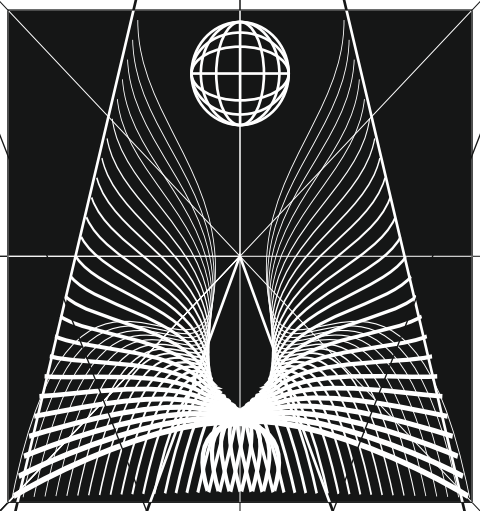
СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

МОДЕЛИРОВАНИЕ



НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

№4(36)
2012

© 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(36), 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

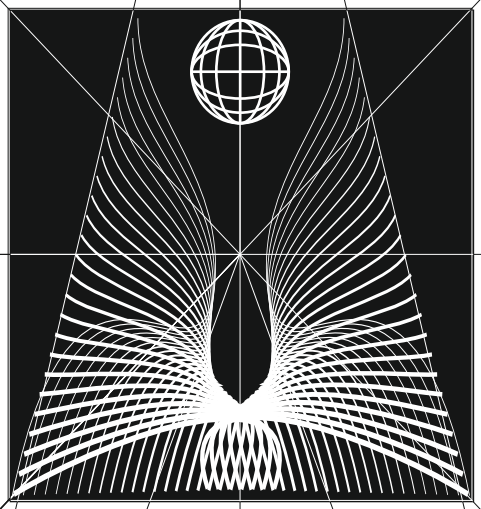
Журнал издается с 2004 г.
Периодичность – 4 номера в год
Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.
Свидетельство ПИ №13-0547 от 24 декабря 2003 г.
Учредитель: Иркутский государственный университет путей сообщения

© 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(36)
2012

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, засл. деятель науки РФ, д. т. н., профессор, зам. главного редактора, ИрГУПС
Б.В. Базаров, член-корр. РАН, председатель президиума Бурятского научного центра СО РАН
С.В. Белокобыльский, д. т. н., 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 им. А.П. Виноградова СО РАН

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

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. Математика. Механика и машиностроение

Хоменко А.П., Елисеев С.В., Ермошенко Ю.В. Методологические основы решения задач динамики. Мехатронные подходы (часть I) 8

Чье Е.У., Шеин А.Б. Метод решения систем линейных алгебраических уравнений для задач моделирования электронных устройств 21

Дрегля А.И. О разрешимости одной краевой задачи в моделях пограничного слоя 27

Мижидон А.Д., Баргуев С.Г. Математическая модель пластины с твердыми телами 30

Соколова И.С., Тырсин А.Н. Использование энтропийно-вероятностного моделирования в задачах мониторинга и управления сложными системами 35

Ванчиков В.Ц., Мухопад А.Ю., Ванчиков А.В., Мухопад Ю.Ф. Упрочнения многослойной пленки жидкости в нанотехнологиях 40

Ахмадеева А.А., Гозбенко В.Е., Лыткина Е.М. Колебания экипажа с упруго-подвешенным грузом при силовом возмущении 47

Колотов А.В., Мерко М.А., Беляков Е.В., Меснянкин М.В. Автоматизированное проектирование зубчатых механизмов приводов технологического оборудования со связанными цилиндрическими колесами 51

Конищева О.В., Брюховецкая Е.В. Расчет подъемной силы вихревого струйного захватного устройства (ВСЗУ) 57

Елисеев С.В., Ковыршин С.В., Большаков Р.С. Особенности построения компактов упругих элементов в механических колебательных системах. Взаимодействия с элементами систем и формы соединения 61

Володарский В.А. Эффективность замен и ремонтов технических устройств 70

Аршинский М.И., Асламов А.А., Кулакова И.М., Асламова В.С. Исследование полей скоростей и давлений закрученного потока в кольцевом канале переменного сечения 75

Обуздина М.В. Усовершенствование технологии очистки нефтесодержащих сточных вод в опытно-промышленных условиях 79

Реминова А.В., Грабельных В.А., Леванова Е.П., Гозбенко В.Е. Новая технология извлечения ртути(II) из водных растворов 85

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

Нечаев В.В., Тупицын А.А. Модернизация модели турбулентности для учета воздействия кривизны поверхности и сжимаемости среды при течении газа в пограничном слое 90

Макаров В.А., Молчанова Е.И. Модель процесса семантического поиска в веб-пространстве 97

Худоногов А.М., Лыткина Е.М., Дульский Е.Ю. Инновационная технология повышения надёжности и продления ресурса электрических машин тягового подвижного состава 102

Спирин Е.А., Никитин А.А., Головин М.П., Встовский А.Л. О выборе типа микроГЭС и ее оптимальной мощности в зависимости от гидрологических параметров 109

Филатов Д.А., Мухопад Ю.Ф. Методика контроля и управления турбо-механизмами 117

Володарский В.А. Определение параметров системы предупредительных замен и ремонтов при допустимом значении интенсивности отказов 126

Кулакова И.М., Аршинский М.И., Асламова В.С. Влияние угла закрутки потока и эжекции части воздуха на эффективность сепарации прямоточного циклона 129

Бутырин О.В., Помогаев И.Е. Методика рационального планирования контроля состояния рельсов ручными средствами дефектоскопии 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

Павлов И.О., Воронова Е.В. Анализ результатов математического моделирования тепломассообмена в процессе сушки 137

Коновалов Ю.В., Герасимов Д.О. Исследование пуска электроприводов с двигателями переменного тока 142

Соколов Л.А., Тырсин А.Н. Повышение достоверности диагностирования систем на основе робастного оценивания стохастических моделей временных рядов 149

Степанов М.А. Способ магнитной дефектоскопии ферромагнитных конструкций, находящихся в напряженном состоянии 154

Гефан Г.Д., Иванов В.Б., Горбачёв О.А. Исследование глобальной статистической модели полного электронного содержания в ионосфере, основанной на методе естественных ортогональных функций и предназначенной для систем спутниковой радионавигации 156

Раздел III. Системный анализ. Моделирование. Транспорт. Энергетика. Строительство. Экономика и управление

Крюков А.В., Чан З.Х. Влияние установок распределенной генерации на качество электроэнергии в системах электроснабжения железных дорог 162

Сольская И.Ю., Власова Н.В. Человеческий капитал: всегда за балансом 167

Сурков Л.П. Генезис моделей рынка транспортных услуг железнодорожного транспорта 170

Васильев А.А. Продление ресурса асинхронных вспомогательных машин электропоездов на основе технологии капсулирования лобовых частей обмотки статора 177

Поздеев А.В., Кинаш Н.Ж., Кулаков Д.А. Разработка и внедрение автоматизированной системы производства ремонта грузовых вагонов 182

Банщикова А.А. Совершенствование системы пропуска импортного груза через государственную границу 191

Ивановская Е.А. Анализ и развитие механизма финансового управления в холдинге ОАО «РЖД» 197

Евсевлеева Л.Г. Методология системного анализа в теории непрерывных проточных систем 202

Мамитко А.А. Восстановление пространственного очертания пути по данным съемки стрел вагоном-путеизмерителем 205

Скрыпник О.Н., Ерохин В.В. Математическая модель рабочего созвездия ГЛОНАСС для исследования условий навигационного сеанса 210

Рыжов С.О., Бальчугов А.В., Кузора И.Е. Массообмен в десорбере с новой цепной насадкой 215

Асалханов П.Г. Особенности моделей прогнозирования сроков агротехнологических операций в различных природно-климатических условиях 218

Грошева Н.Б., Бобкова Н.Г. Оценка качества трудовых ресурсов в условиях инновационной экономики 224

Зенцова Л.В. Модели и методы оценки инноваций 227

Анисимов В.А., Шуклин М.А. К вопросу использования трехмерной модели рельефа в проектировании железных дорог 234

Железнов Д.В. Модель расчёта нагрузки на элементы сети при прогнозировании стационарных транспортных потоков 240

Сольская И.Ю., Потапкина М.А. Исследование влияния глобальных рисков рыночной конъюнктуры на инвестиционную активность Иркутской области 246

Паршута А.А. Формирование продажной цены на транспортно-экспедиционные услуги 249

Осипов В.Е., Васенкин А.В. Система социально-этических принципов технонауки 255

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. Mathematics. Mechanics and mechanical engineering

A.P. Khomenko, S.V. Eliseev, Yu.V. Ermoshenko Methodologic basis of decision of dynamic tasks. Mechatronic approaches (part I) 8

En Un Chye, A.B. Shein Method of the solution of systems of the linear algebraic equations for tasks of design of electronic devices 21

A.I. Dreglea Solvability of one boundary value problem in the boundary layer models 27

S.G. Barguev, A.D. Mizhidon Mathematical model of a plate with solid bodies 30

I.S. Sokolova, A.N. Tyrsin Use of entropy-probabilistic modeling in problems of monitoring and management of complex systems 35

V.C. Vanchikov, A.Yu. Mukhopad, A.V. Vanchikov, Yu.F. Mukhopad Reinforcement of a laminate film of a fluid in nanotechnologies 40

A.A. Akhmadeeva, V.E. Gozbenko, E.M. Lytkina Oscillations of a vehicle with the elastic-suspended cargo at force perturbation 47

A.V. Kolotov, M.A. Merko, E.V. Belyakov, M.V. Mesnjankin Automated designing of gear mechanisms of drives of the process equipment with connected cylindrical wheels 51

O.V. Konischeva, E.V. Bruhovezckaya The calculation of ascensional power for vortex jet gripping device 57

S.V. Eliseev, S.V. Kovirshin, R.S. Bolshakov Construction features of elastic elements compacts in mechanical oscillation systems. Interactions with system selements and connection forms 61

V.A. Volodarsky Technical devices replacents and repairs effectiveness 70

M.I. Arshinsky, A.A. Aslamov, I.M. Kulakova, V.S. Aslamova The investigation of velocities and pressures fields of swirling flow in ring-shaped channel with variable cross-section 75

M.V. Obuzdina Improving technology of clearing of oily waste water in experimental-industrial conditions 79

A.V. Redinova, V.A. Grabelnyh, E.P. Levanova, V.E. Gozbenko New extraction of mercury (II) ions from water solutions 85

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

V.V. Nechaev, A.A. Tupitsyn Modernization of turbulence model for accountting the surface curvature affecting and medium compressibility at gas flow in the boundary layer 90

V.A. Makarov, E.I. Molchanova Model of the process of semantic search in the web 97

A.M. Hudonogov, E.M. Lytkina, E.Yu. Dulskiy Innovative technology of improving reliability and electric machines traction vehicles life extension 102

E.A. Spirin, A.A. Nikitin, M.P. Golovin, A.L. Vstovsky On selection hydroelectric micro plants type and its optimal power in connection with hydrological parameters 109

D.A. Filatov, Yu.F. Muhopad The technique of monitoring and management of turbomechanisms 117

V.A. Volodarsky Determinating of the preventive replacement and repair system parameters on conditions failure rate 126

I.M. Kulakova, M.I. Arshinsky, V.S. Aslamova Swirl flow angle and part of air ejection influence upon direct flow cyclone separation efficiency 129

O.V. Butyrin, I.E. Pomogaev The method of rational planning control state of the rails by manual means of defectoscopy 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

I.O. Pavlov, E.V. Vorornova Analysis of results of mathematical modeling heat and mass transfer in the drying process 137

Yu.V. Konovalov, D.O. Gerasimov The research of electric drives with alternating current engines start-up 142

L.A. Sokolov, A.N. Tyrsin Increasing of authenticity of diagnostics of systems based on robust estimation of stochastic time series models 149

M.A. Stepanov Method of magnetic inspection of ferromagnetic structures under tension 154

G.D. Gefan, V.B. Ivanov, O.A. Gorbachev The research of the global statistical model of the total electron content in the ionosphere based on the method of natural orthogonal functions and aimed for satellite navigation systems 156

