друг друга, влияют друг на друга и повышают эффективность внутреннего контроля. На практике многие организации не в полной мере используют возможности внутреннего аудита, что актуально, в частности, и для крупных транспортных компаний.

Как показывает практическая деятельность, внутренний аудит становится контролем не только в сфере финансового (бухгалтерского) учета, но и в других сферах хозяйственной деятельности. Сегодня нельзя подтвердить достоверность финансовой (бухгалтерской) отчетности без подтверждения достоверности налоговой отчетности.

Усиление значимости внутреннего аудита расчетов по налогам и сборам в современных условия хозяйствования организаций прежде всего связано с обязанностью ведения налогового учета, что регламентировано главой 25 «Налог на прибыль организаций» Налогового кодекса РФ. Следовательно, возросла роль правильности оформления первичных документов не только для бухгалтерского учета, но и для налогового.

В крупных корпорациях актуальными являются проблемы возникновения ошибок на различных информационных уровнях, так как при составлении сводной отчетности ошибки могут появляться на одном уровне и входить в отчетность более высокого уровня. Актуальность этой проблемы усиливается в рамках составления консолидированной и трансформируемой в МСФО отчетности, что подчеркивает необходимость усиления контроля в дочерних и зависимых хозяйственных обществах, входящих в крупные корпорации.

Контрольная функция аудита сегодня не может в полной мере осуществляться без информационно-аналитических, методологических и консультационных функций, которые необходимо развивать во внутреннем аудите для контроля расчетов по налогам и сборам.

Следовательно, в крупных компаниях функции внутреннего аудита может осуществлять не только служба внутреннего аудита, но и уполномоченные структурные подразделения организации, поскольку для поддержания достоверности информации о расчетах по налогам и сборам существует система мероприятий (постановка учета и оценка правильности расчетов по налогам и сборам, консультирование, планирование, защита интересов организации в судах и другие) по созданию и поддержанию системы внутреннего контроля экономического субъекта за правильностью исчисления налогов и сборов.

Следовательно, понятие внутреннего аудита в связи с экономическими и законодательными преобразованиями существенно трансформировалось; усилилось значение внутреннего аудита расчетов по налогам и сборам в аудиторской деятельности, в системе внутреннего контроля организаций.

Вышеуказанные обстоятельства, а также исследование ряда определений аудита и внутреннего аудита обосновывают целесообразность уточнения понятия «внутренний аудит».

Придерживаясь требований нормативного определения, утвержденного Федеральным правилом (стандартом) аудиторской деятельности № 29 «Рассмотрение работы внутреннего аудита», автор предлагает адаптировать понятие внутреннего аудита, проводимого в области расчетов по налогам и сборам, к потребностям организаций, имеющих сложную корпоративную структуру управления, и определяет, что **внутренний аудит расчетов по налогам и сборам – это контрольная деятельность в области расчетов по налогам и сборам, осуществляемая внутри аудируемой организации службой внутреннего аудита (другими подразделениями).**

Таким образом, можно сделать вывод о том, что усилена роль аудита системы налогообложения, в которой формируется и обобщается информация для ее использования в бухгалтерском учете в области расчетов по налогам и сборам, а также бухгалтерской (финансовой) отчетности, что ведет

к совершенствованию внутреннего аудита и усилению его функций (контрольных, информационно-аналитических, методологических и консультационных) в условиях реформирования организации управления крупных корпораций.

Филиалы и другие обособленные подразделения ОАО «РЖД», ответственные за представление налоговой отчетности и уплату налогов, в установленном порядке исполняют обязанности ОАО «РЖД» по уплате в соответствующих долях в федеральный бюджет, бюджеты субъектов Российской Федерации и муниципальных образований, в государственные внебюджетные фонды следующих налогов (включая авансовые платежи), сборов и платежей: налог на доходы физических лиц; единый социальный налог; страховые взносы на обязательное пенсионное страхование; отчисления на обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний; налог на имущество организаций; транспортный налог; земельный налог; водный налог; налог на прибыль в части бюджетов субъектов Российской Федерации (кроме города Москвы); прочие [2].

Особенностью организации налогового учета в ОАО «РЖД» является наличие сводных документов, таких как: сводные деклараций по налогам, сводные регистры, сводная книга покупок и продаж и других, что увеличивает риски ошибок. На основе изучения учетной политики по бухгалтерскому и налоговому учету и анализа показателей можно оценить масштабы деятельности ОАО «РЖД» и его филиалов как общенациональные. ОАО «РЖД» является крупнейшим налогоплательщиком, пополняющим доходную часть бюджета Российской Федерации.

Основной доход ОАО «РЖД» получает от перевозок (97,62 % в 2009 году), который в большей мере поступает от грузовых перевозок. Прирост тарифов на грузовые перевозки в отчетном периоде, по сравнению с базисным, в среднем на 8 %, привел к увеличению суммы прибыли от грузовых перевозок на 852 млн 639 тыс. руб. Влияние на сумму прибыли от грузовых перевозок изменения объема грузовых перевозок получилось отрицательным, так как в результате сокращения в отчетном периоде выручки от грузовых перевозок по причине экономического кризиса сумма прибыли от грузовых перевозок уменьшилась на 10 млрд 260 млн 814 тыс. руб.

Отсюда следует, что ключевым объектом проверки, для внутреннего аудита расчетов по налогам и сборам, является правильность формирования и применения тарифа, что означает движение к развитию рынка перевозок и свободному тарифообразованию на перевозки грузов и пассажиров (за исключением социально значимых тарифов, которые регулируются государством).

В результате анализа факторов, влияющих на налоговую базу по налогу прибыль от перевозок, выявлено, что для внутреннего аудита расчетов по налогам и сборам ключевым по риску объектом проверки является правильность формирования и применения тарифа. Тариф на транспорте как объект внутреннего аудита расчетов по налогам и сборам представлен на рис. 1.

Применение тарифов на практике означает получение дохода, отсюда следует, что правильный расчет тарифа и его применение в деятельности транспортной организации оказывают прямое влияние на налогообложение и расчеты по налогам и сборам, в частности, по налогу на добавленную стоимость, и налог на прибыль.

При формировании сводной финансовой отчетности в ОАО «РЖД», бухгалтерский баланс формируется на основе данных головной органи-

Рис. 1. Тариф как объект внутреннего аудита расчетов по налогам и сборам

зации, отчетности филиалов и структурных подразделений, а при формировании консолидированной отчетности – с помощью специальных методик: к сводной отчетности филиалов добавляются данные дочерних и зависимых хозяйственных обществ: филиалы ОАО «РЖД», не являясь юридическими лицами, имеют балансы, являющиеся частью сводной отчетности, а дочерние и зависимые общества – это юридические лица, имеющие самостоятельный баланс и входящие в группу организаций по консолидированной отчетности.

Создание системы вертикального управления нового типа, с усилением централизации учетных процессов в системе ОЦО, по нашему мнению, создает укрупнение информационных потоков в региональных отделениях филиалов ОАО «РЖД» за счет первичной информации, поступающей от организаций, входящих в дирекции, функциональные филиалы.

Таким образом, это должно привести к усилению контроля за первичной документацией, регистрами и отчетностью на этом уровне, поскольку ошибки могут повторяться на других уровнях: регионального общего центра обслуживания (ОЦО) и главного (управляющего) общего центра обслуживания (ОЦО) по обработке учетной информации. Первичные электронные документы могут отбираться для внутреннего оперативного аудита, с целью текущего и предварительного контроля.

Введение новой системы централизации учетных процессов в организациях, где созданы общие центры обслуживания (ОЦО) по обработке учетной информации, а первичные документы сканируются и хранятся в электронных архивах организации, сводит роль бухгалтеров в территориальных предприятиях к роли оператора, принимающего в центрах сканирования документы к автоматизированному учету и отправке в ОЦО.

Таким образом, ОАО «РЖД» формирует автоматизированную базу первичной документации, что меняет и подходы к проведению внутреннего аудита: при использовании современных информационных технологий возможно проведение внутреннего аудита централизованно.

Следовательно, можно определить место внутреннего аудита расчетов по налогам и сборам в современной аудиторской деятельности и его виды, приведенные в табл. 1. При проведении внутреннего аудита расчетов по налогам и сборам

Таблица 1

Внутренний аудит расчетов по налогам и сборам

№ п/п	Виды внутреннего аудита расчетов по налогам и сборам	Характеристика деятельности видов внутреннего аудита расчетов по налогам и сборам	Результат применения в деятельности внутреннего аудита расчетов по налогам и сборам
1.	Аудит на соответствие требованиям	Контроль правил, законов, предписаний; проверка компетенции персонала в области расчетов по налогам и сборам	Соответствуют ли работники занимаемой должности в области учета расчетов по налогам и сборам, проверка соблюдения нормативных актов и внутренней документации
2.	Управленческий аудит как оперативный	Контроль в рамках оперативного внутреннего аудита расчетов по налогам и сборам	Проверка текущих операций, дающих информацию для налогового учета; предварительный контроль текущего формирования налоговых баз по налогам
3.	Управленческий аудит как внутренний аудит хозяйственной деятельности	Анализ эффективности управления налогообложением, в т. ч. анализ и сопоставление данных налогового планирования с уплатой налогов	Сопоставление плановых платежей по налогам и сборам с фактическими, выявление отклонений; анализ штрафных санкций по налогам и их влияние на результаты деятельности
4.	Аудит финансовой отчетности	Проверки расчетов по налогам и сборам в составе контроля финансовой (бухгалтерской) отчетности	При проверках финансовой отчетности выделяют область проверок расчетов по налогам и сборам
5.	Аудит расчетов по налогам и сборам как специальное задание	Проверки отдельно взятых налогов по указанию менеджеров (администрации)	Контроль за ошибками по отдельно взятым налогам, правильность исчисления элементов налогообложения, избранного для проверки налога

на соответствие требованиям осуществляется контроль за соблюдением норм и правил, законов, связанных с налогообложением, а также проверка персонала на соответствие занимаемой должности, когда проверяется компетентность работников в области налогового учета и налогового законодательства.

При проведении управленческого аудита осуществляется контроль в рамках внутреннего оперативного аудита расчетов по налогам и сборам как контроль текущего формирования налоговых баз, то есть проверка текущих операций, дающих информацию для налогового учета.

Управленческий аудит, проводимый в рамках внутреннего аудита хозяйственной деятельности, отслеживает ее эффективность: если организация использует налоговое планирование, специалисты по налогообложению всегда могут сопоставить плановые платежи по налогам с фактической уплатой и выявить отклонения; проанализировать штрафные санкции и их влияние на результаты деятельности организации.

Во внутреннем аудите хозяйственной деятельности выделяется внутренний аудит расчетов по налогам и сборам в составе финансовой отчетности. Аудит расчетов по налогам и сборам как специальное задание – контроль отдельно взятых налогов по указанию менеджеров (администрации), правильность исчисления элементов налогообложения, избранного для проверки налога. Все эти виды внутреннего аудита связаны между собой как элементы системы внутреннего аудита, взаимодействуют друг с другом, влияют друг на друга и изменяют качество системы внутреннего контроля расчетов по налогам и сборам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аксенов Б.А. Реализация системы внутреннего контроля корпорации в условиях российского законодательства. – Экономика железных дорог. – 2008. – № 11. – С. 25–26.
2. «Положение об учетной политике для целей налогообложения открытого акционерного общества «Российские железные дороги».

УДК 656.212.5

Котельников Сергей Сергеевич,
ассистент кафедры управления эксплуатационной работой, ИрГУПС,
тел. 8 (914) 9521-566, e-mail: Ori-Gami@yandex.ru

АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМНОЙ ЗАДАЧИ СООТВЕТСТВИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ

S.S. Kotelnikov

THE ALGORITHM OF SOLUTION OF A PROBLEM OF MATCHING OF TECHNICAL AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF RAILWAY STATIONS

Аннотация. *Представлена схема разделения технических и технологических параметров, влияющих на работу железнодорожных станций. Разработан алгоритм определения оптимального соответствия технических и технологических параметров работы станций.*

Ключевые слова: *железнодорожные станции, надежность работы железнодорожных станций, технические и технологические параметры работы станции.*

Abstract. *The scheme of separation of technical and technological parameters influencing the operation of railway stations was offered. The algorithm of determining the optimal matching of technical and technological parameters of the stations was created.*

Keywords: *railway station, reliability of the railway stations, technical and technological parameters of the station.*

Эксплуатационная надежность станций отражает слаженность и согласованность взаимодействия в работе станций и отдельных внутристанционных систем между собой. Этот показатель зависит от интервалов времени, через которые прибывают поезда в парк с прилегающих участков, от числа бригад технического осмотра (ПТО) и длительности операций с каждым составом, от мощности горки и ее перерабатывающей способности, определяемой горочным интервалом, и т. д. Недостаточное техническое или технологическое оснащение в работе железнодорожных станций

может привести к существенным сбоям и нарушениям.