Part III. The system analysis. Modelling. Transport. Power. Building. Economy and management

A.V. Kryukov, Tran Duy Hung Influence of distributed generation plants on quality of electric energy in traction power-supply systems 162

I.Y. Solskaya, N.V. Vlasova Human capital: out of balance-sheet 167

L.P. Surkov The genesis of the railroad transport service marketing models 170

A.A. Vasilev The resource prolongation of electric trains asynchronous auxiliary cars on the basis of capsuling frontal parts of winding stator technology 177

A.V. Pozdeev, H.G. Cinash, D.A. Culakov Working out and inculcating automatic information system for repairing of cargo cars 182

A.A. Banshchikova Improving the system of crossing state border for the import cargo 191

E.A. Ivanovskaia Analysis and development of financial management in the holding of JSC «Russian Railways» 197

L.G. Evsevleeva Methodology of system analysis in the theory of continuous flow systems 202

A.A. Mamitko Railway track spatial outline reconstruction based on rail measuring vehicle data 205

O.N. Skrypnik, V.V. Erokhin Mathematic model of glonass working constellation for research of navigational session conditions 210

S.O. Rizshov, A.V. Balchugov, I.E. Kuzora Mass transfer in the desorber new chain with a packing 215

P.G. Asalkhanov Features of agrotechnological operations terms forecasting models in various climatic conditions 218

N.B. Grosheva, N.G. Bobkova Workforce quality assessment in the conditions of innovative economy 224

L.V. Zentsova Models and methods of innovations evaluation 227

V.A. Anisimov, M.A. Shuklin To the issue of using three-dimensional model of the relief in designing of the railways 234

D.V. Zheleznov Model to calculate the load on the network elements when predicting the stationary traffic 240

I.Y. Sol'skaya, M.A. Potapkina Research of influence of global risks of market conditions on investment activity of the Irkutsk region 246

A.A. Parshuta Transport-expeditionary service saving-price formation 249

V.E. Osipov, A.V. Vasenkin System of the social and ethical bases of technoscience 255

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 предоставляется 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 распечатки** 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, предоставлены **на компакт-диске** в виде файла с расширением *.bmp, *.tif **и распечатки** 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 предоставлены 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

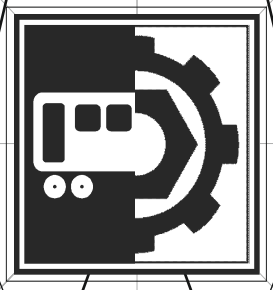
Министерство образования и науки Российской Федерации
Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта

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

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование



Раздел 1

Современные технологии. Математика. 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 621:534.834;886.6

Хоменко Андрей Павлович,
д. т. н., профессор, ректор ИрГУПС, тел./факс: 8(3952) 63-83-11,
Елисеев Сергей Викторович,
д. т. н., профессор, директор Научно-образовательного центра современных технологий, системного анализа и моделирования, тел./факс: 8-395-2-59-84-28, e-mail: eliseev_s@inbox.ru,
Ермошенко Юлия Владимировна,
к. т. н., декан заочного факультета ИрГУПС, тел.: 8(3952) 638-392

МЕТОДОЛОГИЧЕКИЕ ОСНОВЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДИНАМИКИ. МЕХАТРОННЫЕ ПОДХОДЫ (ЧАСТЬ I)

A.P. Khomenko, S.V. Eliseev, Yu.V. Ermoshenko

METHODOLOGIC BASIS OF DECISION OF DYNAMIC TASKS. MECHATRONIC APPROACHES (PART I)

Аннотация. *Рассматриваются возможности упрощения построения математических моделей механических систем с несколькими степенями свободы на основе введения понятия об упругом компакте или квазипружины. Предложено использование передаточных функций в режимах зануления промежуточных масс. Статические свойства системы определяются из передаточной функции системы при комплексной переменной, равной нулю. Приведены примеры определения параметров упругих компактов из различных элементов типового набора.*

Ключевые слова: *приведенная жесткость, динамическая жесткость, упрощение механических колебательных систем, передаточная функция.*

Abstract. *Simplification possibilities of mechanical systems' mathematical models formation with several degrees of freedom on basis of definition elastic compact or quasispring introduction are considered. Transfer functions using in intermediate masses zeroing regimes is offered. Statical features of system are defined from transfer function of system at complex variable which is equal to zero. Examples of elastic compacts' parameters estimation from different elements of standard set are shown.*

Keywords: *reducing elasticity, dynamical elasticity, simplification of mechanical oscillation systems, transfer function.*

Введение

При решении ряда задач динамики машин, связанных с оценкой действия внешних факторов ударной и вибрационной природы, что характерно, в частности, для разработки способов и средств виброзащиты и виброизоляции, большое значение приобретают вопросы выбора и обоснования математических моделей. Традиционные походы основаны на использовании математического аппарата теоретической механики, теории механизмов и машин и закреплены в инженерной практике [1÷4]. В меньшей степени внимание уделялось вопросам управления динамическим состоянием технических объектов, что стало особенно актуальным в связи с развитием динамики управляемых систем в целом и робототехники в частности, а в последние годы – мехатроники [5÷8]. Необходимость разработки математического, алгоритмического и программного обеспечения в задачах управления сложными системами [9÷11] стимулирует поиски новых возможностей в создании новых подходов, интегрирующих представления о динамических свойствах технических объектов в соответствии с возможностями системных технологий и аналитического аппарата теории автоматического управления [12, 13], теории цепей [14]. В этом плане, если иметь в виду приложение к динамике механических систем, показательны работы [15÷17], во многом определившие направления и методы решения задач современной динамики машин. Символика структурных представлений технических объектов, динамическое состояние которых формируется различными воздействиями, связана с использованием структурных схем, отражающих многочисленные связи, имеющие принципиальное значение для обеспечения соответствующего динамического качества машин. Удобство структурных систем заключается в возможности объединения в рамках единого подхода связей функциональной и информационной природы, придавая цельность отражения основных свойств объекта управления в понятиях передаточных функций, что позволяет приводить задачи оценки динамического состояния к системе

типовых (или модельных) задач, технология решения которых достаточно разработана. В конечном итоге такие представления о методологических основах анализа и динамического синтеза систем дают возможность выделения изучаемого объекта на уровне общих представлений о динамической системе, имеющей входные и выходные сигналы, преобразование которых может быть сделано на основе тех или иных методологических позиций [18]. Существует достаточно большое разнообразие методов построения математических моделей объектов, позволяющих учитывать характерные особенности физической природы систем и их динамического состояния. К числу наиболее развитых подходов можно было бы отнести использование математических моделей в виде системы обыкновенных линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, в предположении, что такие модели могут с достаточной достоверностью отражать свойства малых колебательных движений [19, 20], хотя более детализированные представления связаны с учетом нелинейных свойств процессов [21÷23].

I. Постановка задачи. Общие положения. В предлагаемой работе рассматриваются особенности отображения линейных динамических систем, математической моделью которых являются обыкновенные дифференциальные уравнения с постоянными коэффициентами, в связи с возможными формами структурных интерпретаций, основанных на различных представлениях об элементах модели и способах их соединений.

Построение математической модели, если иметь в виду детали построения системы дифференциальных уравнений, представляет отдельный интерес и в первую очередь определяется физической природой процессов. Во всяком случае, возможна следующая классификация подходов, если учитывать физическую природу процессов.

1. Прохождение сигналов, то есть их передача через динамическую систему, что связано с изменениями сигналов и их характеристик. Подробности таких процессов рассматриваются в теории связи и процессов управления, например в [10, 18]. Математическая модель в данном случае отражает особенности процессов преобразования и передачи сигналов с учетом особенностей физической природы элементарных звеньев, составляющих систему. Последнее связано с особенностями измерения сигналов, их обработкой с целью рациональной передачи сигналов, а также учетом взаимодействия сигнала с динамической системой, привносящей изменения в параметры сигнала. Упомянутое направление тесно связано с теорией цепей, которая обобщается на передачу радиотехнических сигналов, а также на электронные, электрические и механические цепи [14, 24÷26].

2. В решении задач управления динамическим состоянием объектов на основе идей технической кибернетики, использующих представления о различных видах связей, в частности обратных связей. Структурные подходы реализуются путем построения структурных схем систем автоматического управления [11, 20, 27]. Исходная математическая модель динамической системы, если иметь в виду технологию ее построения, формируется на основе соотношений между параметрами состояния (выходные сигналы), а также различными воздействиями, отражающими внутренние и внешние связи элементов системы между собой и внешней средой. В таких построениях учитываются принципы и закономерности, определяемые физической природой составляющих элементов, а также и более общие установки, опирающиеся на достигнутый уровень понимания особенностей функционирования сложных систем, в которых затруднено непосредственное восприятие проявлений общих законов механики. В таких системах существует своя система элементарных типовых звеньев и правил их соединения, что позволяет получить математическую модель динамической системы в целом, с последующим использованием аналитического аппарата теории автоматического управления.

3. Сложные технические системы, как некоторое обобщение широкого класса объектов, в которых реализуются идеи автоматического управления, не исключают существования систем, отличающихся однородностью происходящих в них процессов. Такими примерами могут служить электрические цепи, а также механические колебательные системы.

По отношению к механическим колебательным системам, которые составляют основу существующих машин различного назначения, можно вполне обоснованно использовать возможности выделения самостоятельного класса структурных моделей, которым могут быть сопоставлены эквивалентные в динамическом отношении системы автоматического управления [12, 13, 15]. Математическая модель такой динамической системы составляется на основе известных законов механики и принимает вид системы линейных дифференциальных уравнений (или приводится к таковым путем соответствующих упрощений). По отношению к системам автоматического управления (п. 2) механические системы являются более простыми, так как не содержат звеньев, связанных с изменениями сигналов, их преобразованиями и передачей (то есть информационные связи как отдельный

вид операций в структурных схемах и математической модели не отображаются).

Поскольку существенные для функционирования системы процессы связаны с формированием сил и соответствующих параметров движения как такового, система элементарных звеньев, использование которых позволяет определить структуру динамической системы, будет иметь специфичный вид, также как правила их соединения [12÷13]. Рассмотренный подход адекватен подходам, развиваемым в теории цепей, в частности в электрических цепях, использующих систему правил соединения элементарных звеньев, основанных на законах Кирхгофа [14, 25].

4. Отдельным направлением в построении структурных моделей динамических систем является использование специальных электронных и электрических устройств для создания схем решения дифференциальных уравнений на аналоговых и цифро-аналоговых вычислительных машинах [10, 28]. В этом случае также на основе динамической системы могут быть сформированы представления о наборе типовых элементарных звеньев. В данном случае имеются в виду различные типы решающих электронных усилителей, позволяющих вести дифференцирование, интегрирование, суммирование сигналов, их инверсию и согласование по параметрам входных и выходных нагрузок.

Таким образом, если принимать во внимание возможности обобщения представлений о динамических системах, в которых внешние воздействия любой природы и передача сигналов рассматриваются как некоторая единая общность по отношению к динамической системе, то структурные схемы при одной и той же динамической системе могут иметь существенные различия. Последние проявляются в том, что различными выбираются системы элементарных типовых звеньев и правила их соединения. При этом передаточные функции динамической системы могут быть одинаковыми. Вместе с тем интерес представляет технология построения передаточных функций системы (их может быть несколько при наличии нескольких входных и выходных сигналов). Каждая из структурных интерпретаций обладает своими особенностями и отражает свойства системы, определяемые целями и задачами управления динамическим состоянием.

Предлагаемая дифференциация представлений может рассматриваться как некоторая интеграционная основа мехатроники, если предполагать необходимость обоснования существования некоторого общего механизма появления движения как формы реализации некоторого процесса или акта планирования действий в рамках искусственного интеллекта.

II. Общие свойства математических моделей процессов преобразования сигналов. В процессе движения системы величины, определяющие ее состояние и называемые *обобщенными координатами системы,* взаимосвязанно изменяются во времени. Соотношения, сохраняющиеся в каждый момент времени между обобщенными координатами системы и ее входным сигналом, образуют в общем случае систему уравнений движения. В качестве выходного сигнала системы обычно используется одна из ее обобщенных координат или некоторая функция этих координат. Таким образом, выходной сигнал рассматривается как одна из неизвестных функций в системе уравнений движения.

Поскольку система уравнений движения должна быть полной, то путем исключения не интересующих нас обобщенных коорди–нат может быть получено одно уравнение движения, связывающее выходной сигнал с входным. Число обобщенных координат, которому должно быть равно число независимых уравнений движения, определяет число степеней свободы.

Если обозначить входной сигнал через $y_0(t)$, а выходной сигнал через $y(t)$, то с математи–ческой точки зрения действие динамической системы сводится к реализации некоторой зависимости между вели–чинами $y(t)$ и $y_0(t)$, которую можно записать в общем виде:

$$D\left[y(t)\right] = D_0\left[y_0(t)\right], \qquad (1)$$

где D и D_0 – некоторые операторы, применяемые к функциям $y(t)$ и $y_0(t)$. Конкретный вид операторов определяется уравнениями движения рассматриваемой системы.

Оператор D называется *линейным* и обладает следующими основными свойствами:

$$D\left[\sum_k y_k(t)\right] = \sum_k D\left[y_k(t)\right],$$
$$D\left[cy(t)\right] = cD\left[y(t)\right], \quad c = const. \qquad (2)$$

Первое из соотношений (2) определяет *принцип суперпозиции* (наложения), что позволяет общее решение линейного уравнения представить в виде суммы линейно независимых частных решений. Известно, что производная любого порядка и интеграл любой кратности, примененные к какой-либо функции, являются линейными операторами по отношению к этой функции; линейные комбинации подобных линейных операторов представляют собой также линейные операторы, из которых и образуются линейные дифференци-

альные уравнения. Отметим, что линейные системы должны удовлетворять следующим условиям:

- параметры системы, от которых зависят коэффициенты, входящие в уравнения движения, не должны зависеть от обобщенных коор–динат системы, являющихся искомыми функциями времени, а также от их производных;

- параметры системы не должны зависеть от времени.

Выполнение первого условия является обязательным, так как в противном случае уравнение становится нелинейным и будет описывать движение нелинейной системы. Соблюдение второго условия определяет класс линейных систем, так как при нарушении этого условия уравнение остается линейным, но с переменными коэффициентами. Целесообразно, однако, системы, движение которых описывается линейными дифференциальными уравнениями с переменными коэффициентами, выделить в отдельный класс так называемых параметрических систем.

III. Уравнения движения. Классический подход. С учетом изложенного уравнением движения линейной динамической системы является линейное дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами. Применительно к реальным системам обыкновенное дифференциальное уравнение соответствует описанию процессов, временем распространения которых через систему (т. е. временем передачи сигнала от входа к выходу системы) можно пренебречь. При этом пространственная протяженность системы не имеет принципиального значения, и она трактуется как система с сосредоточенными параметрами.

Уравнения в частных производных физически соответствуют учету волновых процессов, происходящих в элементах системы, что требует иных подходов [29].

Рассмотрим пример линейной системы, движение которой описывается дифференциальным уравнением второго порядка вида

$$a_0 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_2 y = f, \qquad (3)$$

где y – обобщенная координата; a_0, a_v, a_2 – постоянные коэффициенты, зависящие от параметров системы; f – известная функция времени t. В частности, механические колебательные системы с несколькими степенями свободы могут рассматриваться при построении математических моделей как совокупность простейших или базовых моделей, каждая из которых имеет уравнение движения вида (3). Таким же образом выглядят и парциальные системы при построении структурных схем виброзащитных систем [12, 13], а также структурные интерпретации механических [26] и электрических [25] цепей.

Применительно к динамической системе заданная функция времени f представляет собой входной сигнал. В качестве выходного сигнала принимается обобщенная координата положения объекта y (или величина, ей пропорциональная), поскольку относительно нее составлено уравнение (3).

Линейный дифференциальный оператор в общем случае имеет вид

$$D = \alpha_n \frac{d^n}{dt^n} + \alpha_{n-1} \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} + ... \alpha_1 \frac{d}{dt} + \alpha_0 = \sum_{k=0}^{n} \alpha_k \frac{d^k}{dt^k}, \quad (4)$$

где a_0, a_1, ..., a_n – постоянные коэффициенты; порядок высшей производной определяет порядок оператора. Хотя оператор D приобретает конкретный вид, будучи применен к какой-либо функции переменной t, тем не менее, операторы D обладают самостоятельными свойствами, благодаря которым использование операторов может сокращать промежуточные преобразования. Эти свойства заключаются в том, что

1) произведение линейных операторов является также линейным оператором, т. е. $D_1 D_2 ... D_n = D$;

2) результат перемножения операторов не меняется при изменении порядка последовательности сомножителей, т. е. $D_1 D_2 = D_2 D_1$;

3) $D_2[D_1(y)] = D_2 D_1(y) = D(y)$, где $D = D_2 D_1 = D_1 D_2$;

4) в процессе промежуточных преобразований операторное выражение $D(y)$ может рассматриваться как произведение собственно оператора D на функцию y.

Эти свойства достаточно очевидны, так как производная любого порядка является линейным оператором. В дополнение отметим также, что порядок наивысшей производной в операторе D_0 не может быть выше порядка наивысшей производной оператора D, если под y подразумевается выходной сигнал физически реализуемой системы; оператор левой части уравнения движения $D(y)$ сохраняется неизменным по отношению к любой выходной величине y, являющейся линейным оператором от обобщенной координаты системы.

Состояние сложной системы в любой момент времени определяется несколькими обобщенными координатами; их число равно числу степеней свободы системы. В общем случае определение числа степеней свободы системы и соответствующих удобных обобщенных координат не всегда является простой задачей. Отметим, что сложную систему во многих случаях можно представить состоящей из простейших взаимосвязанных систем – звеньев. Поэтому в наиболее общем случае движение сложной линейной системы с

сосредоточенными параметрами описывается системой дифференциальных уравнений вида

$$\begin{aligned} &D_{11}(y_1)+D_{12}(y_2)+...+D_{1s}(y_s)=y_{01},\\ &D_{21}(y_1)+D_{22}(y_2)+...+D_{2s}(y_s)=y_{02},\\ &.....\\ &D_{s1}(y_1)+D_{s2}(y_2)+...+D_{ss}(y_s)=y_{0s}. \end{aligned} \quad (5)$$

В этих уравнениях $y_1, y_2, ...y_s$ – обобщенные координаты системы, $y_{01}, y_{02}, ...y_{0s}$ – входные сигналы (внешние силы, действующие на систему).

В наиболее общем случае звеньев второго порядка операторы D_{ik} имеют вид

$$D_{ik}=\alpha_{ik}\frac{d^2}{dt^2}+\beta_{ik}\frac{d}{dt}+\gamma_{ik}, \quad (6)$$

где α_{ik}, β_{ik}, и γ_{ik} – постоянные коэффициенты, зависящие от параметров системы, причем некоторые из них могут иметь нулевые значения. Члены с индексами $i \neq k$ соответствуют существующим в системе внутренним связям.

Не ограничивая общности, можно принять, например, $y_{01}=y_0$, $y_{02}=y_{03}=...=y_{0s}=0$, так как в силу линейности уравнений (5) действие всех внешних сил y_{0i} можно рассматривать как результат наложения друг на друга действий каждой из этих сил порознь. Учитывая также перечисленные выше свойства операторов D, можно переписать уравнения (5) в виде

$$\begin{aligned} &D_{11}y_1+D_{12}y_2+...+D_{1s}y_s=y_0,\\ &D_{21}y_1+D_{22}y_2+...+D_{2s}y_s=0,\\ &.....\\ &D_{s1}y_1+D_{s2}y_2+...+D_{ss}y_s=0. \end{aligned} \quad (7)$$

Из системы уравнений (7) можно найти уравнение для любой координаты y_k путем исключения всех остальных. Процедура исключения упрощается, если в процессе промежуточных вычислений операторы D_{ik} рассматривать как некоторые коэффициенты при неизвестных y_k. При этом, воспользовавшись теорией определителей, получим

$$y_k=\frac{\Delta_k}{\Delta}=\frac{\Delta_{1k}y_0}{\Delta}, \quad (8)$$

где

$$\Delta=\begin{vmatrix} D_{11} & D_{12}... & D_{1s}\\ D_{21} & D_{22}... & D_{2s}\\ ..... & & \\ D_{s1} & D_{s2}... & D_{ss} \end{vmatrix}, \quad (9)$$

$$\Delta_k=\begin{vmatrix} D_{11} & D_{12}... & D_{1k-1} & x_0 & D_{1k+1}... & D_{1s}\\ D_{21} & D_{22}... & D_{2k-1} & 0 & D_{2k+1}... & D_{2s}\\ ..... & & & & & \\ D_{s1} & D_{s2}... & D_{sk-1} & 0 & D_{sk+1}... & D_{ss} \end{vmatrix}=\Delta_{1k}x_0. \quad (10)$$

Очевидно, определители Δ и Δ_{1k} являются линейными операторами $\Delta=D$ и $\Delta_{ik}=D_{0k}$, так что в результате для координаты y_k полу–чаем линейное дифференциальное уравнение вида

$$D(y_k)=D_{0k}(y_0). \quad (11)$$

Полученный результат показывает, что левая часть уравнения для любой координаты y_k одна и та же, причем порядок оператора D будет $n \leq 2s$. Оператор D_{0k}, стоящий в правой части уравнения, для каждой координаты имеет свое значение, но порядок оператора D_{0k} всегда меньше, чем порядок оператора D.

Нетрудно убедиться в том, что по отношению к величинам $y'_k=D_k(y_k)$, где D_k – линейный оператор произвольного порядка, уравнение (11) примет вид

$$D(y'_k)=D'_{0k}(y_0),\ D'_{0k}=D_kD_{0k}.$$

Таким образом, левая часть уравнения не меняется, тогда как оператор D'_{0k} в правой части уравнения может оказаться любого порядка, зависящего от порядка оператора D_k. Однако для величины y'_k, являющейся выходным сигналом физически реализуемой системы, оператор D_k не может быть порядка выше второго, и тогда порядок оператора D'_{0k} будет не выше, чем порядок оператора D.

В общем виде, независимо от сложности системы, ее уравнение движения в наиболее общем случае имеет вид

$$D(y)=D_0(y_0), \quad (12)$$

где

$$\begin{aligned} &D=\alpha_0\frac{d^n}{dt^n}+\alpha_1\frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}}+...+\alpha_n,\\ &D_0=b_0\frac{d^m}{dt^m}+b_1\frac{d^{m-1}}{dt^{m-1}}+...+b_m. \end{aligned} \quad (13)$$

При этом $m \leq n$, если y – выходной сигнал физически реализуемой системы и y_0 – входной сигнал. Все коэффициенты a_i и b_i вещественны, поскольку являются функциями параметров системы.

Вид оператора D не зависит от того, какая из обобщенных координат системы или какой линейный оператор от нее используется в качестве выходного сигнала; при этом меняется только оператор D_0 правой части уравнения. Более того, оператор D не меняется и при изменении входа в систему; это вытекает из неизменности главного определителя Δ системы уравнений (5) при выборе любой из функций y_{0i} в качестве входного сигнала.

Такие представления согласуются с тем обстоятельством, что формальное математическое решение линейного уравнения (12), как известно,

определяется суммой двух решений: общего решения уравнения (12) без правой части, т. е. общего решения однородного уравнения $D(y)=0$, и частного решения неоднородного уравнения (12).

Применительно к конкретной динамической системе входной y_0 и выходной y сигналы имеют определенные размерности, не всегда одинаковые. Поэтому коэффициенты a_i и b_i также имеют надлежащие размерности. Введением относительных величин $y'=\frac{y}{y^0}$ и $y_0'=\frac{y_0^0}{x_0^0}$, где y^0 и y_0^0 – некоторые базовые значения величин y, и y_0, уравнение (12) приводится к универсальному виду с коэффициентами $a_i'=a_i y^0$ и $b_i'=b_i y_0^0$, которые имеют размерность времени в $(n-i)$-й степени.

Эта общность математического исследования стала основанием широко развитой в настоящее время области прикладной математики – математического моделирования [28].