Влияние всего комплекса технических и технологических параметров на показатели работы станции можно представить в виде структуры

$$C = \{\Pi_{\text{ТЕХ}}; \Pi_{\text{ТЕХНОЛ}}\}, \quad (1)$$

где $\Pi_{\text{ТЕХ}}$, $\Pi_{\text{ТЕХНОЛ}}$ – совокупность технических и технологических параметров работы станций соответственно, при этом

$$\Pi_{\text{ТЕХ}} = \{\Pi_1^{\text{Тех}}; \Pi_2^{\text{Тех}}; \Pi_3^{\text{Тех}}; ...; \Pi_N^{\text{Тех}}\}, \quad (2)$$

где $\Pi_1^{\text{Тех}}$; $\Pi_2^{\text{Тех}}$;…; $\Pi_N^{\text{Тех}}$ – технические параметры работы станций: количество и емкость приемо-отправочных путей, примыкание подходов и железнодорожных путей необщего пользования, размеры станционной площадки, расположение основных парков и т. д.

$$\Pi_{\text{ТЕХНОЛ}} = \{\Pi_1^{\text{Технол}}; \Pi_2^{\text{Технол}}; \Pi_3^{\text{Технол}}; ...; \Pi_N^{\text{Технол}}\}, \quad (3)$$

где $\Pi_1^{\text{Технол}}$; $\Pi_2^{\text{Технол}}$;…; $\Pi_N^{\text{Технол}}$ – технологические параметры работы станций: количество маневровых и горочных локомотивов, количество бригад ПТО, последовательность и длительность выполнения операций и т. д.

Все технические и технологические параметры можно разделить на «управляемые» и «неуправляемые» (рис. 1). Значения «управляемых» параметров (ввод дополнительных бригад ПТО, ввод дополнительного маневрового или горочного локомотива, строительство дополнительных путей и т. д.) могут быть изменены лицом, принимающим решения (ЛПР), или соответствующим органом в пределах определенных сроков времени.

«Неуправляемые» параметры не могут быть изменены в значительной степени в связи со сложившимися обстоятельствами: ограниченная длина станционной площадки по местным условиям, расположение основных парков, схема примыкания железнодорожных линий и путей необщего пользования, последовательность и продолжительность выполнения операций и т. д. Необходимо отметить, что в некоторых случаях в связи с местными условиями «управляемые» параметры, количество и длина приемо-отправочных путей, становятся «неуправляемыми» и не могут быть изменены в краткосрочный период.

Технологические параметры, последовательность и продолжительность выполнения операций, являются «неуправляемыми» при существующем техническом и технологическом оснащении. Однако сооружение новых устройств механизации и автоматизации станционных процессов позволяет сократить время нахождения вагонов под основными технологическими операциями.

В зависимости от числа обслуживающих устройств различают системы одноканальные – при одном обслуживающем устройстве и многоканальные – при двух и более. Примером одноканальной системы является система, включающая в качестве обслуживающего устройства сортировочную горку. При обработке составов поездов в парке двумя бригадами технических осмотрщиков система является двухканальной.

Для определения надежности рассматриваются вероятностные состояния системы. Надежность работы парка определяется суммой вероятностей для всех состояний системы ($\sum p_n$), когда в парке и в обслуживающем устройстве нет ни одного поезда и когда в системе находится «количество путей + 1» поездов.

Аналитическое выражение p_n с эрланговским [1] входящим потоком и показательным временем обслуживания определяется по формуле:

$$p_n = \psi^n \cdot (1 - \psi), \quad (4)$$

где p_n – распределение вероятностей состояния

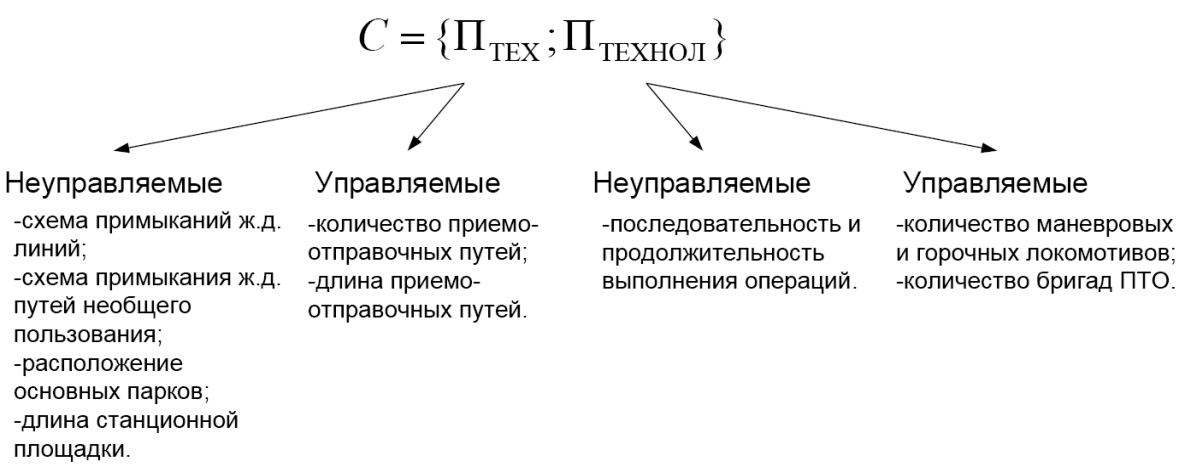


Рис. 1. Схема распределения параметров работы станций

системы, т. е. вероятностей того, что в произвольный момент в системе и в очереди будет находиться n требований; ψ – загрузка системы.

Отношение интенсивности входящего потока требований к интенсивности обслуживания представляет собой загрузку одноканальной системы:

$$\psi = \frac{\lambda}{\mu}, \quad (5)$$

где λ – интенсивность входящего потока;

μ – интенсивность обслуживания.

Интенсивность входящего потока является величиной, обратной среднему значению интервалов между поступающими требованиями:

$$\lambda = \frac{1}{I_{\text{сред}}}, \quad (7)$$

где $I_{\text{сред}}$ – среднее значение интервала прибытия.

Интенсивность обслуживания обратно пропорционально среднему времени обслуживания:

$$\mu = \frac{1}{\tau_{\text{сред}}}, \quad (8)$$

где $\tau_{\text{сред}}$ – среднее время обслуживания.

Загрузка двухканальных систем рассчитывается по формуле:

$$\psi = \frac{\lambda \cdot M[t_{обсл}]}{2}, \quad (9)$$

где $M[t_{обсл}]$ – математическое ожидание времени обслуживания грузового поезда.

Надежность работы парков в диапазоне 90–99 % обеспечивает нормальную работу прилегающих участков. При этом на ближайшем раздельном пункте в среднем в сутки может задерживаться 0,25–2,5 поездов. Важно отметить, что одновременно будет задерживаться только по одному поезду. Следует считать, что задержки поездов в указанном диапазоне, когда одновременно на промежуточных станциях участка будет задерживаться лишь по одному, а эпизодически (один раз в двое–десять суток) и по два поезда, не вызовут затруднений в работе большинства станций.

Значения эксплуатационной надежности работы транзитного парка сортировочной станции при двух одновременно работающих бригадах ПТО представлены на рис. 2. На графике отмечена контрольная линия надежности, равная 90 %. Числовые значения, отклоняющиеся в меньшую сторону от контрольной линии надежности на более чем 5–10 %, вызывают одновременные задержки у двух и более поездов чаще одного раза в сутки. Данный факт может существенно нарушить работу парков соседних станций и прилегающих участков. Поэтому определение оптимального технического и технологического оснащения станций должно учитывать надежность работы на уровне не ниже 90 %.

Выбор оптимального соотношения технических и технологических параметров ЛПР может кардинально различаться в некоторых случаях. Для увеличения пропускной и перерабатывающей способности технической станции в густонаселенном городе особое затруднение возникает при строительстве дополнительных технических средств. Поскольку нет места для расширения, необходимы огромные инвестиции из-за сносов существующих зданий и сооружений, выноса инженерных сетей и коммуникаций и т. д. Оптимальным решением для рассматриваемого варианта является увеличение штата работников бригад ПТО, количества горочных и маневровых локомотивов при условии достаточной пропускной способности горловин. Меры для увеличения перера-

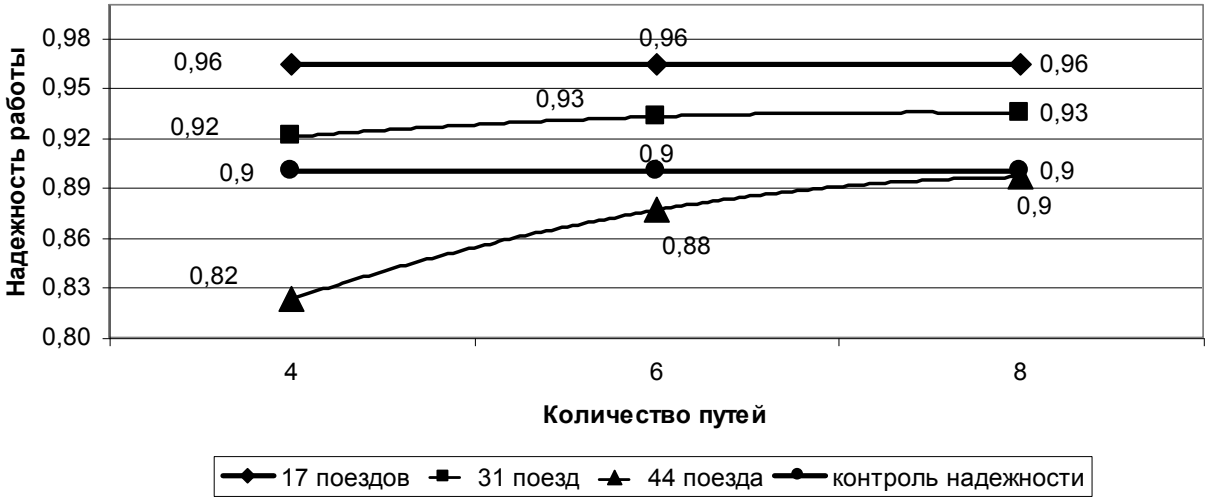


Рис. 2. График надежности работы транзитного парка сортировочной станции

батывающей способности станции в малонаселенном регионе будут кардинально отличаться. Ввод дополнительного квалифицированного штата работников на станции требует организации вахтового способа доставки работников. А для этого необходимо построить общежитие, прачечную и т. д. В этом случае каждый работник требует существенных капитальных затрат на благоустройство помимо заработной платы и доставки к месту работы и обратно.

Оптимальный выбор соотношения технических и технологических параметров представлен в виде кривых безразличия на рис. 3.

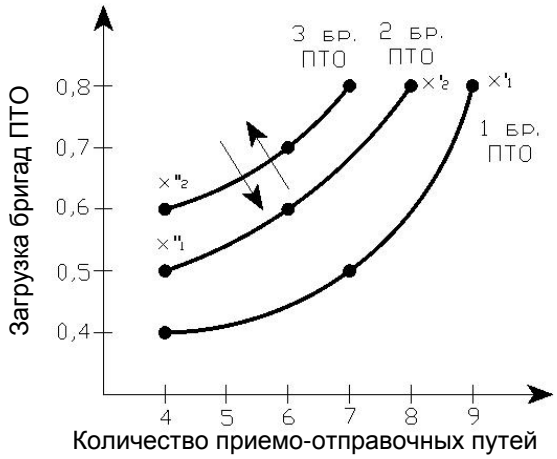


Рис. 3. Кривые безразличия

Все точки, используемые при построении кривых, обеспечивают эксплуатационную надежность работы станции на уровне более 90 %. Каждая кривая соответствует одновременной работе одной, двух или трех бригад технического осмотра. При этом направление предпочтения соотношения путей и загрузки бригад для железнодорожных станций, расположенных в густонаселенном городе, является восходящим, а для железнодорожных станций, расположенных в малонаселенных регионах, – нисходящим.

Точки x'_1 и x''_1, x'_2 и x''_2, обозначенные на кривых безразличия (рис. 3), характеризуют одинаковый объем работы, но различное техническое и технологическое оснащение. Так, для варианта развития железнодорожных станций в густонаселенном городе предпочтительнее точка x''_1, чем x'_1, и точка x''_2 чем x'_2.