Решение $y_{св}(t)$ соответствует движению системы в отсутствие внешнего сигнала, т. е. собственному свободному движению системы. Общий вид функции $y_{св}(t)$, очевидно, не зависит от вида функции $y_0(t)$, но определяется свойствами лишь самой системы, кото–рые проявляются в свойствах корней *характеристического уравне–ния* системы. Характеристическое уравнение получается из оператора D системы (левая часть уравнения (12)) путем замены в нем $\frac{d^k}{dt^k}$ на p^k и имеет вид

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + ... + a_n = 0. \qquad (14)$$

Если, например, все корни характеристического уравнения (14) различны, то

$$y_{св}(t) = \sum_{k=1}^{n} C_k e^{p_k t}, \qquad (15)$$

где p_k – корни уравнения (14) и C_k – произвольные постоянные.

При наличии кратных корней соответствующее общее выражение для $y_{св}(t)$ также известно и также содержит n произвольных по–стоянных C_k. Частное решение $y_{уст}(t)$ зависит от вида функции $y_0(t)$, определяющей внешнее воздействие на систему, и соответствует вынужденному или установившемуся движению (режиму, состоянию) системы.

Необходимо отметить, что хотя общее решение $y_{св}(t)$ имеет стандартные формы, как, например, (15), совершенно не зависящие от внешних сигналов $y_0(t)$, частные его виды могут быть достаточно разнообразны. Частный вид этого решения зависит от свойств корней характеристического уравнения системы (14), а также от начальных условий и начального значения $y_0(0)$, поскольку от них зависят значения произвольных постоянных C_k.

Решение, являющееся результатом наложения двух решений, из которых одно соответствует режиму свободных колебаний системы $y_{св}(t)$, а другое – $y_{уст}(t)$ – установившемуся режиму, носит название переходного процесса. Протекание переходного процесса зависит также и от вида функции $y_0(t)$. Согласно (15), свободные колебания системы будут затухать, если вещественные части корней p_k характеристического уравнения отрицательны. При этом система теоретически при $t \to \infty$ перейдет в установившийся режим, совершенно не зависящий от начальных условий. Следует заметить, что в теории управления иногда переходным процессом называют только функцию $y_{св}(t)$.

Выходной сигнал $y(t)$, получающийся в течение переходного процесса, является наиболее полной характеристикой динамических свойств системы, имеющих важнейшее значение в теории управления. Представление о динамических свойствах системы с достаточной полнотой может быть составлено в результате ее исследования в некоторых стандартных условиях [30].

Первое условие заключается в нулевых параметрах начального состояния системы. Система находится в покое, если все ее звенья находятся в покое. При этом для звена второго порядка начальные значения его обобщенной координаты и ее первой производной равны нулю; для звена первого порядка равно нулю начальное значение его обобщенной координаты. Это соответствует требованию непрерывности указанных величин. Следует подчеркнуть, что для системы, находящейся в покое, начальные условия по производным любого порядка могут иметь отличные от нуля значения.

Второе условие определяет стандартную форму входного сигнала, которая принимается в виде единичной функции времени $y_0(t)=1(t)$.

Выходной сигнал системы, получающийся при соблюдении указанных стандартных условий (начальное состояние системы – покой, входной сигнал – единичная функция), называется переходной функцией системы *h(t)*.

Детализированные представления о переходных процессах в динамической системе нашли отражение в работе [31].

Изложенные выше особенности подхода в оценке свойств динамической системы, приведенной к виду (1), создают возможности постановки вопроса о выборе различных форм структурных интерпретаций связей в системе, что предопределяется свойствами линейного оператора. Для дальнейших исследований важным обстоятельством является выделение в классическом подходе характеристического уравнения (7) и возможностей использования теории определителей для нахождения необходимых связей между выбранными входными и выходными сигналами. Последнее, в конечном итоге, приводит к определению некоторых важных понятий.

IV. Операционные методы. Большое значение в развитии структурных методов представления динамических систем имеет понятие **передаточной функции**. Передаточной функцией системы называют отношение изображения ее выходной величины к изображению входной величины при условии, что система в начальный момент времени находится в покое. Такое определение не зависит от применяемого вида изображения. Обозначив передаточную функцию через $W(p)$, имеем

$$W(p)=\frac{\bar{y}(p)}{\bar{y}_0(p)}=\frac{\bar{y}_{LK}(p)}{\bar{y}_{0LK}(p)}. \qquad (16)$$

Для рассматриваемого класса линейных систем уравнение движения в наиболее общем случае имеет вид

$$\left(a\frac{d^n}{dt^n}+a_1\frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}}+...a_n\right)y(t)=$$

$$=\left(b_0\frac{d^m}{dt^m}+b_1\frac{d^{m-1}}{dt^{m-1}}+...b_m\right)y_0(t). \qquad (17)$$

Так как в начальный момент система находится в покое, уравнение (16) в операционной форме запишется следующим образом:

$$D(p)\bar{y}(p)=D_0(p)\bar{y}_0(p), \qquad (18)$$

где

$$\left.\begin{aligned}D(p)&=a_0p^n+a_1p^{n-1}+...+a_n,\\ D_0(p)&=b_0p^m+a_1p^{m-1}+...+b_n,\end{aligned}\right\} \qquad (18')$$

причем $m\le n$.

Из (17) получаем

$$W(p)=\frac{D_0(p)}{D(p)}. \qquad (19)$$

Таким образом, передаточная функция $W(p)$ не зависит от вида входной величины, характеризуя собственную систему. Из сопоставления уравнений (17) и (18') следует, что знаменатель передаточной функции, приравненный нулю, дает характеристическое уравнение системы $D(p)=0$.

Передаточную функцию можно интерпретировать как *LK* – изображение переходной функции $h(t)$ [10]. Действительно, переходная функция представляет собой выходной сигнал системы $y(t)=h(t)$, получаемый при условии, что в начальный момент система находится в покое, а входным сигналом является единичная функция, т. е. $y_0(t)=1(t)$.

При этом $\bar{y}_{0LK}(p)=1_{LK}(p)=p_1(p)=1$ и по (16) находим

$$W(p)=\bar{h}_{LK}(p)=p\bar{h}(p). \qquad (20)$$

Сравнивая (20) с (19), получаем

$$h(t)\overset{\bullet}{=}\bar{h}(p)=\frac{W(p)}{p}=\frac{D_0(p)}{pD(p)}. \qquad (21)$$

Если в начальный момент система находится в покое, а входной сигнал имеет вид $y_0(t)\overset{\bullet}{=}\bar{y}_0(p)$, то для выходного сигнала получим

$$y(t)\overset{\bullet}{=}\bar{y}(p)=W(p)\bar{y}_0(p)=p\bar{h}(p)\bar{y}_0(p). \qquad (22)$$

Наконец, если переходная функция системы $h(t)$ известна, то при заданном входном сигнале $y_0(t)$ выходной сигнал $y(t)$ может быть сразу получен на основании формулы (22) и свертки интеграла [18]:

$$y(t)=\frac{d}{dt}\int_0^t h(t-\tau)y_0(\tau)d\tau. \qquad (23)$$

Напомним, что формулы (16)÷(23) применимы лишь при условии, что система в начальный момент времени находится в покое.

Как было отмечено выше, представления о линейных операторах и возможностях их использования для определения динамических свойств системы при стандартных внешних сигналах позволило развить технологии структурных интерпретаций исходных физических систем, состоящих, в свою очередь, из некоторых типовых звеньев или элементов. Взаимодействие элементов определяет структуру системы с точки зрения выделения существующего механизма взаимодействия элементов между собой и возможностей преобразования схемы взаимодействия с целью получения необходимых характеристик, например передаточных функций, поскольку все операции рассматриваются в области преобразований Лапласа (L) или Карсона (LK) [18, 30]. Понятие пере-

даточной функции позволяет ставить вопрос о существовании нескольких вариантов построения набора элементов или типовых звеньев.

Исходным в таком подходе можно считать метод «расщепления» линейного оператора (в классическом подходе к решению линейного дифференциального уравнения) на блоки в виде операторов второго порядка. В физическом смысле это интерпретируется возможностями колебательного звена и свойствами линейного оператора в целом.

Оператор второго порядка, если иметь в виду принцип его формирования, может быть разложен на два простых оператора первого порядка. Выход на операторы более высокого порядка (три и более) обычно не практикуется в связи со сложностью физических интерпретаций. По существу, учет особенностей линейного оператора определил один из подходов в формировании структурных отображений или структурных моделей, которые могут рассматриваться как аналоги математических моделей в форме дифференциальных уравнений. В данном случае структурная модель строится на основе базовых типовых звеньев с операторами второго порядка. Эти звенья могут соединяться между собой по определенным правилам, что позволяет использовать теорию определителей. В свою очередь, базовое колебательное звено может быть разложено на два более простых звена в зависимости от корней характеристического уравнения второго порядка.

Таким образом, выделение элементарной базы на приведенной выше основе можно рассматривать как один из возможных вариантов формирования представлений о простых составляющих сложных систем и особенностях взаимодействия элементов между собой. Однако такой подход не является единственным и зависит от физической природы исходных систем.

V. Основы структурных представлений. При структурном подходе к рассмотрению систем большую роль играет понятие звена направленного действия. Звено, направленного действия, или направленное звено, может быть системой любой сложности, отличительное свойство которой заключается в том, что выходная величина звена $y(t)$ зависит от входной величины $y_0(t)$. При этом обратное воздействие выхода на вход отсутствует в том смысле, что присоединение к выходу звена направленного действия какого-либо другого звена не изменяет передаточной функции первого звена. Физическая природа звена может быть какой угодно. Таким образом, система может быть классифицирована по соответствующему ей уравнению движения, связывающему выходной и входной сигналы. Для направленного звена характерно также то, что между изображениями его выходного и входного сигналов при нулевом начальном состоянии имеет место соотношение (22), являющееся результатом алгебраизации уравнения движения звена. Отметим, что любой системе оказывается возможным сопоставить структурную схему, состоящую из простых звеньев направленного действия, соединенных друг с другом тем или иным способом. Выбор отдельных звеньев и способа их соединения ограничивается общим требованием: связь между выходной и входной величинами структурной схемы должна совпадать с уравнением движения системы. Поэтому структурная схема может иметь условный смысл и даже не соответствовать физической природе рассматриваемой реальной системы, которой она сопоставляется.

VI. Основные способы соединения звеньев направленного действия. Разнообразные схемы соединения направленных звеньев можно свести к трем основным способам: последовательному, параллельному и соединению с обратной связью.

Последовательное соединение направленных звеньев показано на рис. 1. В данном случае имеем

$$\bar{y}_1(p)=W_1(p)\bar{y}_0(p),\ \bar{y}_2(p)=W_2(p)\bar{y}_1(p),\ldots,\quad \bar{y}_n(p)=W_n(p)\bar{y}_{n-1}(p). \tag{24}$$

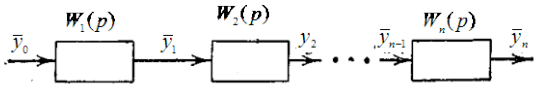


Рис. 1. Принципиальная схема последовательного соединения

Из этих уравнений следует

$$\bar{y}(p)=\bar{y}_n(p)=W_1(p)W_2(p)\ldots W_n(p)\bar{y}_0(p)=W_{посл}(p)\bar{y}_0(p),$$

где передаточная функция n последовательно соединенных звеньев

$$W_{посл}(p)=W_1(p)W_2(p)\ldots W_n(p). \tag{25}$$

Параллельное соединение звеньев показано на рис. 2.