Выбор оптимального соотношения параметров является трудоемким процессом и зависит от многих факторов. Поэтому окончательный вариант определения соотношения технических и технологических средств должен быть произведен при помощи динамического программирования [2, 3] с разработкой схем оптимизации этапного развития с учетом инвестиционных вложений, изменения эксплуатационных расходов, связанных с задержками поездов из-за занятости путей, бригад ПТО или горочного локомотива для каждого отдельного варианта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Котельников, С.С. Основные параметры колебаний входящих поездопотоков на сортировочные станции / С.С. Котельников // Актуальные проблемы развития транспортного комплекса : материалы 5 Всероссийской научно-практической конференции, 25–27 февраля 2009 г. – Самара : Изд-во СамГУПС, 2009. – С. 23–24.
2. Котельников, С.С. Автоматизированный выбор параметров технико-технологической структуры развития промышленных станций / С.С. Котельников // Современные технологии. Системный Анализ. Моделирование. – Иркутск. 2011. – №4 (32). – С. 150–155.
3. Беллман Р. Динамическое программирование / пер. с англ. И.М. Андреевой, А.А. Корбута, А.В. Романовского, под ред. Н.Н. Воробьева. – М.: Издательство иностранной литературы, 1960. – 401 с.

УДК 004.8:343.131.8

Аршинский Леонид Вадимович,
д. т. н., доцент, заведующий кафедрой информационных систем
Иркутского государственного университета путей сообщения
Жигалов Николай Юрьевич,
к. ю. н., доцент, заместитель начальника Восточно-Сибирского института МВД России по учебной работе
Мункожаргалов Цырен Батомункуевич,
адъюнкт Омской академии МВД России, тел.: +7-914-888-52-20; e-mail: larsh@mail.ru

НЕКЛАССИЧЕСКИЕ ЛОГИКИ В ЛОГИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ДОКАЗЫВАНИЯ ПО УГОЛОВНЫМ ДЕЛАМ

L.V. Arshinskiy, N.Y. Zhigalov, Z.B. Munkozhargalov

APPLICATION OF NON-CLASSICAL LOGICS IN LOGICAL-MATHEMATICAL MODELING OF JUDICIAL PROOF IN CRIMINAL CASES

Аннотация. *Выполнен обзор различных логических систем с точки зрения их применимости для моделирования доказывания по уголовным делам. Рассматриваются непрерывные, конечнозначные и индуктивные модели рассуждений.*

Ключевые слова: *вероятность, многозначная логика, векторная семантика, логический вывод, судебное доказывание.*

Abstract. *The review considers various logical systems from the point of view of their application to the modeling for judicial proof in criminal cases. Infinite-valued, finite-valued and inductive reasoning models are discussed in this paper.*

Keywords: *probability, many-valued logic, vector semantic, logical conclusion, judicial proof.*

Проблема применения информационных технологий и математического моделирования в доказывании по уголовным делам является одной из дискутируемых в современной литературе. Предпосылки к этому следующие.

1. Многие криминалистические экспертизы требуют привлечения научных методов, в том числе опирающихся на компьютерную обработку и соответствующий математический аппарат. Например, теории распознавания образов в почерковедческой и дактилоскопической экспертизах, теории вероятностей в генетической экспертизе и т. п.

2. Решения, выносимые судом, основываются на внутренней убежденности, которая опирается на веру в истинность представленных суду обстоятельств дела. Но вера, убежденность – это субъективные характеристики, для работы с которыми в различных предметных областях предложено большое число разнообразных логико-математических подходов, в том числе – оформленных в виде программно-информационных систем.

3. Информация, используемая при доказывании, может носить предположительный, вероятностный характер, что также допускает использование соответствующих математических техник.

4. Решения, как на этапе расследования, так и на этапе рассмотрения дела судом, особенно при наличии косвенных доказательств, принимаются на основе умозаключений. Строятся умозаключения по законам логики, которая сегодня в высокой степени формализована и снабжена развитым математическим аппаратом.

Оставляя в стороне модели и методы специальных наук, применяемых, например, при производстве судебных экспертиз и расследовании отдельных видов преступлений, сосредоточимся на вопросах логико-математического моделирования доказывания и связанных с этим вопросах. При этом обратим внимание на две принципиальные (с этой точки зрения) особенности судебного исследования.

Во-первых, судебное исследование индуктивно по своей природе. И следствие, и суд идут от частных фактов к общим, от улик, свидетельских показаний и иных материалов дела к выводу о виновности/невиновности подсудимого. На отдельных этапах могут, как собственно и в науке, привлекаться дедуктивные схемы рассуждений, но логическая основа любого судебного решения всегда индуктивная, т. е. не гарантирующая истины.

Во-вторых, информация, на основании которой принимаются решения, может носить неполный и противоречивый характер. Это обусловлено

как состязательностью процесса, так и сложностью формирования доказательной базы. Замалчивание «неудобных» фактов, обман, ошибки и иные причины приводят к снижению качества информации. В результате в посылках, используемых при дедуктивных рассуждениях, может присутствовать элемент сомнения, неуверенности, неполного знания, ошибочных представлений. Это также необходимо принимать во внимание. В соответствующей литературе в подобных случаях вводят понятие степени истинности (правдоподобия, достоверности, вероятности и т. п.) суждений [1].

Любое моделирование, в том числе математическое, предполагает выбор или разработку модели, наиболее полно отражающей основные особенности исследуемого объекта. При этом соответствующие предметные области условно делят на два больших класса: хорошо- и плохоформализуемые (используется также термин «слабоструктурированные») [1, 2]. Первые описываются языком традиционной математики: уравнениями, функциями и т. п. Вторые – качествами и качественными соотношениями (объекты, действия, понятия, отношения между ними), выраженными в символьной форме. Компьютерная реализация второго класса моделей осуществляется на языках программирования, поддерживающих обработку символьной информации. Судебное доказывание следует отнести ко второму классу. Моделирование в этом случае можно осуществлять, например, на основе соответствующих логических теорий, продукционных моделей, теории вероятности, сетевых представлений (семантические сети, фреймы) и т. д.

В теории судебных доказательств и судебно-экспертной деятельности нередко пользуются термином «вероятность» [3]. Еще Л.Е. Владимиров отмечал, что «при оценке силы судебных доказательств, на основании приблизительных обобщений, нужно всегда помнить, что, при невозможности знать все случаи исключений, мы получаем только вероятное доказательство (probable evidence), более или менее высокую степень вероятности, на основании которой обыкновенно и действуем в жизни» [3]. А также: «Уголовно-судебная достоверность есть такое стечение вероятностей, вытекающих из представленных на суде доказательств, которое способно привести судью к внутреннему убеждению в том, что прошлое событие, составляющее предмет исследования, имело место в действительности» [3]. Сходные точки зрения существует и в современной правовой науке ([4, 5]).

Представление о вероятностном характере знания нашло применение в сфере судебной экспертизы. В частности, приказ МВД РФ от 01.06.1993 № 261, регламентирующий деятельность экспертно-криминалистических подразделений ОВД, утвердил «Положение о производстве экспертиз в экспертно-криминалистических подразделениях ОВД», в котором наряду с категорическими предусмотрен и вероятный вывод эксперта. В практической деятельности судебно-экспертных учреждений заключения эксперта с вероятностными выводами составляют существенную часть от их общего числа. Вероятностный характер могут носить заключения даже идентификационных экспертиз (генетической, дактилоскопической, почерковедческой и т. д.). Вероятность в судебном доказывании появляется также в случаях, когда констатируется принадлежность объекта классу, например, по признаку группы крови, по наличию не идентифицирующих, а лишь классифицирующих следов и т. п. Таким образом, эксперт придает выводу вероятностную форму в случаях малоубедительной экспертной информации.

Популярность понятия вероятности в вопросах моделирования доказывания обуславливается не только действительно вероятностным характером некоторых доказательств и интуицией, подсказывающей, что «нечто подобное должно иметь место», но и наличием полноценного, хорошо устоявшегося аппарата теории вероятности и математической статистики. В принципе, это позволяет применять данные разделы математики в рассматриваемой области, однако при этом возникает и ряд проблем.

1. В современной науке и вычислительной практике прослеживается несколько взаимодополняющих взглядов на вероятность:

– вероятность как отношение числа возможных благоприятных исходов некоторого опыта к общему числу всех возможных исходов опыта («классическое» понимание вероятности в духе основоположников – Б. Паскаля и П. Ферма);

– вероятность как предел отношения числа благоприятных исходов опыта к общему числу проведенных опытов при стремлении последних к бесконечности (статистическое определение вероятности);

– вероятность как число из интервала [0, 1], удовлетворяющее специальной системе аксиом (аксиоматический подход к вероятности – А.Н. Колмогоров);

– вероятность как степень субъективной уверенности в том, что данное событие или явление имело или может иметь место.

Последняя концепция – «субъективной» вероятности – возникла в XX в. в результате критического анализа основ теории вероятности и математической статистики, выполненного в трудах Б. де Финетти, Г. Джефриса, Д. Пойя и других авторов (см. напр. [6–11]). Именно субъективная вероятность проще всего находит себе место в литературе по моделированию неточных рассуждений (специалисты по соответствующим разделам логики и математики пользуются термином «правдоподобные рассуждения») и именно она наиболее активно проникает в судебное доказывание. Причина этому очевидна – далеко не всегда эксперт или другой специалист способен установить действительное значение вероятности. Порой его оценки носят интуитивный, субъективный характер. Сама природа уголовного преступления такова, что здесь не может быть статистики и трудно говорить об «исходах опыта» [12]. В результате вероятность зачастую приобретает смысл числового показателя уверенности эксперта в высказываемом им утверждении, степени его веры в него. Но подобные показатели могут работать и в других, порой более простых моделях рассуждений. Вероятностный подход сегодня уже не выглядит единственно возможным.

2. Вторая проблема связана с учетом поступающих свидетельств о совершённом преступлении (вещественные доказательства, показания свидетелей и потерпевших и т. д.). При вероятностном моделировании подобный учет обычно осуществляется на основе теоремы Байеса:

$$P(H \mid A) = P(H)\frac{P(A \mid H)}{P(A)},$$

где $P(H)$ и $P(H \mid A)$ – т. н. априорная и апостериорная вероятности реализации гипотезы *H*, $P(A)$ – вероятность появления свидетельства *A*, $P(A \mid H)$ – условная вероятность свидетельства *A* при условии реализации *H*. Значение $P(A)$ нередко задается выражением

$$P(A) = P(A \mid H)P(H) + P(A \mid \neg H)P(\neg H),$$

которое является одним из вариантов формулы полной вероятности. Здесь $\neg H$ – отрицание гипотезы *H*.

Применение теоремы Байеса при решении подобных задач хорошо тем, что значения $P(H)$, $P(A \mid H)$ и $P(A)$ можно установить заранее. Так, если *H* – гипотеза о том, что конкретный человек виновен в данном преступлении, величину $P(H)$ можно задавать из статистических соображений (например, $P(H)$ – доля лиц, совершающих указанный вид преступления в регионе) или исходя из принципа безразличия. В последнем случае вероятность задается как ½ (полная вероятность 1 делится на число возможных гипотез, которых здесь две: «виновен» и «невиновен»). Число $P(A \mid H)$ есть вероятность появления улики *A* при виновности, а $P(A \mid \neg H)$ – при невиновности человека. Они могут задаваться на основе статистики, однако необходимая статистика не всегда доступна и большое число вероятностей придется задавать директивно на основе личного мнения, т. е. опять же субъективно. Кроме того, учет группы свидетельств, при моделировании на основе теоремы Байеса, оказывается достаточно простым только при условии независимости свидетельств и их конъюнктивном влиянии (в противном случае придется задавать весьма неочевидные вероятности) [13].

3. В силу соотношения $P(H) + P(\neg H) = 1$ отсутствие доказательств в пользу той или иной гипотезы при вероятностном моделировании автоматически рассматривается как ее опровержение. Это заставляет при отсутствии информации пользоваться вышеупомянутым принципом безразличия, задавая вероятность гипотезы как 1/(число гипотез). Данный принцип есть своего рода плата за незнание. Но он приводит к своеобразным парадоксам. Например, в случае оценки виновности/невиновности это выглядит как 50%-я уверенность в том, что наугад взятый человек виновен в рассматриваемом преступлении, что нелепо.

4. Последняя из обсуждаемых здесь особенностей вероятностного моделирования заключается в том, что классический вероятностный подход не предлагает никаких средств учета силы и надежности информационных источников. Слабые (малоубедительные или поступившие из малодостоверных, неавторитетных источников) аргументы становятся в один ряд с сильными. Любому свидетельству «за» или «против» приходится верить на 100 %. Надежность, авторитетность источника здесь смоделировать невозможно.

Всё перечисленное делает актуальным рассмотрение иных моделей в доказывании по уголовным делам. Например, на основе интервальных вероятностей или теории свидетельств Г. Шефера [14]. Так, в [15] рассматривается модель логического вывода, в которой вероятность утверждения *A* является не числом, а интервалом (отрезком числовой оси) от наименьшего гарантированного значения $P_{\min}(A)$ до наибольшего возможного $P_{\max}(A)$. Минимальное значение вероятности определяется подтверждающими свидетельствами,

а максимальное – опровергающими. Чем сильнее подтверждающие свидетельства, тем больше $P_{\min}(A)$. Чем сильнее опровергающие, тем меньше $P_{\max}(A)$. Изначально интервал принимается равным $[0,1]$, как и полагается для вероятности. По мере поступления данных (свидетельств) он сужается. Если $P_{\max}(A)$ вдруг оказывается меньше, чем $P_{\min}(A)$, говорят о возникновении противоречия. Сила свидетельств определяет величину и темпы сужения интервала.

В теории Г. Шефера проблема учета силы свидетельств решается иначе. В ней рассматривается набор (множество) взаимоисключающих и взаимодополняющих гипотез Θ так, что какая-то одна из гипотез предполагается верной (например, набор версий того или иного преступления). С каждым подмножеством множества Θ (включая само Θ) связывается число из интервала $[0,1]$, называемое массой или «основным вероятностным числом» подмножества. Оно показывает степень уверенности субъекта в том, что истинная гипотеза находится в данном подмножестве. Вначале известно только, что гипотеза содержится в Θ. Соответственно, масса Θ равна 1, а массы остальных подмножеств нулевые. По мере поступления свидетельств массы соответствующих подмножеств растут и становятся отличными от 0, а масса множества Θ убывает. Коррекция масс выполняется по правилу Демпстера [14, 16], которое учитывает как взаимосогласованные, так и взаимоисключающие свидетельства.

С помощью масс в теории свидетельств вводится ряд функций, основными из которых являются функции доверия и правдоподобия. Первая задает нижнюю границу уверенности в том, что гипотеза принадлежит выбранному подмножеству, а вторая – верхнюю. Таким образом, здесь также возникает интервальная оценка степени уверенности.

Важной особенностью теории Шефера является то, что отсутствие уверенности в каком-либо подмножестве гипотез (иными словами, в истинности того, что какая-то из входящих в него гипотез верна) не означает автоматической уверенности в оставшихся гипотезах. Отсутствие доказательств «за» не является, автоматически, доказательством «против». Уверенность в той или иной гипотезе или подмножестве гипотез зависит только от конкретных доказательств (свидетельств) в ее пользу. Массы в данной теории определяются силой свидетельств и могут задаваться субъективно. Если же они задаются, например, на основе статистики, теория свидетельств дает результаты, аналогичные теории вероятности, которая, таким образом, служит ее частным случаем.

Недостатком данного подхода служит экспоненциальный рост объема вычислений с ростом числа рассматриваемых гипотез. Кроме того, этот подход может давать результаты, не отвечающие здравому смыслу [17].

Еще одним теоретическим аппаратом, подходящим для моделирования доказывания, служат нечеткие и многозначные логики. Использование нечетких логик в качестве основы для моделирования удобно тем, что с их помощью достаточно легко формализуются сложные высказывания, в том числе причинно-следственные, и выполняется учет их степеней уверенности (истинности) [18]. В частности, если $\| A \|$ и $\| B \|$ – значения истинности суждений A и B (истинность здесь – число из интервала $[0,1]$), истинность конъюнкции И (связка &), дизъюнкции ИЛИ (связка $\vee$) и отрицание НЕ (связка $\neg$) задаются простыми формулами:

$$\| A \& B \| = \min(\| A \|, \| B \|);$$
$$\| A \vee B \| = \max(\| A \|, \| B \|);$$
$$\| \neg A \| = 1 - \| A \|.$$

Или

$$\| A \& B \| = \| A \| \cdot \| B \|;$$
$$\| A \vee B \| = \| A \| + \| B \| - \| A \| \cdot \| B \|;$$
$$\| \neg A \| = 1 - \| A \|.$$

(Могут применяться и другие, но эти наиболее употребимы). Простота обработки степеней уверенности в нечетких логиках способствовала тому, что данные приемы вошли в некоторые вероятностные модели [19, 20], где, как уже говорилось, учет сложных посылок довольно затруднителен.

На языке нечетких логик достаточно просто учесть влияние истинности посылок на истинность заключения в ходе логического вывода. Например, истинность заключения, полученного по правилу modus ponens:

$$\begin{array}{l} A \to B \\ \underline{A} \\ B \end{array}$$

может вычисляться как

$$\| B \| = \min(\| A \|, \| A \to B \|)$$

или $\| B \| = \| A \| \cdot \| A \to B \|$,

где $A \to B$ означает, что из A следует B. Аналогичный расчет выполняется и для вывода «от противного» по правилу modus tollens:

$$\begin{array}{l} A \to B \\ \underline{\neg B} \\ \neg A \end{array}$$

Достоинством моделирования на основе нечетких логик является изначальное понимание того, что истинность может быть субъективной величиной. Это снимает многие обременения, существующие в вероятностном моделировании, где необходимо, например, обосновывать распределения вероятностей, значения условных вероятностей и т. п., без чего строгий механизм вероятностного моделирования становится эвристическим.

По сравнению с вероятностными моделями, модели на основе нечетких логик обладают алгоритмической простотой, не требуют знания трудноустановимых вещей, проще в понимании для людей, знакомых с основами логики. Однако некоторые из ранее перечисленных проблем сохраняются и в таких моделях. Так, в силу соотношения $\| \neg A \| + \| A \| = 1$ дефицит аргументов в пользу истинности суждения приходится считать аргументом в пользу его ложности. По этой же причине при отсутствии какой-либо информации приходится, как и для вероятностей, вводить принцип безразличия, априори объявляя истинность соответствующего суждения равной 1/(число гипотез) [17].

В нечетких логиках также сохраняется проблема учета силы высказываний. На скалярной шкале истинности влияния двух равносильных, но взаимоисключающих свидетельств не должно менять истинность суждения. В результате, независимо от степени их силы (надежности, убедительности), учет пары свидетельств силы 0,1 даст тот же эффект, что и учет двух свидетельств силы 0,9 (по шкале $[0,1]$). Но для суда же это совершенно несопоставимые вещи: несущественность аргументов в первом и их явная противоречивость во втором случае.

При нечетком выводе возникают вопросы и с учетом влияния поступающих свидетельств. Этот вклад учитывается при формировании истинности атомарных суждений и суждений о причинно-следственных связях, а также посредством правил объединения свидетельств. Последнее можно осуществлять, например, по схеме

$$\| A \| = \| A \|_1 + \| A \|_2 - \| A \|_1 \cdot \| A \|_2,$$

где $\| A \|$ – результирующая истинность, а $\| A \|_1$ и $\| A \|_2$ – значения истинности, полученные на основе двух отдельных источников: по двум ветвям вывода, или от двух групп свидетельств. Однако такое объединение приводит к монотонному нарастанию степени истинности заключения. Монотонным получается и весь вывод: любая поступающая информация оказывается только подтверждающей, механизмов опровержения здесь нет. В связи с этим при нечетком выводе нередко пользуются шкалами, включающими как положительные, так и отрицательные значения истинности, например $[-1,1]$, $[-100,100]$ и т. п. Так, в известной системе MYCIN [21, 22] с этой целью вводят два сорта коэффициентов: коэффициент доверия *КД* и коэффициент недоверия *КНД*. Оба принимают значение из отрезка $[0,1]$. Первый растет с поступлением подтверждающих, второй – опровергающих свидетельств. Результирующий коэффициент уверенности *КУ* определяется просто как их разность:

$$КУ = КД - КНД$$

и принимает значения от -1 до 1. В процессе рассуждений и приобретения новой информации суждение, уверенность в котором первоначально была близка к 1 (т. е. практически истинное), с получением опровергающих данных может стать неопределенным 0 или близким к -1 (практически ложное). В принципе, это позволяет сделать вывод немонотонным (нужно отметить, что при вероятностном выводе немонотонность обеспечивается непосредственно теоремой Байеса: вывод с ее помощью может приводить как к росту, так и к уменьшению результирующей вероятности).

Объединять влияния свидетельств также можно путем усреднения их вкладов в истинность (скажем, по правилу медианы, среднего арифметического и т. п.), но и здесь возникают свои проблемы.

Как и в случае с вероятностью, одним из путей решения перечисленных проблем мог бы служить переход от представления истинности в виде числа к интервальному представлению, однако соответствующие логики пока еще только развиваются (см. напр. [23]).

В [24] и ряде других работ (см. напр. [25, 26]) предлагается еще один подход к моделированию при неполном и противоречивом знании. Он основан на векторном представлении истинности, когда истинность суждения описывается вектором с компонентами $\langle A^+; A^- \rangle$, где A^+ – степень уверенности в том, что суждение истинно (аспект истинности Истина), A^- – что суждение ложно (аспект Ложь). Аспекты не зависят друг от друга, и каждый их них определяется своим собственным комплексом свидетельств. Значения аспектов (компонентов вектора), это числа из интервала $[0,1]$. Значение аспект Истина формируется подтверждающими, а аспекта Ложь – опровергающими свидетельствами. При поступлении одних только подтверждающих свидетельств вектор равен $\langle A^+; 0 \rangle$; одних только опровергающих –

$\langle 0; A^- \rangle$. В частности, вектор $\langle 1;0 \rangle$ отвечает бесспорному аргументу (аргументам) «за» (например, человек был застигнут на месте преступления), значение $\langle 0;1 \rangle$ – бесспорному аргументу (аргументам) «против» (скажем, бесспорному алиби). В случае выяснения степени вины в ходе судебного процесса позитивный компонент A^+ утверждения о виновности – формируется стороной обвинения, а негативный A^- – стороной защиты. При таком подходе достаточно просто можно формализовать случаи слабости или отсутствия доказательств – вектор близок или равен $\langle 0;0 \rangle$ и существенного противоречия в показаниях – вектор близок или равен $\langle 1;1 \rangle$, что не достигается ни при вероятностном, ни при нечетком моделировании. С его использованием не приходится вводить в модель никаких искусственных конструкций вроде принципа безразличия, он достаточно прост и прозрачен алгоритмически, а самое главное – более полно отражает предпосылки для принятия решения: признать виновным, оправдать, отклонить за недостаточностью улик или отправить на доследование (для снятия противоречий). В целом он представляет собой своеобразный синтез нечетких и паранепротиворечивых логик. Первые позволяют учесть нюансы в степени аргументированности суждений, вторые – корректно обрабатывают ситуацию неполного и противоречивого знания. Данный класс логик назван V^{TF}-логиками.

Возможность реализации немонотонного вывода в данных логиках обеспечивается независимым накоплением свидетельств в позитивном и негативном компонентах вектора истинности: с поступлением опровергающей информации строго истинное суждение с вектором $\langle 1;0 \rangle$ превращается в противоречивое с вектором истинности $\langle 1; A^- \rangle$ (вплоть до $\langle 1;1 \rangle$). При этом вывод в данных логиках организован так, что противоречие порождает только противоречие. Имеются и средства отделить противоречивые суждения от строго истинных или близких к таковым.

Для полноты картины упомянем еще ряд неклассических логик, которые могут найти применение в рассматриваемых областях. Это паранепротиворечивые и модальные логики.

Так, в паранепротиворечивых логиках помимо двух значений истинности «*Истина*» и «*Ложь*» рассматриваются еще два: «*Неопределенность*» и «*Противоречие*» [27, 28]. Это позволяет не только отделять истинные утверждения от ложных, но также выделять случаи отсутствия и противоречивости данных.

Среди модальных логик интерес представляет т. н. алетическая логика, позволяющая формализовать утверждения типа «*Необходимо ...*» (необходимо истинное суждение) и «*Возможно ...*» (возможно истинное суждение) [29]. Необходимо истинные суждения в данной логике есть аналоги истинных суждений в классическом смысле. Возможно истинные – это суждения, которые могут быть как истинны, так и ложны. В последнем случае говорят об истинности и ложности одного и того же суждения, но в различных мирах [27, 29]. С точки зрения рассматриваемых проблем возможный мир – это мир, в котором, например, эксперт получил недостающую (на момент подготовки заключения) информацию.

Семантика возможных миров используется и в теории паранепротиворечивых логик [28].

Алетическая логика может быть погружена в трехзначную логику с логическими значениями {*Необходимо* (=*Истина*), *Проблематично*, *Невозможно* (=*Ложь*)} [29]. Но для нее существует и более развитая – четырехзначная семантика {*Необходимо истинно*, *Возможно истинно*, *Возможно ложно*, *Необходимо ложно*}. Последняя отвечает ситуациям, когда суждение истинно во всех мирах (*Необходимо истинно*), истинно в рассматриваемом мире, но может быть ложно в других мирах (*Возможно истинно*), ложно в рассматриваемом, но может быть истинно в других мирах (*Возможно ложно*) и, наконец, ложно во всех мирах (*Необходимо ложно*) [29, 30].