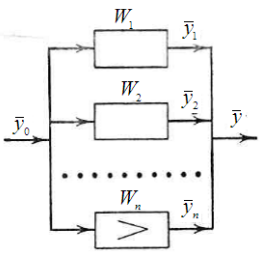


Рис. 2. Принципиальная схема параллельного соединения

Выходные величины звеньев суммируются, и их сумма образует общую выходную величину системы; из рис. 2 видно, что

$$\bar{y}(\mathrm{p}) = \bar{y}_1(p) + \bar{y}_2(p) + ... + \bar{y}_n(p) = W_{пар}(p)\bar{y}_0(p), \quad (26)$$

где передаточная функция n параллельно соединенных звеньев

$$W_{пар}(p) = W_1(p) + W_2(p) + ... + W_n(p). \quad (27)$$

Схема с обратной связью представлена на рис. 3. Выходная величина первого звена подается на вход второго звена (отмеченного индексом r), выходная величина которого подается на вход первого звена в сумме с входной величиной системы x_0. Для рассматриваемого соединения имеем

$$\bar{y}(p) = W(p)\left[\bar{y}_0(p) + \bar{y}_0'(p)\right] =$$
$$= W(p)\bar{y}_0(p) + W(p)W_r(p)\bar{y}(p),$$

откуда

$$\bar{y}(p) = \frac{W(p)}{1 - W_r(p)W(p)}\bar{y}_0(p) = W_3(p)\bar{y}_0(p), \quad (28)$$

где $W_3(p) = \dfrac{W(p)}{1 - W_r(p)W(p)}$.

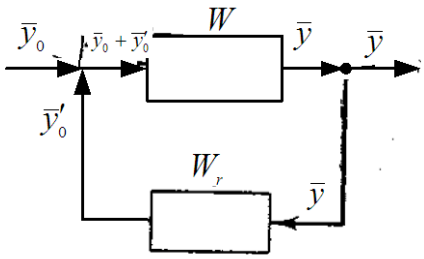


Рис. 3. Принципиальная схема соединения с обратной связью

Схемы со специально примененной обратной связью получили широкое распространение в технике связи и управления [10÷13, 18, 20, 27, 32].

Соединенные обратной связью звенья образуют замкнутую систему (рис. 3), поскольку выходная величина *y* через звено обратной связи заводится снова на вход системы. Соответствующая замкнутой системе передаточная функция (28) обозначена $W_{3см}(\mathrm{p})$.

В общем случае любой сложности линейное звено имеет передаточную функцию вида (19). Как следует из выражений (25), (16) и (28), для систем, образованных из таких звеньев и соединенных любым из перечисленных способов, получается передаточная функция того же вида (19).

Если в выражениях (20) и (27) принять

$$W_i(p) = \frac{Q_i(p)}{P_i(p)}, \quad W_{посл}(p) = \frac{Q_{посл}(p)}{P_{посл}(p)}$$

и

$$W_{пар}(p) = \frac{Q_{пар}(p)}{P_{пар}(p)},$$

то легко убедиться, что

$$P_{посл}(p) = P_1(p)P_2(p)...P_n(p)$$

и

$$P_{пар}(p) = P_1(p)P_2(p) \ \ldots \ P_n(p).$$

Следовательно, при последовательном и параллельном соединении одних и тех же направленных звеньев любой сложности получаются разомкнутые системы, обладающие одним и тем же характеристическим уравнением.

В случае соединения с обратной связью можно предположить, что звено $K_r(p)$ состоит из двух последовательно соединенных звеньев. Схема будет иметь вид, изображенный на рис. 4*а*.

В качестве выходного сигнала можно использовать как величину y_2, так и величину y_1. Соответственно получается

$$W_{зам.1}(p) = \frac{\bar{y}_1(p)}{\bar{y}_0(p)} = \frac{W_1(p)}{1 - W_1(p)W_2(p)K_3(p)} = \frac{Q_{зам.1}(p)}{P_{зам.1}(p)},$$

$$W_{зам.2}(p) = \frac{\bar{y}_2(p)}{\bar{y}_0(p)} = \frac{W_1(p)W_2(p)}{1 - W_1(p)W_2(p)W_3(p)} = \frac{Q_{зам.2}(p)}{P_{зам.2}(p)}.$$

При $W_i(p) = \dfrac{Q_i(p)}{P_i(p)}$ $(i = 1,2,3)$ получим

$$P_{зам.1}(p) = P_{зам.2}(p) = P_1(p)P_2(p)P_3(p) -$$
$$-Q_1(p)Q_2(p)Q_3(p),$$
$$Q_{зам.1}(p) = Q_1(p)P_2(p)P_3(p), \quad Q_{зам.2}(p) =$$
$$= Q_1(p)Q_2(p)P_3(p).$$

Таким образом, характеристическое уравнение остается неизменным, с какого звена замкнутой системы ни брать выходную величину. Такое положение справедливо при любом числе звеньев.

Знаменатель передаточной функции остается тем же самым и в том случае, если входной сигнал перенести на вход любого из звеньев замкнутой системы, в чем нетрудно убедиться, рассмотрев схему рис. 4*б*.

а) б)

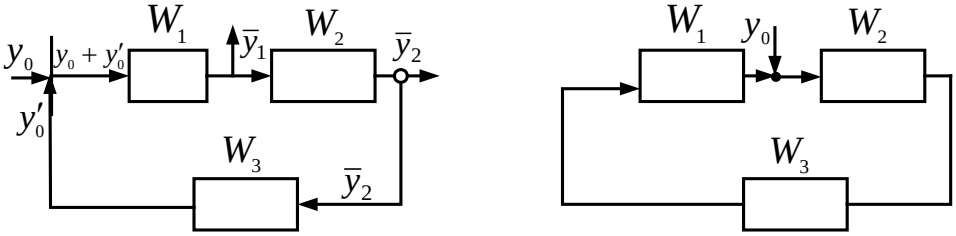


Рис. 4. Принципиальная схема системы с обратной связью

Если передаточная функция разомкнутой системы имеет вид $W(p)=\frac{Q(p)}{P(p)}$, то передаточная функция той же системы, замкнутой через инвертор, дается выражением

$$W_{зам}(p)=\frac{W(p)}{1+W(p)}=\frac{Q(p)}{Q(p)+P(p)}. \qquad (29)$$

Характеристическое уравнение замкнутой системы можно найти, приравняв нулю знаменатель этого выражения:

$$Q(p)+P(p)=0. \qquad (30)$$

Это уравнение отличается от уравнения $P(p)=0$ для разомкнутой системы. Отсюда следует, что процессы в замкнутой системе могут протекать иначе, чем в разомкнутой.

Отметим одно формальное обстоятельство, которое, однако, приводит к существенному практическому выводу. Пусть имеется система, уравнение движения которой в изображениях имеет вид

$$\bar{y}(p)=W(p)\bar{y}_0(p). \qquad (31)$$

Очевидно, равенство не нарушится прибавлением к его левой и правой частям одного и того же выражения, например

$$\bar{y}(p)+W_r(p)W(p)\bar{y}(p)=$$
$$=W(p)\bar{y}_0(p)+W_r(p)W(p)\bar{y}(p),$$

где $W_r(p)$ – некоторая функция p. Тогда

$$\bar{y}(p)=W'(p)\left[\bar{y}_0(p)+\bar{y}_0'(p)\right], \qquad (32)$$

где

$$W'(p)=\frac{W(p)}{1+W_r(p)W(p)},$$
$$\bar{y}_0'(p)=W_r(p)\bar{y}(p). \qquad (33)$$

Отсюда следует, что любое звено может быть представлено в виде некоторого другого звена, охваченного соответствующей обратной связью. Возможность такого представления, причем в большой степени произвольного, используется при построении структурных схем математических моделей.

VII. Элементарные звенья структурных схем. Сопоставление подходов в представлении уравнений движения линейных систем позволяет заключить, что любой системе можно сопоставить эквивалентную в динамическом отношении систему, состоящую из простейших звеньев, соединенных определенным образом, обладающих некоторыми стандартными динамическими свойствами. Подобное простейшее звено естественно называть элементарным.

В основе структурного подхода в теории управления и связи лежат следующие положения:

1) любую линейную систему можно представить в виде соединенных друг с другом элементарных линейных звеньев;

2) каждое элементарное звено является направленным;

3) имеется небольшое число различных типов элементарных звеньев, образующих полную систему (т. е. достаточную для оставления структурной схемы любой системы данного класса);

4) используемой основой классификации элементарных звеньев являются их динамические свойства, то есть характер математической зависимости выходной величины от входной.

В теории автоматического управления понятия замкнутых и разомкнутых систем важны и определяют возможности специальных методов определения динамических свойств различных систем [20]. Отметим, что для выходных сигналов как разомкнутой, так и замкнутой систем с нулевыми начальными условиями, уравнение движения в изображениях имеет вид в соответствии с (18).

Левая часть этого уравнения представляет собой известный полином $D(p)$, умноженный на искомое изображение выходного сигнала, а правая часть – известный полином $D_0(p)$, умноженный на известную функцию $y_0(p)$, являющуюся изображением входного сигнала.

Очевидно, уравнение останется без изменения, если истинная система будет заменена некоторой специальной разомкнутой системой, имеющей то же самое характеристическое уравнение. Изображение входного сигнала $y_u(t)$ этой системы имеет вид $\bar{y}_u(p)=D_0(p)\bar{y}_0(p)$. Тогда переда-

точная функция нашей специальной системы примет вид

$$W_u(p) = \frac{\bar{y}(p)}{\bar{y}_u(p)} = \frac{1}{D(p)}. \quad (34)$$

Если система в начальном состоянии не находится в покое, то в правой части уравнения (18) появится дополнительный известный многочлен от p, коэффициенты которого содержат заданные начальные значения. В этом случае всю правую часть следует принять за изображение условного входного сигнала той же искусственной системы с передаточной функцией (34).

Таким образом, вопрос динамического соответствия друг другу искусственной и заданной систем будет решен, если обе системы будут обладать передаточной функцией (34).

Как известно, полином $D(p)$ n-й степени может быть представлен в виде

$$D(p) = a_0(p - p_1)(p - p_2)...(p - p_n), \quad (35)$$

где a_0 – коэффициент при p^n и $p_1, p_2, ..., p_n$ – корни характеристического уравнения

$$D(p) = 0. \quad (36)$$

В зависимости от свойств корней характеристического уравнения (36) отдельные множители в (35) могут иметь различный вид. При наличии нулевого корня встретится множитель p; при наличии вещественных корней проявляются множители вида $p - a$; для комплексно-сопряженных корней характерны множители вида $(p-b)^2 + \omega^2$ (сопряженные корни обозначены $p_{12} = b \pm j\omega$).

В общем случае величина a может иметь и отрицательное, и положительное значение; величина b – и отрицательное, и положительное, и нулевое значения. Если тот или иной корень кратный, то соответствующего вида множитель будет входить в (35) в степени, равной порядку кратности корня [30, 33]. Таким образом, передаточная функция искусственной системы представляет собой произведение, сомножители которого имеют знаменателем любой из перечисленных выше множителей, а числителем – любую постоянную величину.

Как было принято для рассматриваемого класса систем, передаточная функция последовательно соединенных звеньев равна произведению передаточных функций отдельных звеньев. Следовательно, линейная система с любым характеристическим уравнением в виде полинома может быть представлена как система, состоящая из последовательно соединенных звеньев с передаточными функциями всего трех видов

$$\frac{1}{p}, \frac{1}{p-a}, \frac{1}{(p-b)^2 + \omega^2}. \quad (37)$$

Если звенья с указанными передаточными функциями (37) физически осуществимы, то возможно построение реальных моделей любых линейных систем рассматриваемого класса. Подобные модели можно назвать математическими, так как они, вообще говоря, могут и не отражать сущности физических процессов, происходящих в моделируемой системе. С другой стороны, такая модель может быть построена для экспериментального решения дифференциального уравнения. Для полного моделирования исходного уравнения движения системы (18), очевидно, необходимо ввести в структурную схему звено, отображающее правую часть уравнения

$$\bar{y}_0'(p) = D_0(p)\bar{y}_0(p).$$

Для реальных систем рассматриваемого класса выражение $D_0(p)\bar{y}_0(p)$ соответствует изображению суммы производных различных порядков (включая и нулевой) входного сигнала, поэтому возникает необходимость введения звеньев, осуществляющих умножение на постоянный множитель, дифференцирование и суммирование, характерных для мехатроники.

Детальное рассмотрение перечисленных видов звеньев, которые принято называть элементарными, связано с учетом их характерных динамических свойств. Для этого определяются переходные функции каждого звена, т. е. изучаются движения звеньев в стандартных условиях: входной сигнал является единичной функцией $1(t)$ при нулевых начальных условиях.