Еще одним полезным классом модальных логик является деонтическая логика норм и предписаний. Она ориентирована на формализацию утверждений вроде «разрешено» и «обязательно», реализующих модальные языковые конструкции «разрешается», «надо, чтобы» и т. п. [29]. Ее ценность как основы для моделирования доказывания проблематична, однако она может быть положена в основу формализации тех или иных процессуальных вопросов.

Наконец, эпистемические логики исследуют модальности знания и веры. В них используется пара модальных операторов *L* и *M*, которые в логиках знания принимают, соответственно, значения «известно» и «противоположное неизвестно», а в логиках веры – «предполагается» и «противоположное не предполагается» [29]. В [31] с этой целью используются операторы *Kap* («*a* знает, что *p*») и *Bap* («*a* полагает/верит, что *p*»), где *a* – имя некоторого лица, личное местоимение или, возможно, конечное описание некоторого человека, *p* – независимое повествовательное предложение. Эпистемические логики оперируют понятиями «полагает», «убежден», «сомневается», «отвер-

гает», «знает», «доказуемо», «неразрешимо», «опровержимо» и т. д. Данный аппарат позволяет ставить и решать задачи выявления логических свойств операторов знания и убеждения, формулировать аксиомы, выражающие эти свойства, и устанавливать взаимосвязи между данными понятиями. Учитывая роль, которую играет внутренняя убежденность в судебном процессе, подготовке экспертных заключений, эпистемические логики представляют несомненный интерес для рассматриваемой проблемы.

При логико-математическом моделировании доказывания и последующей реализации этих моделей на компьютере принципиально необходимо иметь средства корректировки ранее полученных выводов в случае поступления информации, которая противоречит уже имеющейся (а значит и прежним выводам) – свойство немонотонности вывода. Соответствующие механизмы для вероятностных, нечетких и векторных моделей уже обсуждались. При моделировании на основе неклассических конечнозначных логик в связи с этим можно обратить внимание на класс т. н. немонотонных логик [32]. Так, например, немонотонные логики Мак-Дермотта и Дойла [33, 34] содержат правило *немонотонного вывода*: «если отрицание *A* не выводимо, то *A* возможно», которое позволяет заключить, что некоторое утверждение выполнимо с точки зрения логики. Оно позволяет принять как выполнимые всего лишь возможные утверждения и придает системе немонотонный характер.

К числу немонотонных относятся и т. н. автоэпистемические логики, интересные тем, что являются одновременно и эпистемическими, и немонотонными [32, 35, 36]. С их помощью формализуются «идеально разумные» и интроспективные суждения вроде «если я не предполагаю, что *A* подтверждается, то подтверждается *B*». Под идеально разумными понимаются рассуждения, в которых можно выводить только ожидаемые логические следствия и все эти следствия принимаются во внимание. Интроспективными являются рассуждения субъекта о самом себе, точнее – границах своих знаний и представлений о предметной области («если мне известно *A*, то я знаю, что *A* мне известно», «если я не знаю, что *A* подтверждается, то я знаю, что я не знаю, что *A* подтверждается» и т. п.). Немонотонность подобных рассуждений обусловлена тем, что множество предположений субъекта может со временем меняться, а это способно привести к пересмотру результатов выводов [32].

Все вышеперечисленные логики, логико-математические техники и модели предназначаются, фактически, для формализации дедуктивных рассуждений. Свойство индуктивности знания в них входит косвенно – через вероятности, массы, коэффициенты уверенности, значения истинности и т. п. (в зависимости от модели) фактов и причинно-следственных связей. В связи с этим полезно осветить техники, принципиально ориентированные на индуктивное знание. Среди них в первую очередь следует упомянуть т. н. ДСМ-метод порождения гипотез, предложенный В.К. Финном [37].

Основу метода составляет компьютерно-ориентированная формализация индуктивных рассуждений в духе Ф. Бэкона – Дж.С. Милля (название ДСМ-метода произошло от имени последнего). Метод предполагает наличие трех классов сущностей:

– набора объектов;

– набора устанавливаемых фактов, свойств или явлений, связанных с этими объектами (т. н. целевые признаки);

– набора установленных фактов, свойств или явлений, связанных с рассматриваемыми объектами (установленные признаки).

Согласно методу все множество объектов разделяется на три подмножества:

– объекты, у которых целевые признаки имеются;

– объекты, у которых целевые признаки отсутствуют;

– объекты, для которых наличие (либо отсутствие) целевых признаков неизвестно и его нужно установить.

Он позволяет решать два вида задач:

– формировать гипотезы о взаимосвязи целевых и установленных признаков объектов;

– формировать гипотезы о наличии либо отсутствии целевых признаков у объектов, для которых это изначально было неизвестно.

Оба класса задач встречаются, например, в криминологии (выявление факторов и обстоятельств, сопутствующих тем или иным преступлениям), криминалистике и судебной экспертизе (разработка версий, оценка вещественных доказательств, оценка связи следов преступления с обстоятельствами дела и т. д.), в доказываниях по уголовным делам (определение виновности/невиновности человека, выявление его роли в совершенном преступлении и т. п.). При этом соответствующим выводам должна предшествовать фаза «накопления опыта»: наполнения соответствующей компьютерной системы эмпирическим материалом, на котором впоследствии будут строиться обобщения.

К сожалению, ограничивающим обстоятельством для широкого распространения данного метода в рассматриваемой области является то, что он предназначен для работы с природными явлениями. Но, как известно, природа хоть и хитра, но не злонамеренна, чего не скажешь о преступниках. Результаты применения ДСМ-метода, как и любой научной индукции, будут убедительными только при проведении множества целенаправленных экспериментов по проверке причинно-следственных связей, что возможно при решении достаточно ограниченного круга задач (например, в судебно-экспертной деятельности, опирающейся, как правило, на результаты естественных наук и научные методики). Его «сквозное» использование на всех этапах раскрытия и расследования преступлений выглядит проблематичным.

Элементы индукции встречаются также в алгоритмах теории распознавания образов (кластеризация образов, обучение и самообучение распознающих систем) [38], при обучении (настройке) нейронных сетей [38, 39]. Здесь этапу получения результатов тоже предшествует фаза предварительного накопления фактов (т. н. обучающие выборки). В связи с очевидным сходством задач, решаемых теорией распознавания образов, с рядом задач судебной экспертизы (идентификация и классификация объектов), методы данной теории находят применение в рассматриваемой области, разрабатываются и соответствующие информационные системы.

Еще одним интересным подходом к формализации индуктивных рассуждений являются методы индуктивных рассуждений Д. Пойя [40].

Отталкиваясь от одной из классических схему индуктивного рассуждения [41]:

$A \to B$

<u>B</u>,

возможно A

Д. Пойя предложил целый ряд схем, включающих не только причинно-следственные связи, но и отношения логической эквивалентности суждений, их взаимного исключения, понятие аналогии и т. п. Его методы позволяют учитывать влияние новых фактов на степень уверенности в той или иной гипотезе, причем с учетом их характера (например, степень «неожиданности»: согласно Д. Пойя неожиданный факт, подтвердивший гипотезу, укрепляет веру в неё значительно сильнее, чем факты ожидаемые). К сожалению, подход Д. Пойя оперирует «логическими качествами» и степенями качеств: «правдоподобно», «более правдоподобно», «значительно более правдоподобно», «менее правдоподобно» и т. п. Какие-либо «прямые» его переводы на язык чисел (например, введение лингвистических переменных с их последующей оцифровкой, как это делается при моделировании рассуждений на основе нечетких множеств, или использование дополнительных к Истине и Лжи значений истинности, как в многозначных логиках) с целью последующей реализации на ЭВМ авторам не известны. Сам Д. Пойя проводил аналогию между своими методами и рассуждениями на основе вероятности [40].

Следуя Ч. Пирсу, наряду с индукцией и дедукцией следует рассматривать и такой вид умозаключения, как абдукцию, которую можно выразить формулой [42]:

D – множество фактов,

H – множество выдвинутых гипотез,

<u>H объясняет D</u>

гипотезы из H правдоподобны.

С точки зрения Ч. Пирса, познание представляет собой взаимодействие абдукции, индукции и дедукции, в котором абдукция отвечает за принятие объяснительных правдоподобных гипотез. В [43] со ссылкой на Ч. Пирса проводится сопоставление индукции, дедукции и абдукции: дедукция доказывает, что нечто должно быть, индукция показывает, что нечто действительно есть, а абдукция предполагает, что нечто может быть. Т. е. представление об абдукции как методе рассуждений появилось как попытка описать языком логики то, что обычно связывают с интуицией, «озарением». Но построение объясняющих гипотез (версий), интуитивный характер соответствующих умозаключений характерно и в обсуждаемой предметной области.

В заключение следует сказать, что проблема логико-математического моделирования доказывания по уголовным делам характеризуется не только слабой формализуемостью, но, что еще важнее, присутствием неточной и противоречивой информации. Более того, необходимостью принимать решение при возможном «информационном противодействии» следствию. Здесь вряд ли удастся обойтись какой-то одной моделью. Скорее следует ожидать использования комплекса моделей, охватывающих различные виды рассуждений: дедуктивных, индуктивных, традуктивных и абдуктивных. С различной степенью использования. На сегодня наиболее теоретически проработаны модели дедуктивных рассуждений. Однако классические модели, основанные на логике Аристотеля, могут применятся ограниченно, лишь при наличии бесспорных данных (притом при «бесспорности» их «бесспорности»). А это не всегда выполнимо. Не совсем адекватными выглядят и классические вероятностные модели рассуждений на основе теоремы Байеса. Представляется, что

наиболее подходящими здесь являются модели, построенные с помощью теории свидетельств Г. Шафера, интервальные модели и модели на базе V^{TF}-логик. Причем последние выгодно отличаются своей простотой и универсальностью. Индуктивные и традуктивные аспекты (личный опыт экспертов) в этих моделях косвенно учитываются значениями степеней уверенности, истинности или другими аналогичными показателями.

Результатом такого моделирования может стать, например, разработка автоматизированной системы оценки качества подготовки следственных материалов, направляемых в суд.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Искусственный интеллект: В 3 кн. Кн. 2: Модели и методы: справочник / под ред. Д.А.Поспелова – М.: Радио и связь, 1990. – 304 с.
2. Интеллектуальное управление динамическими системами / Васильев С.Н., Жерлов А.К., Федосов Е.А., Федунов Б.Е. – М.: Физико-математическая литература, 2000. – 352 с.
3. Владимиров В.Е. Учение об уголовных доказательствах. – Харьков, 1881 [http://yurpsy.fatal.ru/biblio/vladim/vladim.htm]
4. Овсянников И.В. Категория вероятности в судебной экспертизе и доказывании по уголовным делам: Дис. … д-ра юрид. наук: 12.00.09: Москва, 2001. – 511 с.
5. Криминалистика: Учеб. для вузов / И.Ф. Герасимов, Я.Л. Драпкин, Е.П. Ищенко и др.; Под ред. И.Ф. Герасимова, Л.Я. Драпкина – 2-е изд., перераб. и доп. – м.: высш. шк., 2000. – 672 с.
6. Finetti de B. La Prévision, ses lois logiques, ses sources subjectives // Annales de l'Institut Henri Poicaré. – 1937. – 7. – P. 1–68.
7. Jeffreys H. The theory of probability. – Oxford, 1939.
8. Polya G. Heuristic reasoning and the theory of probability // Amer. Math. Monthly. – 1941. – 48. – P. 450–465.
9. Крамер Г. Математические методы статистики. – М., 1948.
10. Reichenbach H. The theory of probability. – Los Angeles, 1949.
11. Carnap R. Logical Foundations of Probability. – Chicago, 1950.
12. Белкин Р.С., Винберг А.И., Дорохов В.Я. и др. Теория доказательств в советском уголовном процессе / Отв. редактор Н.В. Жогин. Изд 2-е испр. и дополненное. – М.: «Юрид. лит.», 1973. – 736 с.
13. Люгер Дж.Ф. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем, 4-е издание. : Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильяме», 2003. – 864 с.
14. Shafer G. A Mathematical Theory of Evidence. – Princeton and London: Princeton University Press, 1976. – 297 p.
15. Quinlan J.R. INFERNO: a causations approach to uncertain inference // The computer J. – 1983. – Vol. 26. – N 3. – P. 255–269.
16. Dempster A.P. Upper and lower probabilities induced by multivalued mapping // Annals of Mathematical Statistics. – 1967. – 38. – P. 325–339.
17. Аршинский Л.В. Парадоксы нечеткого оценивания // Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций (CASC'2007) / Труды VII международной конференции / Под ред. З.К. Авдеевой, С.В. Ковриги. – М.: ИПУ РАН, 2007. – С.20–23.
18. Gottwald S. Treatise on Many-Valued Logics. – Leipzig, 2000. – 604 p.
19. Duda R.O., Hart P.E., Nilsson N. Subjective Bayesian Methods for Rule-Based Inference Systems // Proceeding of the National Computer Conference, AIFIPS. – 1976. – 45. – P. 1075–1082.
20. Элти Дж., Кумбс М. Экспертные системы: концепции и примеры / пер. с англ. и предисл. Б.И. Шитикова. – М.: Финансы и статистика, 1987. – 191 с.
21. Shortliffe E.H., Buchanan B.G. A model of inexact reasoning in medicine // Mathematical Bioscience. – 1975. – 23. – P.351–379.
22. Shortliffe E.H. Computer-Based Medical Consultation: MYCIN. – N.Y.: American Elsevier, 1976.
23. Левин В.И. Интервальная логика и некоторые ее применения // [Электронный ресурс] (Режим доступа: http://iph.ras.ru/uplfile//logic/log11/Li_11_Levin.pdf.
24. Аршинский Л.В. Применение сверхнечетких логик в системах искусственного интеллекта для задач расследования преступлений // Информационная безопасность и компьютерные технологии в деятельности правоохранительных органов. Межвузовский сборник. – Саратов: СЮИ МВД России, 2004, Вып. 3. – С. 141–147
25. Аршинский Л.В. Многозначные логики с векторной семантикой // Электронный журнал «Logical Studies». – 2004. – № 12 (Режим доступа к журн.: http://www.logic.ru/LogStud/12).
26. Аршинский Л.В. Векторные логики: основания, концепции, модели. – Иркутск: Иркут. гос. ун-т, 2007. – 228 с.

27. Карпенко А.С. Многозначные логики. – М.: Наука, 1997. – 223с.
28. Смирнова Е.Д. Вопросы семантики паранепротиворечивых логик // Электронный журнал "Logical Studies". – 1999. – № 2 (Режим доступа к журн.: http://www.logic.ru/LogStud).
29. Тейз А., Грибомон П., Луи Ж. и др. Логический подход к искусственному интеллекту: от классической логики к логическому программированию / пер. с фр. – М.: Мир, 1990. – 432 с.
30. Rescher N. Many-valued Logic. – New York: McGraw-Hill. – 1969.
31. Hintikka J. Knowledge and Belief: an Introduction to the Logic of the Two Notions. – New York: Cornell University press, Ithaca. – 1962.
32. Вагин В.Н., Головина Е.Ю., Загорянская А.А., Фомина М.В. Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах / Под ред. В.Н. Вагина, Д.А. Поспелова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 704 с.
33. McDermott D., Doyle J. Non-monotonic logic I // Artificial Intelligence, 1980 . – V. 13. – N 1–2. – P. 41–72.
34. McDermott D. Non-monotonic logic II: non-monotonic modal theories // J. ACM, 1982 . – V. 29. – N 1. – P. 34–57.
35. Moore R. C. Possible-world semantics for autoepistemic logic // proc. AAAI-Workshop on Non-Monotonic Reasoning. October 1984. – New York. – P. 344–354.
36. Moore R.C. Autoepistemic logic // Non-Standard Logics for Automated Reasoning (P. Smets et al., eds.). – London: Academic Press, 1988. – p. 105–136.
37. Финн В.К. О машинно-ориентированной формализации правдоподобных рассуждений в стиле Ф. Бэкона – Д. С. Милля // Семиотика и информатика. – 1983. – Вып. 20. – С. 35–101.
38. Дж. Ту, Р. Гонсалес. Принципы распознавания образов / Пер с англ. И.Б. Гуревича под ред. Ю.И. Журавлева. – М.: Мир, 1978. – 411 с.
39. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. – М.: Горячая линия-Телеком, 2001. — 382 с.
40. Пойа Д. Математика и правдоподобные рассуждения / пер. с англ.; под ред. С.А. Яновской – М.: Наука, 1975. – 464 с.
41. Минто В. Дедуктивная и индуктивная логика.– Минск: Харвест, 2002. – 352 с.
42. Боброва А.С. Теория рассуждений Ч. Пирса (Проблема абдукции): Дис. ... канд. филос. наук: 09.00.07 Москва, 2005. – 154 с.
43. Рузавин Г. И. Методология научного познания. – М.: Юнити, 2005. – 287 с.

УДК 618.501

Носков Сергей Иванович,
д. т. н., профессор, директор Института информационных технологий и моделирования ИрГУПС,
Протопопов Валерий Александрович
заместитель начальника Восточно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО «РЖД»

ОЦЕНКА УРОВНЯ УЯЗВИМОСТИ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ: ФОРМАЛИЗОВАННЫЙ ПОДХОД

S.I. Noskov, V.A. Protopopov

ASSESSMENT OF THE LEVEL OF VULNERABILITY OF THE OBJECTS OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE: A FORMALIZED APPROACH

Аннотация. *В статье рассматривается формализованный способ оценки уязвимости объектов транспортной инфраструктуры. Он предполагает построение агрегированного критерия уровня уязвимости в виде линейной свертки локальных критериев с применением методов теории принятия решений. При этом задача определения коэффициентов свертки сводится к поиску решения или квазирешения задачи линейного программирования. Предложен алгоритм оценки уровня компетентности привлекаемых экспертов.*

Ключевые слова: *транспортная безопасность, уязвимость, линейное программирование, квазирешение, теория принятия решений, экспертная информация.*

Abstract. *The article considers a formalized way of assessing the vulnerability of transport infrastructure. It involves the construction of aggregated*

criterion of the level of vulnerability in the form of a linear convolution of local criteria with the use of methods of the theory of decision-making. The problem of determining the coefficients of the convolution is reduced to finding a solution or quasidecision of linear programming problems. An algorithm for evaluation of the level of competence of experts'.

Keywords: *transport security, vulnerability, linear programming, quasidecision, theory of decision-making, expert information.*

В последние годы в России резко снизилась безопасность на всех видах транспорта – железнодорожном, воздушном, автомобильном, речном, морском. Причин этого уже начинающего вызывать самое серьезное беспокойство в обществе явления много. И в этой работе мы не ставим своей целью провести тщательный всесторонний анализ этих причин. Отметим только, что основные из них связаны (и на это прямо указывают руководители отрасли) с физическим и моральным износом всех практически элементов транспортной системы страны. Именно вследствие этого происходят участившиеся из года в год крушения, аварии, сходы пассажирских и грузовых поездов, другие техногенные катаклизмы, вызывающие причинение вреда жизни и здоровью граждан, окружающей среде, крупному материальному ущербу.

Перечисленные обстоятельства диктуют настоятельнейшую необходимость создания фундаментальной научной методологии оценки уровня безопасности объектов транспортной инфраструктуры (ОТИ), отсутствующей в настоящее время. Представляется, что основой такой методологии могут и должны стать современные методы математического моделирования. Они являются признанным инструментом научного анализа сложных, с множеством внутренних и внешних взаимосвязей объектов различной природы, поскольку позволяют на модельном уровне формализовывать закономерности, присущие этим объектам, посредством разработки их качественных абстрактных образов. Это открывает широкие возможности в повышении эффективности вырабатываемых управляющих воздействий, поскольку при этом экспериментирование может проводиться не с «живой» системой, а с её математической моделью.

Этапом, предваряющим собственно настроение математической модели любого объекта, является выбор показателей (факторов, переменных), определяющих его функционирование.

К сожалению, к настоящему времени как в научных, так и в нормативных изданиях, не описан (не определен, не задан, не формализован) какой-либо один показатель (фактор), в полной мере отражающий уровень (степень, меру) уязвимости ОТИ. Вместе с тем известны частные характеристики ОТИ, «отвечающие» за те или иные локальные стороны в оценке такой уязвимости. Так, по отношению к железнодорожным мостам ими могут быть, в частности, следующие:

1. Наличие охраны.
2. Количество постов.
3. Количество охранников.
4. Стоимость охранных услуг.
5. Стоимость моста.
6. Технические характеристики моста (длина, количество путей и т. д.).
7. Пассажиропоток и грузопоток (с учетом номенклатуры грузов).
8. Характеристика технических средств физической защиты (ТСФЗ) (количество и стоимость средств, показатели их работоспособности, стоимость текущего обслуживания, расстояние до пунктов выведения сигналов, время на восстановление работоспособности в случае повреждения).

В рамках теории принятия решений разработан целый спектр методов, позволяющих объединять частные характеристики (критерии) объектов различной природы в некие ненаблюдаемые в реальности агрегаты (свертки), что позволяет оценивать обобщенные свойства объектов (в нашем случае уязвимость ОТИ) (см., например, [1–4]).

Будем основывать дальнейшее изложение в основном на работах [3, 4], в которых представлена методика объединения локальных критериев в обобщенные агрегаты с использованием аппарата линейного программирования.

Итак, пусть в распоряжении исследования есть численная информация о **g** критериях уязвимости **r** объектов транспортной инфраструктуры, т. е. матрица

$$X = \left\| x_{ij} \right\|, i = \overline{1, r},\ j = \overline{1, g}\ .$$

Пусть к оценке уязвимости каждого ОТИ привлечены **p** экспертов. На основе использования их сравнительных высказываний и матрицы X необходимо построить линейную свертку частных критериев (агрегированный критерий) вида:

$$R = \sum_{j=1}^{g} \alpha_j x_j\ , \qquad (1)$$

где j – номер частного критерия.

Далее организуется процедура независимого опроса экспертов относительно сравнительной уязвимости пар ОТИ. При этом каждый эксперт производит свою оценку только по отношению к парам, уязвимость ОТИ в которых он может с уверенностью сравнить.

Каждый *i*-й эксперт строит индексное множество

$$M^i = \{(a_1^i, b_1^i), (a_2^i, b_2^i), ..., (a_{l_i}^i, b_{l_i}^i)\}$$

пар объектов, в которых первый объект более (не менее) уязвим, чем второй, и множество

$$N^i = \{(c_1^i, d_1^i), (c_2^i, d_2^i), ..., (c_{s_i}^i, d_{s_i}^i)\},$$

пар объектов, уязвимость которых, по мнению эксперта, «примерно» одинакова, $i = \overline{1, p}$.

Здесь l_i и s_i – размерность множеств M^i и N^i соответственно. При этом не исключаются ситуации, когда какое-то из множеств N^i или M^i оказывается пустым, поскольку эксперт может затрудниться в указании требуемых пар.

В случае непротиворечивости экспертных высказываний должны быть совместны системы линейных равенств и неравенств

$$R(c_j^i) = R(d_j^i),\ i = \overline{1, p},\ j = \overline{1, l_i} \qquad (2)$$

$$R(a_j^i) \geq R(b_j^i),\ i = \overline{1, p},\ j = \overline{1, s_i}, \qquad (3)$$

где через $R(k)$ обозначена уязвимость *k*-го объекта, $k = \overline{1, r}$.

Сделаем одну необходимую оговорку. А именно, чем больше значение $R(k)$, тем выше уязвимость *k*-го объекта. Значит, для достижения однородности обобщенного и частных критериев необходимо полагать, что каждый фактор x_j позитивно влияет на уязвимость, то есть усиливает (увеличивает) ее. А в приведенном выше перечне частных характеристик уязвимости ОТИ есть такие (например, количество охранников), которых уязвимость снижают. Такие характеристики x_i необходимо преобразовывать, например, посредством использования переменных $1/x_i$. Поэтому в (1) естественен переход от переменных x_i к переменным $\tilde{x}_i$, задаваемым по правилу:

$$\tilde{x}_i = \begin{cases} x_i, \text{ если } i\text{-й фактор увеличивает} \\ \qquad \text{уязвимость объекта,} \\ 1/x_i, \text{ в противном случае.} \end{cases} \qquad (4)$$

Таким образом, свертка (1) заменится на

$$\tilde{R} = \sum_{j=1}^{g} \tilde{\alpha}_j \tilde{x}_j, \qquad (5)$$

где в соответствии с (4) $\alpha_j > 0$, $j = \overline{1, g}$. Для агрегированного показателя уязвимости $\tilde{R}$ очевидным образом остаются справедливыми системы равенств (2) и неравенств (3).

Введем в рассмотрение переменные y_{ej}^{1i} и y_{ej}^{2i} следующим образом:

$$y_{ej}^{1i} = x_{a_e^i j} - x_{b_e^i j},\ (a_e^i, b_e^i) \in M^i,\ i = \overline{1, p},\ j = \overline{1, g}$$

$$y_{ej}^{2i} = x_{c_e^i j} - x_{d_e^i j},\ (c_e^i, d_e^i) \in N^i,\ i = \overline{1, p},\ j = \overline{1, g}.$$

Тогда равенства (2) и неравенства (3) примут соответственно вид:

$$\sum_{j=1}^{g} \tilde{\alpha}_j y_{ej}^{1i} \geq 0,\ e = \overline{1, l_i},\ i = \overline{1, p} \qquad (6)$$

$$\sum_{j=1}^{g} \tilde{\alpha}_j y_{ej}^{2i} = 0,\ e = \overline{1, l_i},\ i = \overline{1, p} \qquad (7)$$

В соответствии с приемом, принятом в теории принятия решений, потребуем, чтобы так называемая разрешающая способность системы неравенств (6) была как можно выше. Формально это требование представимо в форме:

$$\sum_{i=1}^{p} \beta_i \sum_{e=1}^{l_i} \sum_{j=1}^{g} \tilde{\alpha}_j y_{ej}^{1i} \to \max \qquad (8)$$

Здесь β_i – уровень компетентности *i*-го эксперта, при этом $\beta_i > 0$, $i = \overline{1, p}$, $\sum_{i=1}^{p} \beta_i = 1$.