В таком ракурсе элементарные звенья рассмотрены, к примеру, в работах [18, 20], что характерно, в целом, для структурных методов в теории автоматического управления, а также для теории связи [10, 18]. Использование передаточных функций для оценки динамических свойств замкнутых систем предполагает анализ не только характеристического $P(p)$ частотного уравнения (знаменатель передаточной функции), но и частотного уравнения $Q(p)$ числителя передаточной функции, что приводит к расширению состава элементарных звеньев в теории автоматического управления [20]. В своей развитой форме кроме усилительных, интегрирующих звеньев, апериодических и колебательных звеньев рассматриваются дифференцирующие (форсирующие) звенья первого и второго порядков, запаздывающие звенья, а также элементы и устройства систем автоматического управления, представляющие собой

результат сборки более сложных устройств с использованием правил соединения элементов. Построенная структурная схема (или структурная модель) является графическим аналогом системы дифференциальных уравнений движения исходной системы, которая в соответствии с задачами исследования и оценки свойств может подвергаться преобразованиям, допускающим переносы связей и эквивалентные замены элементов [20]. При выходе на непланарные системы в ряде случаев возможны эквивалентные преобразования, однако, в большей степени они характерны для технологий преобразования в рамках теории цепей, в частности, электрических и механических [25,26]. Отметим, что преобразования структурных схем чаще всего применяются, если иметь в виду развитые формы, в динамических системах 1-го и 2-го видов, в которых не акцентируется внимание на размерности и физической природе сигналов в соответствии со свойствами (или передаточными функциями элементарного звена). Однако если выбор элементарных звеньев построен на соблюдении определенных требований (например, для входов всех звеньев сигнал является смещением, а для выходов – силой), то при формировании соединений элементов в более сложные блоки (агрегаты) последующие преобразования на уровне общей схемы, могут иметь существенные отличия. Собственно в этом и состоит специфика структурных интерпретаций в теории цепей, что предполагается рассмотреть во 2-й части статьи, которая содержит результаты исследований о возможностях интеграций аппарата теории автоматического управления и теории цепей в мехатронике виброзащитных систем.

Заключение

Динамические свойства различных технических объектов, если иметь в виду возможности линейных моделей, чаще всего оцениваются на основе рассмотрения реакций на некоторые типовые или стандартные сигналы или внешние воздействия. Наиболее развитыми и применяемыми в инженерной практике являются подходы, основанные на операционных методах (преобразования Лапласа, Карсона, Фурье и др.), позволяющих оценочные процедуры соотносить с переходными и передаточными функциями. Линейные операторы, лежащие в основе подходов, допускают структурные интерпретации, связанные с учетом особенностей построения динамических систем, в том числе особенности физической природы, возможности физической реализации и другие. Структурные интерпретации линейных операторов многовариантны и отражают специфические свойства реальных связей, а сами структурные формы представления связей системы и возможностей построения структур носят относительный характер. Последнее связано с тем, что динамические системы определенной физической природы могут подчиняться в своих локальных связях и проявлениях определенным физическим законам, такими, например, как законы Кирхгофа для электрических цепей и законы Ньютона для механических систем, состоящих из пассивных элементов (без дополнительных источников энергии).

Развитие мехатронных подходов в задачах динамического синтеза сложных технических систем, например, робототехнических, требует учета особенностей структурных представлений линейных операторов, допускающих совместимость взаимодействия систем и элементов различной природы (продолжение в № 1–2013).

Исследования выполнены по гранту в рамках федеральной целевой программы «Научные и педагогические кадры инновационной России» на 2012–2013 г.г. (XLVII. Мероприятие 1.3.2 – естественные науки) № 14.132.21.1362.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Артоболевский И. И. Теория механизмов и машин. М. : Наука, 1975. 638 с.
2. Фролов К. В., Попов С. А. Теория механизмов и машин. М. : Высш. шк., 1987. 465 с.
3. Левитский Н. И. Колебания в механизмах. М. : Наука, 1988. 358 с.
4. Кинематика, динамика и точность механизмов : справочник / Крейнин Г. В. и др. М. : Машиностроение. 1984., 216 с.
5. Елисеев С. В., Хоменко А. П., Засядко А. А. От динамики управляемых систем к мехатронике // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2008. № 2(18). С. 10–14.
6. Вукобратович М. Управление манипуляционными роботами : пер. с сербскохорватск. М. : Наука, 1985. 384 с.
7. Onwuboly G. C. Mechatronics. Principles and Applications // Elsivier Butter Worth Heinemann. Linacre House. Jordan Hill, Oxford. Birlington. Uk. 2005. 644 p.
8. Подураев Ю. В. Основы мехатроники. М. : МГТУ «СТАНКИН», 2000. 80 с.

9. Елисеев С. В., Свинин М. М. Математическое и программное обеспечение в исследованиях манипуляционных систем. Новосибирск : Наука. 1992. 296 с.
10. Теоретические основы связи и управления / А.А. Фельдбаум и др. М. : Физматгиз. 1962. 934 с.
11. Емельянов С. П., Коровин В. К. Новая теория обратной связи. М. : Наука. 1999. 472 с.
12. 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 ИГУ. 2008. 523 с.
13. Елисеев С. В., Резник Ю. Н., Хоменко А. П. Мехатронные подходы в динамике механических колебательных систем. Новосибирск : Наука. 2011. 394 с.
14. Бакалов В. П., Дмитриков В. Ф., Крук Б. И. Основы теории цепей. М. : Радио и связь. 1998. 460 с.
15. Коловский М. З. Автоматическое управление виброзащитными системами. М. : Наука, 1976. 320 с.
16. Черноусько Ф. Л., Болотник Н. Н., Градецкий В. Г. Манипуляционные роботы: динамика, управление, оптимизация. М. : Наука, 1989. 368 с.
17. Фролов К. В., Фурман Ф. А. Прикладная теория виброзащитных систем. М. : Машиностроение. 1985. 286 с.
18. Фельдбаум А. А. Основы теории оптимальных автоматических систем. М. : Наука, 1966. 623 с.
19. Вейц В. Л., Царев Г. В. Динамика и моделирование электромеханических приводов. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 1992. 226 с.
20. Ким Д. П. Теория автоматического управления. Т. 1. Линейные системы. М. : Физматлит, 2003. 288 с.
21. Блехман И. И. Вибрационная механика. М.: Наука, 1994. 394 с.
22. Стокер Дж. Нелинейные колебания в механических и электрических системах. М. : Изд-во иностр. лит-ры, 1952. 264 с.
23. Мельников Г. И. Динамика линейных механических и электромеханических систем. Л. : Машиностроение, 1976. 200 с.
24. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. М. : Советское радио, 1981. 671 с.
25. Атабеков Г. И. Основы теории цепей. СПб. : Лань. 2006. 402 с.
26. Дружинский И. А. Механические цепи. Л. : Машиностроение, 1977. 247 с.
27. Иващенко И. И. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем. М. : Машиностроение, 1993. 632 с.
28. Тетельбаум И. М., Шнейдер Ю. Р. Практика аналогового моделирования динамических систем. М. : Энергоатомиздат, 1987. 384 с.
29. Цзе Ф. С., Морзе И. Е., Хинкл Р. Т. Механические колебания : пер. с англ. М. : Машиностроение, 1976. 508 с.
30. Лурье А. И. Операционное исчисление и его приложения к задачам механики. М. : ГИТТЛ. 1951. 432 с.
31. Гарднер М. Ф., Бэрнс Дж. Л. Переходные процессы в линейных системах с сосредоточенными постоянными. М. : ГИТТЛ, 1949. 530 с.
32. Хэммонд П. Х. Теория обратной связи и ее применения. М. : Изд-во иностр. лит-ра, 1960. 316 с.

УДК 510:517.9:519.2

Чье Ен Ун,
д. т. н, зав. кафедрой автоматики и системотехники ТОГУ,
тел.: (4212)375-191
Шеин Александр Борисович,
к. т. н, доцент кафедры промышленной электроники Чувашского ГУ,
тел.: (83540)22-344

МЕТОД РЕШЕНИЯ СИСТЕМ ЛИНЕЙНЫХ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ ЗАДАЧ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

En Un Chye, A.B. Shein

METHOD OF THE SOLUTION OF SYSTEMS OF THE LINEAR ALGEBRAIC EQUATIONS FOR TASKS OF DESIGN OF ELECTRONIC DEVICES

Аннотация. *Предлагается метод решения систем линейных алгебраических уравнений, который отличается от известных методов тем, что его вычислительная схема позволяет находить все возможные решения системы, напрямую связанные с размерностью системы.*

Ключевые слова: *проектирование электронных устройств, решение систем линейных алгебраических уравнений, вычислительная схема.*

Abstract. *The method of the solution of systems of the linear algebraic equations which differs from known methods by its computing scheme which allows to find all possible solutions of system directly connected with dimension of system is offered.*

Keywords: *design of electronic devices, decision of systems of the linear algebraic equations, computing scheme.*

Введение

Методы решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) находят широкое применение при решении различных научно-технических задач. К ним относятся методы схемотехнического моделирования электронных устройств, так как многие из них, например, расчет нелинейных схем в статическом и переходном режимах работы, параметрический синтез схем и некоторые другие, сводятся к решению систем алгебраических уравнений [1–3].

Поэтому так актуально развивающееся в последние годы направление схемотехнического моделирования, связанное со снижением вычислительных затрат путем разработки специальных методов решения систем уравнений, учитывающих структуру схемы [1].

В задачах схемотехнического моделирования требуется решение СЛАУ вида:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \ldots + a_{1n}x_n = b_1;$$
$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + \ldots + a_{2n}x_n = b_2;$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + a_{n3}x_3 + \ldots + a_{nn}x_n = b_n,$$

где a_{ik} – коэффициенты, b_i – свободные члены системы, x_i – неизвестные, подлежащие определению. Решение этой линейной системы является одной из основных задач линейной алгебры.

I. Постановка задачи

Известно, что методы решения СЛАУ делятся на две группы: точные (без учета ошибок округления) или прямые, когда решение получается за конечное, известное заранее число операций, и итерационные, когда решение получается как предел последовательных приближений [4–7].

Алгоритмически более надежными являются методы первой группы. В них не возникает проблемы сходимости, но область применения некоторых из них ограничена. Из точных методов решения СЛАУ наиболее распространен метод Гаусса, заключающийся в последовательном исключении неизвестных и приведении исходной системы уравнений к системе уравнений с верхней треугольной матрицей [4–7]. Метод получил название схемы единственного деления.

Большинство других точных методов является модификацией схемы единственного деления Гаусса, отличаясь либо порядком исключения неизвестных, либо способом получения коэффициентов треугольной матрицы. Например, метод оптимального исключения можно рассматривать как видоизменение метода Гаусса, который требует

при реализации меньше элементов памяти ЭВМ, так как на каждом шаге преобразуется не вся система, как в методе Гаусса, а только часть ее уравнений. Если использовать только оперативную память ЭВМ, то методом оптимального исключения можно решать системы с числом неизвестных приблизительно в два раза большим, чем по методу Гаусса. Кроме того, так как на каждом шаге исключается та неизвестная, коэффициент при которой имеет наибольшее значение, то это повышает точность вычислений, особенно в плохо обусловленных (с большим разбросом собственных значений) системах уравнений. Метод оптимального исключения близок к методу Гаусса и отличается существенно лишь тем, что обратный ход метода Гаусса здесь видоизменен и соединен с прямым ходом [8].

В некоторых программах схемотехнического моделирования используется компактная схема Гаусса, называемая также методом *LU*-разложения или методом треугольных сомножителей [9]. В основе метода лежит представление матрицы системы в виде произведения нижней *L* и верхней *U* треугольных матриц. Тогда вместо решения СЛАУ методом полной обратной матрицы решение системы можно получить в два этапа. На первом этапе с помощью нижней матрицы *L*, содержащей единичную диагональ, получают систему с верхней треугольной матрицей *U*, а на втором этапе с помощью матрицы *U* получают решение системы как при обратном ходе в схеме единственного деления. При этом процесс получения матриц *L* и *U* эквивалентен прямому ходу в схеме Гаусса и представляет собой последовательность шагов, каждый из которых соответствует исключению очередного неизвестного в схеме Гаусса.