При отсутствии информации об оценках уровня компетентности экспертов будем полагать $\beta_i = 1$ для всех $i = \overline{1, p}$

Учтем еще несколько важных соображений. Для обеспечения возможности сравнения степени уязвимости разных по характеру и масштабу ОТИ агрегированному показателю уязвимости $\tilde{R}$ необходимо придать относительный характер. Это можно делать, например, следующим образом.

Рассчитаем максимальные значения преобразованных значений частных критериев уязвимости:

$$\tilde{x}_j^+ = \max_{j=\overline{1, g}} \tilde{x}_j.$$

Потребуем, чтобы уязвимость некоего объекта с максимальными значениями ее частных характеристик составляла бы 100 %:

$$\sum_{j=1}^{p} \tilde{\alpha}_j x_j^+ = 100. \qquad (9)$$

Требование строгой положительности параметров $\tilde{\alpha}_j$, а так же то обстоятельство, что каждый частный показатель уязвимости обязательно должен обладать какой-то по крайне мере минимальной значимостью, можно формализовать следующим образом:

$$\tilde{\alpha}_j \tilde{x}_j^+ \geq \gamma_j, \quad j = \overline{1,g} \qquad (10)$$

В качестве заданных заранее положительных чисел γ_j можно использовать, например, такие:

$$\gamma_j = \frac{10}{g},$$

поскольку, если принять равными вклады каждой частной характеристики уязвимости в их агрегат, значения таких вкладов будут равны величине $\frac{100\%}{g}$.

Таким образом, задача построения агрегированного критерия уязвимости ОТИ $\tilde{R}$ сводится к задаче линейного программирования (ЛП) с ограничениями (6), (7), (9), (10) и целевой функцией (8).

В том случае, если изначально уровень компетентности экспертов неизвестен ($\beta_i = \frac{1}{p}$ для всех i), то после решения указанной задачи ЛП этот уровень можно вычислить, рассчитав среднюю разрешающую способность высказываний каждого эксперта:

$$\beta_i = \sum_{e=1}^{l_i} \sum_{j=1}^{g} \tilde{\alpha}_j y_{ej}^{1i} \Bigg/ \sum_{h=1}^{p} \sum_{e=1}^{l_h} \sum_{j=1}^{g} \tilde{\alpha}_j y_{ej}^{1h}, \qquad (11)$$

то есть чем выше суммарная разрешающая способность ограничений (6), тем выше уровень компетентности соответствующего эксперта.

Разумеется, такой способ оценивания уровня компетентности экспертов является в определенной мере относительно условным, поскольку жестко привязан к виду функции, задающей свертку критериев. Если, в частности, вместо линейной функции (1) использовать более гибкую, например, полином, результаты могут оказаться иными.

Предположим теперь, что задача ЛП (6), (7), (9), (10), (8) несовместна, то есть экспертные высказывания взаимно противоречивы. В этом случае в соответствии с теорией решения некорректных задач А.Н. Тихонова нужно искать квазирешение указанной задачи, использовав при этом прием, описанный в [4].

Введем в рассмотрения новые неотрицательные переменные u_e^i , v_e^i , t_e^i и преобразуем ограничения (6) и (7) к виду:

$$\sum_{j=1}^{g} \tilde{\alpha}_j y_{ej}^{1i} + t_e^i \geq 0, e = \overline{1,l_i}, i = \overline{1,p}, \qquad (12)$$

$$\sum_{j=1}^{g} \tilde{\alpha}_j y_{ej}^{2i} + u_e^i - v_e^i = 0, e = \overline{1,l_i}, i = \overline{1,p}. \qquad (13)$$

Введенные переменные представляют собой искажения, внесенные в ограничения (6) и (7), гарантирующие их совместность. Эти искажения необходимо минимизировать, заменив функционал (8) на:

$$\sum_{i=1}^{p} \sum_{e=1}^{l_i} (t_e^i + u_e^i + v_e^i) \to \min \qquad (14)$$

Сформированная таким образом задача ЛП (12), (13), (9), (10), (14) также будет позволять рассчитывать коэффициенты линейной свертки (5).

Далее, при оценивании уровня компетентности каждого эксперта в этом случае следует исходить из соображения – чем меньше суммарное искажение ограничений, следующих из его экспертных высказываний, тем этот уровень выше, то есть

$$\beta_i = \sum_{e=1}^{l_i} (t_e^i + u_e^i + v_e^i) \Bigg/ \sum_{i=1}^{p} \sum_{e=1}^{l_i} (t_e^i + u_e^i + v_e^i).$$

Для оценки уровня компетентности экспертов, высказывания которых непротиворечивы, следует воспользоваться описанным выше приемом.

В следующей своей публикации авторы намерены описать практическое использование предложенной в работе методики для оценки уязвимости конкретных ОТИ.

БИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Носков С.И., Удилов В.П. Управление системой обеспечения пожарной безопасности на региональном уровне. – Иркутск: ВСИ МВД России, 2003. – 151 с.
2. Носков С.И., Подушко В.Г., Удилов В.П. Газификация сельской местности: целевое программирование пожарной безопасности. – Иркутск: ИрГТУ, 2001. – 150 с.
3. Носков С.И., Удилов В.П., Бутырин О.В. Критериальная оценка обстановки с пожарами АТЕ Сибири и Дальнего Востока // Проблемы деятельности правоохранительных органов и противопожарных служб: Материалы II Межвузовской научно-практической конференции. – Иркутск: ИВШ МВД России, 1996. – С. 109–111.
4. Носков С.И. Технология моделирования объектов с нестабильным функционированием и неопределенностью в данных. – Иркутск: Облинформпечать, 1996. – 320 с.

НОВЫЕ МОНОГРАФИИ

В издательстве LAP LAMBERT Academic Publishing (Германия) изданы две монографии сотрудников ИрГУПСа:

1. **Крюков А.В., Закарюкин В.П., Соколов В.Ю.** Моделирование систем электроснабжения с токопроводами: монография – LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG. – Dudweiler Landstraße 99. 66123 Saarbrücken. Germany. – 2011. – 90 с.

2. **Крюков А.В., Закарюкин В.П., Абрамов Н.А.** Управление системами тягового электроснабжения. Ситуационный подход: монография. – LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG. – Dudweiler Landstraße 99. 66123 Saarbrücken. Germany. – 2011. – 128 с.

СПИСОК СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В 2011 ГОДУ

№ 1 (29)

Раздел I. Современные технологии. Механика и машиностроение

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Евсевлеева Л.Г. О вероятности связности случайного графа

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

Раздел II. 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

Базилевский М.П., Носков С.И. Алгоритм построения линейно–мультипликативной регрессии

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Соколов В.Ю. Моделирование жестких симметричных токопроводов

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

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

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

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

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

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

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

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

№ 2 (30)

Раздел I. Современные технологии. Механика и машиностроение

Елисеев С.В., Хоменко А.П. Транспортные подвески. Математические модели. Выбор систем координат

Чекаев А.Н., Свитачев А.И., Орловский С.Н. Моделирование и совершенствование динамических характеристик силовых передач машинных агрегатов

Петкович Д., Димитровски Д. Одноамплитудные негармонические колебания не-Штурма второго порядка

Мартьянов В.И., Скуматов М.Л. Адаптация логико-эвристических методов для некоторых задач филогенетического анализа

Лукьянов А.В., Лебедева Н.Ю. Повышение точности анализа вибрации по спектру

Агафонов С.В., Данеев А.В., Русанов В.А., Шарпинский Д.Ю. Построение оптимальной технологии процесса получения азотированного слоя в электростатическом поле

Ворожун И.А., Заворотный А.В., Шилович А.В. Определение динамических сил в креплении труб к платформе при соударении вагонов

Дмитриев А.А. Применение георадарной технологии при решении археологических задач

Милованова Е.А., Тупицын А.А., Милованов А.А. Кинематический анализ торцевой зубчатой передачи с внутренним зацеплением для оценки перспективы её применения в конструкции тягового привода локомотива

Чернин Р.И. Распрессовка соединений с гарантированным натягом и контроль напрессовок колец буксовых подшипников колёсных пар вагонов

Елшин В.В., Жильцов Ю.В. Моделирование процесса индукционного нагрева с использованием программного комплекса ANSYS

Елисеев С.В., Ермошенко Ю.В., Трофимов А.Н. К вопросу о построении математических моделей виброзащитных систем с динамическими гасителями нетрадиционного типа

Тырсин А.Н., Соколов Л.А. Идентификация стационарных колебаний на основе линейных дискретных моделей в условиях аддитивного шума

Гудвилл М.Н., Богидаев С.А. Испытание нового реагентного режима при флотации золото-баритовой руды

Ереско С.П., Шатохин С.С. Адаптивные гидростатические опоры с независимыми оппозит-

ными плавающими регуляторами расхода рабочей жидкости

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

Сочнев А.Н. Определение количества технологического оборудования на основе моделирования производства сетями Петри

Черепанов А.П., Колмаков В.П. Алгоритмы прогнозирования ресурса технических устройств

Кулаков А.Ю., Асламов А.А., Кулакова И.М., Аршинский М.И., Асламова В.С. Автоматизация расчета и проектирования деталей прямоточного циклона

Воронов А.Ю., Герасимов В.А. Система автоматического регулирования тока сжатой электрической дуги в канале плазматрона

Ешенко А.А. Возможности оценок динамических свойств регенеративной печи при синтезе управляющих устройств систем в форме пространства состояний

Вдовин К.Н., Кольга М.А. Элементы математической модели намораживания меди на стальной сердечник

Перелыгин В.Н., Лукьянов А.В., Перелыгина А.Ю. Исследование зависимости распределения температуры оборудования от параметров работы электровозов при их движении

Михайлова М.Р., Олинович Н.А. Методы унификации аналитических процессов оценки уровня безопасности движения

Лившиц А.В., Машович А.Я., Филиппенко Н.Г. Аспекты электротермической обработки материалов электромагнитным полем высокой частоты

Краковский Ю.М., Михайлова Е.А. Многофакторное прогнозирование выбросов загрязняющих веществ на примере Забайкальского края

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

Куценко С.М., Муратов В.И., Климов Н.Н. Моделирование схемы замещения фарфорового изолятора, содержащего локальные неоднородности

Котельников С.С., Иванкова Л.Н., Иванков А.Н. Методика выбора оптимального соотношения штата работников ПТО и емкости путевого развития технических станций

Семенов Р.М., Ключевский А.В., Черных Е.Н. Количественная оценка динамических параметров землетрясений для построения геомеханической модели Северомуйского тоннеля

Володарский В.А. Математические модели оптимизации предупредительных замен и ремонтов технических устройств

Дубицкий М.А. Обеспечение безопасности электроэнергетических систем при аварийном отключении крупных электрических станций

Путято А.В., Якубович О.И. Моделирование напряженно-деформированного состояния крышки люка полувагона при воздействии ударных нагрузок

Руш Е.А., Королева Г.П. Оценка атмосферных потоков поступления ртути на основе геохимических исследований снегового покрова (южное Прибайкалье)

Винокуров Д.И., Гозбенко В.Е., Якимова Г.А., Корчевин Н.А. Трибохимические реакции в зоне трения колесо–рельс при использовании нетрадиционных смазочных композиций

Филиппенко Н.Г., Лившиц А.В., Машович А.Я. Автоматизация процесса высокочастотного нагрева материалов на промышленной установке УЗП 2500 адаптивным методом. Использование автоматизированной установки в лабораторных целях

Свитачев А.И., Ивженко О.А., Свитачев П.А. Системный анализ временных рядов основных производственно-экономических показателей работы железных дорог

Олинович Н.А. Совершенствование методики определения уровня безопасности движения, как главного показателя качества транспортного обслуживания

Пультяков А.В., Трофимов Ю.А. Анализ влияния неравномерной намагниченности рельсов на устойчивость работы АЛСН

Сольская И.Ю., Грошева Н.Б. Подход к управлению инновационными проектами на основе инструментов партисипативного управления

Тонких А.С., Ионов А.В., Тонких С.А. Математический аппарат оценки результативности экономических систем