Перечисленные методы имеют достоинства и недостатки, подробно изложенные, например, в работах [1, 2, 4–9]. Но их общий недостаток заключается в том, что, как правило, методы дают единственное решение СЛАУ, так как основаны на схеме единственного деления, в то время как система может иметь множество решений. Задача теории систем линейных уравнений состоит в разработке методов, позволяющих узнать, совместна ли данная система уравнений или нет, в случае совместности установить число решений, а также указать способ найти все эти решения [10].

Предлагается метод решения систем линейных алгебраических уравнений, который отличается от известных методов тем, что его вычислительная схема позволяет находить все возможные решения системы, напрямую связанные с размерностью системы [11].

III. Схема метода

Поясним схему метода на примере решения системы четырех уравнений с четырьмя неизвестными

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + a_{14}x_4 = b_1, \quad (1)$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + a_{24}x_4 = b_2, \quad (2)$$

$$a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 + a_{34}x_4 = b_3, \quad (3)$$

$$a_{41}x_1 + a_{42}x_2 + a_{43}x_3 + a_{44}x_4 = b_4. \quad (4)$$

Первый проход: умножаем уравнение (1) на коэффициент a_{21}, а уравнение (2) на коэффициент a_{11} и вычитаем вновь полученное уравнение (2) из вновь полученного уравнения (1) (если изменить порядок следования уравнений и вычитать вновь полученное уравнение (1) из вновь полученного уравнения (2), то результат останется прежним); затем умножаем уравнение (1) на коэффициент a_{31}, а уравнение (3) на коэффициент a_{11} и вычитаем вновь полученное уравнение (3) из вновь полученного уравнения (1); наконец, умножаем уравнение (1) на коэффициент a_{41}, а уравнение (4) на коэффициент a_{11} и вычитаем вновь полученное уравнение (4) из вновь полученного уравнения (1).

В результате приходим к системе уравнений

$$a_{22}^{(1)}x_2 + a_{23}^{(1)}x_3 + a_{24}^{(1)}x_4 = b_2^{(1)}; \quad (5)$$

$$a_{32}^{(1)}x_2 + a_{33}^{(1)}x_3 + a_{34}^{(1)}x_4 = b_3^{(1)}; \quad (6)$$

$$a_{42}^{(1)}x_2 + a_{43}^{(1)}x_3 + a_{44}^{(1)}x_4 = b_4^{(1)}, \quad (7)$$

где верхние индексы в скобках обозначают номер прохода и одновременно количество преобразований соответствующего коэффициента,

$$a_{22}^{(1)} = a_{12}a_{21} - a_{11}a_{22};\ a_{23}^{(1)} = a_{13}a_{21} - a_{11}a_{23};$$

$$a_{24}^{(1)} = a_{14}a_{21} - a_{11}a_{24};\ a_{32}^{(1)} = a_{12}a_{31} - a_{11}a_{32};$$

$$a_{33}^{(1)} = a_{13}a_{31} - a_{11}a_{33};\ a_{34}^{(1)} = a_{14}a_{31} - a_{11}a_{34};$$

$$a_{42}^{(1)} = a_{12}a_{41} - a_{11}a_{42};\ a_{43}^{(1)} = a_{13}a_{41} - a_{11}a_{43};$$

$$a_{44}^{(1)} = a_{14}a_{41} - a_{11}a_{44};\ b_2^{(1)} = a_{21}b_1 - a_{11}b_2;$$

$$b_3^{(1)} = a_{31}b_1 - a_{11}b_3;\ b_4^{(1)} = a_{41}b_1 - a_{11}b_4.$$

Второй проход: поступаем с уравнениями (5), (6) и (7) точно так же, как и с уравнениями (1), (2), (3) и (4).

В результате второго прохода имеем систему уравнений:

$$a_{33}^{(2)}x_3 + a_{34}^{(2)}x_4 = b_3^{(2)}; \quad (8)$$

$$a_{43}^{(2)}x_3 + a_{44}^{(2)}x_4 = b_4^{(2)}, \quad (9)$$

где

$$a_{33}^{(2)} = a_{23}^{(1)}a_{32}^{(1)} - a_{22}^{(1)}a_{33}^{(1)};\ a_{34}^{(2)} = a_{24}^{(1)}a_{32}^{(1)} - a_{22}^{(1)}a_{34}^{(1)};$$

$$a_{43}^{(2)} = a_{23}^{(1)}a_{42}^{(1)} - a_{22}^{(1)}a_{43}^{(1)};\quad a_{44}^{(2)} = a_{24}^{(1)}a_{42}^{(1)} - a_{22}^{(1)}a_{44}^{(1)};$$

$$b_3^{(2)} = a_{32}^{(1)}b_2^{(1)} - a_{22}^{(1)}b_3^{(1)};\ b_4^{(2)} = a_{42}^{(1)}b_2^{(1)} - a_{22}^{(1)}b_4^{(1)}.$$

Третий проход: преобразуем уравнения (8) и (9) так же, как и уравнения (5), (6) и (7).

В результате третьего прохода получаем уравнение:

$$a_{44}^{(3)} x_4 = b_4^{(3)}, \qquad (10)$$

где

$$a_{44}^{(3)} = a_{34}^{(2)} a_{43}^{(2)} - a_{33}^{(2)} a_{44}^{(2)};\ b_4^{(3)} = a_{43}^{(2)} b_3^{(2)} - a_{33}^{(2)} b_4^{(2)}.$$

Делим уравнение (10) на коэффициент $a_{44}^{(3)}$. В результате находим:

$$x_4 = \frac{b_4^{(3)}}{a_{44}^{(3)}}. \qquad (11)$$

Подставляя значение x_4 в уравнения (8) и (9), находим значения x_3:

$$x_{3(1)} = \frac{1}{a_{33}^{(2)}}\left(b_3^{(2)} - a_{34}^{(2)} x_4\right); \qquad (12)$$

$$x_{3(2)} = \frac{1}{a_{43}^{(2)}}\left(b_4^{(2)} - a_{44}^{(2)} x_4\right). \qquad (13)$$

Подстановка значений x_4 и $x_{3(1)}$, определенных равенствами (11) и (12), а затем x_4 и $x_{3(2)}$, определенных равенствами (11) и (13), в уравнения (5), (6) и (7) дает все шесть значений x_2:

$$x_{2(1)} = \frac{1}{a_{22}^{(1)}}\left(b_2^{(1)} - a_{23}^{(1)} x_{3(1)} - a_{24}^{(1)} x_4\right);$$

$$x_{2(2)} = \frac{1}{a_{32}^{(1)}}\left(b_3^{(1)} - a_{33}^{(1)} x_{3(1)} - a_{34}^{(1)} x_4\right);$$

$$x_{2(3)} = \frac{1}{a_{42}^{(1)}}\left(b_4^{(1)} - a_{43}^{(1)} x_{3(1)} - a_{44}^{(1)} x_4\right);$$

$$x_{2(4)} = \frac{1}{a_{22}^{(1)}}\left(b_2^{(1)} - a_{23}^{(1)} x_{3(2)} - a_{24}^{(1)} x_4\right);$$

$$x_{2(5)} = \frac{1}{a_{32}^{(1)}}\left(b_3^{(1)} - a_{33}^{(1)} x_{3(2)} - a_{34}^{(1)} x_4\right);$$

$$x_{2(6)} = \frac{1}{a_{42}^{(1)}}\left(b_4^{(1)} - a_{43}^{(1)} x_{3(2)} - a_{44}^{(1)} x_4\right).$$

Так как неизвестные x_4, x_3 и x_2 определены, то подстановка их в уравнения (1), (2), (3) и (4) позволяет найти все $4 \cdot 2 \cdot 6 = 48$ значений x_1:

$$x_{1(1)} = \frac{1}{a_{11}}\left(b_1 - a_{12} x_{2(1)} - a_{13} x_{3(1)} - a_{14} x_4\right);$$

$$x_{1(2)} = \frac{1}{a_{21}}\left(b_2 - a_{22} x_{2(1)} - a_{23} x_{3(1)} - a_{24} x_4\right);$$

$$x_{1(3)} = \frac{1}{a_{31}}\left(b_3 - a_{32} x_{2(1)} - a_{33} x_{3(1)} - a_{34} x_4\right);$$

$$x_{1(4)} = \frac{1}{a_{41}}\left(b_4 - a_{42} x_{2(1)} - a_{43} x_{3(1)} - a_{44} x_4\right);$$

$$x_{1(5)} = \frac{1}{a_{11}}\left(b_1 - a_{12} x_{2(1)} - a_{13} x_{3(2)} - a_{14} x_4\right);$$

$$x_{1(6)} = \frac{1}{a_{21}}\left(b_2 - a_{22} x_{2(1)} - a_{23} x_{3(2)} - a_{24} x_4\right);$$

$$x_{1(7)} = \frac{1}{a_{31}}\left(b_3 - a_{32} x_{2(1)} - a_{33} x_{3(2)} - a_{34} x_4\right);$$

$$x_{1(8)} = \frac{1}{a_{41}}\left(b_4 - a_{42} x_{2(1)} - a_{43} x_{3(2)} - a_{44} x_4\right);$$

$$x_{1(9)} = \frac{1}{a_{11}}\left(b_1 - a_{12} x_{2(2)} - a_{13} x_{3(1)} - a_{14} x_4\right);$$

$$x_{1(10)} = \frac{1}{a_{21}}\left(b_2 - a_{22} x_{2(2)} - a_{23} x_{3(1)} - a_{24} x_4\right);$$

$$x_{1(11)} = \frac{1}{a_{31}}\left(b_3 - a_{32} x_{2(2)} - a_{33} x_{3(1)} - a_{34} x_4\right);$$

$$x_{1(12)} = \frac{1}{a_{41}}\left(b_4 - a_{42} x_{2(2)} - a_{43} x_{3(1)} - a_{44} x_4\right);$$

$$x_{1(13)} = \frac{1}{a_{11}}\left(b_1 - a_{12} x_{2(2)} - a_{13} x_{3(2)} - a_{14} x_4\right);$$

$$x_{1(14)} = \frac{1}{a_{21}}\left(b_2 - a_{22} x_{2(2)} - a_{23} x_{3(2)} - a_{24} x_4\right);$$

$$x_{1(15)} = \frac{1}{a_{31}}\left(b_3 - a_{32} x_{2(2)} - a_{33} x_{3(2)} - a_{34} x_4\right);$$

$$x_{1(16)} = \frac{1}{a_{41}}\left(b_4 - a_{42} x_{2(2)} - a_{43} x_{3(2)} - a_{44} x_4\right);$$

$$x_{1(17)} = \frac{1}{a_{11}}\left(b_1 - a_{12} x_{2(3)} - a_{13} x_{3(1)} - a_{14} x_4\right);$$

$$x_{1(18)} = \frac{1}{a_{21}}\left(b_2 - a_{22} x_{2(3)} - a_{23} x_{3(1)} - a_{24} x_4\right);$$

$$x_{1(19)} = \frac{1}{a_{31}}\left(b_3 - a_{32} x_{2(3)} - a_{33} x_{3(1)} - a_{34} x_4\right);$$

$$x_{1(20)} = \frac{1}{a_{41}}\left(b_4 - a_{42} x_{2(3)} - a_{43} x_{3(1)} - a_{44} x_4\right);$$

$$x_{1(21)} = \frac{1}{a_{11}}\left(b_1 - a_{12} x_{2(3)} - a_{13} x_{3(2)} - a_{14} x_4\right);$$

$$x_{1(22)} = \frac{1}{a_{21}}\left(b_2 - a_{22} x_{2(3)} - a_{23} x_{3(2)} - a_{24} x_4\right);$$

$$x_{1(23)} = \frac{1}{a_{31}}\left(b_3 - a_{32} x_{2(3)} - a_{33} x_{3(2)} - a_{34} x_4\right);$$

$$x_{1(24)} = \frac{1}{a_{41}}\left(b_4 - a_{42} x_{2(3)} - a_{43} x_{3(2)} - a_{44} x_4\right);$$