Перепелица К.А., Богидаев С.А. Эффективные технологии разделения алюмосиликатов и кварца на примере технического топаза

Грошева Н.Б., Чанчиков А.С. Современные подходы и тенденции определения приоритетов социально-экономического развития регионов: смена парадигмы развития

Владимирова О.Н., Дягель О.Ю. Формирование механизма управления инновационной восприимчивостью региона: теоретико-методологические аспекты

№ 3 (31)

Раздел I. Современные технологии. Механика и машиностроение

Хоменко А.П., Елисеев С.В., Ермошенко Ю.В. О соотношении параметров при переходе в механических колебательных системах от соединений «звезда» к соединениям «треугольник»

Сидоров Д.Н., Сидоров Н.А., Леонтьев Р.Ю. Асимптотические приближения решений нелинейных краевых задач с векторным параметром в окрестности точки бифуркации

Андросов С.П., Браилов И.Г. Аналитическое описание режущих кромок червячной модульной фрезы с закругленной вершиной зубьев

Ешенко А.А. Структурные модели движения и давления газов и воздуха в рабочем пространстве стекловаренной печи

Иртегов В.Д., Титоренко Т.Н. О дополнительных возможностях метода Рауса–Ляпунова

Цвик Л.Б., Зеньков Е.В., Пыхалов А.А. Влияние геометрических параметров плоскоцилиндрических образцов с концентраторами напряжений на вид их напряженно-деформированного состояния

Шигаров А.О., Фёдоров Р.К. Алгоритм обнаружения пустого места на странице документа

Курносов Н.Е., Лебединский К.В. Компьютерное моделирование кавитационного процесса в закрученных потоках жидкости

Ереско Т.Т., Тубольцев А.А., Ереско С.П., Ереско В.С. Совершенствование конструкций гидропневмоударных агрегатов на основе имитационного моделирования

Вансович К.А., Аистов И.П. Критерий оценки скорости роста усталостных трещин в условиях двухосного нагружения

Буйносов А.П., Пышный И.М., Тихонов В.А. Определение натяга бандажа на ободе колесного центра локомотива

Артюнин А.И. Общий метод расчета автобалансировочных устройств роторов машин с большим числом степеней свободы

Московских А.О., Савченко А.А., Абросимова Ю.О. Электродинамические связи в механических колебательных системах

Шиляев А.И. Определение рациональных условий вытягивания первичных нитей при производстве волокна из базальтового сырья дуплекс-способом

Рожкова Е.А., Ильиных В.А. Изготовление образцов и разработка экспериментального стенда для испытания РК-3 профильного соединения на прочность

Тюпин В.Н. Влияние взрыва на напряженное состояние горного массива и обделки при сооружении железнодорожных тоннелей

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

Краковский Ю.М., Михайлова Е.А. Программное обеспечение многофакторного прогнозирования промышленных загрязняющих выбросов

Лемперт А.А., Плетнева А.Э., Фу Фыок Гуй, Казаков А.Л., Баглаев С.И. Моделирование и прогнозирование расхода топлива для специального подвижного состава на ВСЖД

Скачков И.В., Бальчугов А.В. Моделирование процесса десорбции на насадке

Корсуков А.С. Инструментальные средства полунатурного моделирования распределенных вычислительных систем

Наумов И.С. Постановка задачи оптимизации параметров системы обеспечения ресурсами при ликвидации чрезвычайных ситуаций на промышленных объектах

Мухопад А.Ю., Мухопад Ю.Ф. Динамический контроль автоматов управления технологическими процессами

Ревенский А.А., Гозбенко В.Е. Моделирование торцевой зубчатой передачи

Володарский В.А. Принципы оптимизации предупредительных замен и ремонтов в условиях неопределенности

Исаев А.И., Сафарбаков А.М., Богданович Д.В., Майрович Ю.И. Импульсная камера сгорания газотурбинного двигателя

Васильев А.В., Бальчугов А.В. Разработка новой регулярной насадки с эффектом эжектирования для тепло- и массообменных процессов

Молчанова Е.И., Федоров В.В., Щербаков И.В. Методический подход к созданию гибридных экспертных систем как WEB-приложений

Яковлев Д.А., Осипова В.Э., Дурнов В.Г. Применение системы нечеткого управления энергообеспечением предприятия

Иванов М.С. Компьютерное моделирование влияния сферической аберрации III порядка на построение германиевой линзой инфракрасного излучения

Тюпин В.Н., Святецкий В.С. Повышение выхода заданного гранулометрического состава урановой руды при ведении взрывных работ в слоевых заходках

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

Сидоров О.А., Аркашев А.Е., Ларькин И.В. Моделирование взаимодействия авторегулируемого токоприемника с контактной подвеской

Раевский Н.В., Яковлев Д.А., Дурнов В.Г. Выбор оптимальной методики прогнозирования временных рядов электропотребления

Грошева Н.Б., Чанчиков А.С. Дисконтирование социально-экономического результата инновационных проектов на основе ССД

Батукова Л.Р. Проблема запуска процесса инновационной модернизации в трудах российских ученых

Владимирова О.Н., Дягель О.Ю., Крылова М.В. Качество образования как фактор развития человеческого капитала в контексте формирования инновационной восприимчивости региона

Ситников Д.Н., Ульянов Б.А., Семенов И.А., Фереферов М.Ю., Романовский А.А. Моделирование массообмена в дисперсной фазе при экстракции метанола водой из смеси его с гексаном

Лоскутова Е.В. Задача формализации и моделирования учебного процесса

Доронин С.В., Донцова Т.В. Статистические модели микропрофиля дорог технологического транспорта

Обуздина М.В. Термодинамические закономерности сорбционных процессов извлечения нефтепродуктов из промышленных сточных вод

Темникова Е.А., Асламова В.С. Автоматизированная система мониторинга учебного процесса

Пудалов А.Д. Унифицированная измерительная схема приборов аналитического контроля

Кедрин В.С. Алгоритм оценки оптимальной размерности обучающего множества в нейросетевых моделях прогнозирования

Массель Л.В., Такайшвили Л.Н., Чинь Куанг Чунг Имитационное моделирование в исследованиях развития угольной промышленности России

Матафонов А.А., Бычинский В.А., Руш Е.А. Получение наплавочных электродов для восстановления узлов и деталей железнодорожного транспорта на основе минерального сырья Восточной Сибири

Железнов Д.В., Светлакова Е.Н. Статистическое исследование задержек поездов при пропуске через ремонтируемый перегон

Ованесян С.С., Черхарова Н.И. Управление затратами и выпуском продукции для достижения требуемого уровня мотивации, зависимого от налоговой политики

Комлева Е.В. Геологические, экологические и политические аспекты хранения и захоронения ядерных материалов

№ 4 (32)

Раздел I. Современные технологии. Механика и машиностроение

Елисеев С.В., Хоменко А.П. Непланарность в структурных аналогах механических систем с межкоординатными связями

Пимштейн П.Г., Еловенко Д.А., Татаринов А.Д. Исследование под давлением оболочки со встроенными в стенку нагревательными элементами и слоем теплоизоляционного материала

Каргапольцев С.К., Большаков Р.С. Динамика машин. Математическое обеспечение вычислительного моделирования

Груздева Т.В., Климентова К.Б. Метод отсечений для неравенств клик в задаче размещения с предпочтениями клиентов

Лапшин В.Л., Глухов А.В. Исследование остаточных деформаций при ударном взаимодействии упруго-вязко-пластичной механореологической модели

Зеньков Е.В., Цвик Л.Б., Кулешов А.В. Моделирование мягкого вида напряженного состояния конструктивных узлов на цилиндрических лабораторных образцах с концентраторами напряжений

Филиппенко Н.Г., Каргапольцев С.К., Лившиц А.В. Повышение эффективности высокочастотной обработки полимерных материалов

Погодин В.К., Вайнберг С.М. Конструкционная прочность бугельных соединений

Долотов А.М., Белоголов Ю.И. Напряженно-деформированное состояние тонкостенного клапанного седла пониженной жесткости

Чайкин С.В., Банщиков А.В. Условия гироскопической стабилизации одного класса равновесий симметричного гиростата на круговой орбите

Ахмадеева А.А., Гозбенко В.Е. Определение главных координат вагона с двухступенчатым рессорным подвешиванием

Холодов П.Н. Многокритериальный выбор оптимального решения при проектировании железных дорог

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

Коновалов Ю.В. Моделирование электромеханических процессов в синхронном двигателе

Мухопад А.Ю., Мухопад Ю.Ф. Конструктивные методы синтеза автоматов управления на больших интегральных схемах

Деканова Н.П., Хан В.В. Подходы теории нечетких множеств в задачах диагностики тепловых сетей и объектов теплопотребления

Огородников Ю.И. Расчёт допусков на реализацию программного управления в стационарных непрерывных системах

Матафонов А.А. Опытно–сравнительные испытания сварочных электродов

Куцый Н.Н., Осипова Е.А. Анализаторы чувствительности каскадной системы с двумя интегральными широтно-импульсными регуляторами стабилизации толщины изоляции кабеля

Тюпин В.Н., Горковенко Н.А., Алексеев О.Н. Технология очистной выемки маломощных урановых рудных тел с применением узкозахватной погрузочно-доставочной техники

Туйгунова А.Г. О необходимости мониторинга состояния изоляции силовых трансформаторов тяговых подстанций с учетом влияния климатических факторов

Гозбенко В.Е., Иванков А.Н. Автоматизация расчета внутридорожного плана формирования поездов

Деканова Н.П., Могутнов К.С. Разработка системы социальных исследований с учетом методов поисковой оптимизации и статистического анализа

Закарюкин В.П., Крюков А.В., Шульгин М.С. Параметрическая идентификация силовых трансформаторов в фазных координатах

Опарин Г.А., Вартанян Э.К. Алгоритм построения надежных планов решения задачи на объектной модели GRID

Титов К.М., Холодов П.Н. Автоматизация расчета определения стоимости шумозащитных мероприятий на стадии вариантного проектирования легкого рельсового транспорта на основе модернизированной методики СНиП II-12-77 «Защита от шума»

Крюков А.В., Алексеенко В.А. Повышение эффективности оперативного управления в системах тягового электроснабжения

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

Котельников С.С., Иванкова Л.Н., Иванков А.Н. Автоматизированный выбор параметров технико-технологической структуры развития промышленных станций

Фрейдман О.А. Исследование рисков в системе логистического менеджмента региона

Вавилов Д.В., Ереско С.П., Иптышев А.А., Усаков В.И. Методология компьютерного моделирования зубчатых передач с нормированием показателей точности

Новолодская Г.И. Особенности развития национального рынка труда в современных условиях

Нехорошков В.П., Дмитренко А.В., Казанцева Л.С., Тукенов Д.Т. Вагонопотоки и грузопотоки на железнодорожном и автомобильном транспорте

Жеребцов В.А. Организация учетного процесса на предприятиях, внедряющих систему «Бережливое производство»

Викулова Е.Ю. Инвестиционный потенциал региона

Лескова Т.М., Черникова Е.С. Кадровая политика ОАО «РЖД» в условиях кризиса с использованием системы менеджмента качества

Михеев А.А. Способ комбинированной циркуляции в лесосушильной камере

Дегтярева О.С., Козырева Е.В. Планирование общепроизводственных расходов в структурных подразделениях ОАО «РЖД»

Зубкова Д.А., Климов Н.Н., Куценко С.М., Дудаков С.В. Автоматизация процессов обработки данных акустической диагностики напряженного состояния бесстыкового железнодорожного пути

Бубнов В.А. Влияние бюджетной реформы на региональную экономику

Потехина А.М. Новые технологии организации взаимодействия участников перевозочного процесса: маркетинговый подход

Зиборева О.Ю. Внутренний аудит расчетов по налогам и сборам

Котельников С.С. Алгоритм решения проблемной задачи соответствия технических и технологических параметров работы железнодорожных станций

Аршинский Л.В., Жигалов Н.Ю., Мункожаргалов Ц.Б. Неклассические логики в логико-математическом моделировании доказывания по уголовным делам

Носков С.И., Протопопов В.А. Оценка уровня уязвимости объектов транспортной инфраструктуры: формализованный подход

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

№4(32)

2011

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Ответственный за выпуск **В.Е. Гозбенко**

Подписано в печать 20.12.2011. Формат 60x84/8.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 30.
Уч.-изд. л. 33,6. Тираж 500 экз. Заказ № 524
Подписной индекс по каталогу «Почта России»: 64556
ISSN: 1813-9108
Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ.
Сведения о журнале ежегодно
публикуются в международной справочной системе
по периодическим и продолжающимся изданиям
«Ulrich's Periodicals Directory»

ИД №06506 от 26.12.01
Иркутский государственный университет путей сообщения
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Отпечатано в Типографии "Бланк" (ИП Зимина С.В.)
г. Иркутск, ул. Можайского, 11

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