$$x_{1(25)} = \frac{1}{a_{11}}\left(b_1 - a_{12} x_{2(4)} - a_{13} x_{3(1)} - a_{14} x_4\right);$$

$$x_{1(26)} = \frac{1}{a_{21}}\left(b_2 - a_{22}x_{2(4)} - a_{23}x_{3(1)} - a_{24}x_4\right);$$

$$x_{1(27)} = \frac{1}{a_{31}}\left(b_3 - a_{32}x_{2(4)} - a_{33}x_{3(1)} - a_{34}x_4\right);$$

$$x_{1(28)} = \frac{1}{a_{41}}\left(b_4 - a_{42}x_{2(4)} - a_{43}x_{3(1)} - a_{44}x_4\right);$$

$$x_{1(29)} = \frac{1}{a_{11}}\left(b_1 - a_{12}x_{2(4)} - a_{13}x_{3(2)} - a_{14}x_4\right);$$

$$x_{1(30)} = \frac{1}{a_{21}}\left(b_2 - a_{22}x_{2(4)} - a_{23}x_{3(2)} - a_{24}x_4\right);$$

$$x_{1(31)} = \frac{1}{a_{31}}\left(b_3 - a_{32}x_{2(4)} - a_{33}x_{3(2)} - a_{34}x_4\right);$$

$$x_{1(32)} = \frac{1}{a_{41}}\left(b_4 - a_{42}x_{2(4)} - a_{43}x_{3(2)} - a_{44}x_4\right);$$

$$x_{1(33)} = \frac{1}{a_{11}}\left(b_1 - a_{12}x_{2(5)} - a_{13}x_{3(1)} - a_{14}x_4\right);$$

$$x_{1(34)} = \frac{1}{a_{21}}\left(b_2 - a_{22}x_{2(5)} - a_{23}x_{3(1)} - a_{24}x_4\right);$$

$$x_{1(35)} = \frac{1}{a_{31}}\left(b_3 - a_{32}x_{2(5)} - a_{33}x_{3(1)} - a_{34}x_4\right);$$

$$x_{1(36)} = \frac{1}{a_{41}}\left(b_4 - a_{42}x_{2(5)} - a_{43}x_{3(1)} - a_{44}x_4\right);$$

$$x_{1(37)} = \frac{1}{a_{11}}\left(b_1 - a_{12}x_{2(5)} - a_{13}x_{3(2)} - a_{14}x_4\right);$$

$$x_{1(38)} = \frac{1}{a_{21}}\left(b_2 - a_{22}x_{2(5)} - a_{23}x_{3(2)} - a_{24}x_4\right);$$

$$x_{1(39)} = \frac{1}{a_{31}}\left(b_3 - a_{32}x_{2(5)} - a_{33}x_{3(2)} - a_{34}x_4\right);$$

$$x_{1(40)} = \frac{1}{a_{41}}\left(b_4 - a_{42}x_{2(5)} - a_{43}x_{3(2)} - a_{44}x_4\right);$$

$$x_{1(41)} = \frac{1}{a_{11}}\left(b_1 - a_{12}x_{2(6)} - a_{13}x_{3(1)} - a_{14}x_4\right);$$

$$x_{1(42)} = \frac{1}{a_{21}}\left(b_2 - a_{22}x_{2(6)} - a_{23}x_{3(1)} - a_{24}x_4\right);$$

$$x_{1(43)} = \frac{1}{a_{31}}\left(b_3 - a_{32}x_{2(6)} - a_{33}x_{3(1)} - a_{34}x_4\right);$$

$$x_{1(44)} = \frac{1}{a_{41}}\left(b_4 - a_{42}x_{2(6)} - a_{43}x_{3(1)} - a_{44}x_4\right);$$

$$x_{1(45)} = \frac{1}{a_{11}}\left(b_1 - a_{12}x_{2(6)} - a_{13}x_{3(2)} - a_{14}x_4\right);$$

$$x_{1(46)} = \frac{1}{a_{21}}\left(b_2 - a_{22}x_{2(6)} - a_{23}x_{3(2)} - a_{24}x_4\right);$$

$$x_{1(47)} = \frac{1}{a_{31}}\left(b_3 - a_{32}x_{2(6)} - a_{33}x_{3(2)} - a_{34}x_4\right);$$

$$x_{1(48)} = \frac{1}{a_{41}}\left(b_4 - a_{42}x_{2(6)} - a_{43}x_{3(2)} - a_{44}x_4\right).$$

Рассмотрим примеры реализации метода.

Пример 1. Требуется решить систему четырех уравнений с коэффициентами

$$a_{11} = 2;\ a_{12} = 1;\ a_{13} = -5;\ a_{14} = 1;\ b_1 = 8$$
$$a_{21} = 1;\ a_{22} = -3;\ a_{23} = 0;\ a_{24} = -6;\ b_2 = 9;$$
$$a_{31} = 0;\ a_{32} = 2;\ a_{33} = -1;\ a_{34} = 2;\ b_3 = -5;$$
$$a_{41} = 1;\ a_{42} = 4;\ a_{43} = -7;\ a_{44} = 6;\ b_4 = 0.$$

Определитель системы отличен от нуля: $d = 27$, поэтому к системе применимо правило Крамера. Значения неизвестных будут иметь числителями определители $d_1 = 81$, $d_2 = -108$, $d_3 = -27$, $d_4 = 27$. Таким образом, $x_1 = 3$, $x_2 = -4$, $x_3 = -1$, $x_4 = 1$ будут решением этой системы и притом единственным.

Согласно предложенному методу, последовательно находим:

1) $a_{22}^{(1)} = 7;\ a_{23}^{(1)} = -5;\ a_{24}^{(1)} = 13;\ a_{32}^{(1)} = -4;$
$a_{33}^{(1)} = 2;\ a_{34}^{(1)} = -4;\ a_{42}^{(1)} = -7;\ a_{43}^{(1)} = 9;\ a_{44}^{(1)} = -11;$
$b_2^{(1)} = -10;\ b_3^{(1)} = 10;\ b_4^{(1)} = 8;$

2) $a_{33}^{(2)} = 6;\ a_{34}^{(2)} = -24;\ a_{43}^{(2)} = -28;$
$a_{44}^{(2)} = -14;\ b_3^{(2)} = -30;\ b_4^{(2)} = 14;$

3) $a_{44}^{(3)} = 756;\ b_4^{(3)} = 756;$

4) $x_4 = 1;$

5) $x_3 = x_{3(1)} = x_{3(2)} = -1;$

6) $x_2 = x_{2(1)} = x_{2(2)} = x_{2(3)} =$
$= x_{2(4)} = x_{2(5)} = x_{2(6}) = -4;$

7) $x_1 = x_{1(1)} = x_{1(2)} = x_{1(3)} =$
$= x_{1(4)} = ... = x_{1(48)} = 3.$

Метод подтверждает единственность решения системы уравнений и при этом показывает неопределенность неизвестного x_1 для некоторых, например третьего, уравнений системы, так как $a_{31} = 0$.

Решение системы уравнений по схеме единственного деления Гаусса дает такой же результат, но при этом количество длинных операций (умножения и деления), необходимых для реализации метода Гаусса, значительно превышает их количе-

ство в предлагаемом методе. Это связано с тем, что прямой ход в предлагаемом методе требует намного меньше операций, чем аналогичный в методе Гаусса. При этом обратный ход сопоставим по количеству операций с методом Гаусса, если используются не все уравнения промежуточных систем, а только какое-либо одно, например первое.

Пример 2. Требуется решить систему четырех уравнений с коэффициентами

$a_{11}=1;\ a_{12}=1;\ a_{13}=-2;\ a_{14}=1;\ b_1=1;$

$a_{21}=1;\ a_{22}=-3;\ a_{23}=1;\ a_{24}=1;\ b_2=0;$

$a_{31}=4;\ a_{32}=-1;\ a_{33}=-1;\ a_{34}=-1;\ b_3=1;$

$a_{41}=4;\ a_{42}=3;\ a_{43}=-4;\ a_{44}=-1;\ b_4=2.$

Последовательно находим:

1) $a_{22}^{(1)}=4;\quad a_{23}^{(1)}=-3;\quad a_{24}^{(1)}=0;\quad a_{32}^{(1)}=5;$ $a_{33}^{(1)}=-7;\ a_{34}^{(1)}=5;\quad a_{42}^{(1)}=1;\quad a_{43}^{(1)}=-4;\ a_{44}^{(1)}=5;$ $b_2^{(1)}=1;\ b_3^{(1)}=3;\quad b_4^{(1)}=2;$

2) $a_{33}^{(2)}=13;\ a_{34}^{(2)}=-20;\ a_{43}^{(2)}=13;\ a_{44}^{(2)}=-20;$ $b_3^{(2)}=-7;\ b_4^{(2)}=-7;$

3) $a_{44}^{(3)}=0;\ b_4^{(3)}=0;$

4) $x_4=\dfrac{0}{0}.$

Для неизвестного x_4 возникает неопределенность вида 0/0. Поэтому неизвестное x_4 становится свободным и может принимать любые значения. При этом количество решений системы уравнений стремится к бесконечности.

Пусть $x_4=1$, тогда имеем:

а) $x_3=x_{3(1)}=x_{3(2)}=1;$

б) $x_2=x_{2(1)}=\ldots=x_{2(6)}=1;$

в) $x_1=x_{1(1)}=\ldots=x_{1(48)}=1.$

Метод показывает, что количество решений может быть бесконечно большое, но при этом каждому значению x_4 ставит в соответствие определенное решение системы с конкретными значениями x_3, x_2 и x_1.

Пример 3. Для системы четырех уравнений заданы коэффициенты

$a_{11}=4;\ a_{12}=1;\ a_{13}=-2;\ a_{14}=1;\ b_1=3;$

$a_{21}=1;\ a_{22}=-2;\ a_{23}=-1;\ a_{24}=2;\ b_2=2;$

$a_{31}=2;\ a_{32}=5;\ a_{33}=0;\ a_{34}=-1;\ b_3=-1;$

$a_{41}=3;\ a_{42}=3;\ a_{43}=-1;\ a_{44}=-3;\ b_4=1.$

Требуется решить систему уравнений с учетом того, что хотя число уравнений равно числу неизвестных, но определитель системы равен нулю и поэтому правило Крамера неприменимо. Ранг матрицы из коэффициентов равен трем – в правом верхнем углу этой матрицы расположен отличный от нуля минор третьего порядка. Ранг расширенной матрицы также равен трем, т. е. система уравнений совместна.

Находим:

1) $a_{22}^{(1)}=9;\quad a_{23}^{(1)}=2;\quad a_{24}^{(1)}=-7;\quad a_{32}^{(1)}=-18;$ $a_{33}^{(1)}=-4;\ a_{34}^{(1)}=6;\ a_{42}^{(1)}=-9;\ a_{43}^{(1)}=-2;$ $a_{44}^{(1)}=15;\ b_2^{(1)}=-5;\ b_3^{(1)}=10;\ b_4^{(1)}=5;$

2) $a_{33}^{(2)}=0;\quad a_{34}^{(2)}=72;\quad a_{43}^{(2)}=0;\quad a_{44}^{(2)}=72;$ $b_3^{(2)}=0;\ b_4^{(2)}=0;$

3) $a_{44}^{(3)}=0;\ b_4^{(3)}=0;$ 4) $x_4=\dfrac{0}{0}.$

Неизвестное x_4 неопределенно, становится свободным и может принимать любые значения. Опуская тривиальное решение $x_4=0$, при котором $x_{3(1)}=0/0$ и $x_{3(2)}=0/0$, принимаем значение $x_4=1$. Тогда имеем: $x_{3(1)}=x_{3(2)}-72/0=\text{число}/0$. Таким образом, неизвестные $x_{3(1)}$ и $x_{3(2)}$ также становятся свободными. Пусть $x_{3(1)}=2;\ x_{3(2)}=3$. Тогда имеем: $x_{2(1)}=-2/9;\quad x_{2(2)}=-2/3;\quad x_{2(3)}=2/3;$ $x_{2(4)}=-4/9;\ x_{2(5)}=-8/9;\ x_{2(6)}=4/9.$

Подставляя значения неизвестных x_4, x_3 и x_2 в уравнения для неизвестного x_1, получим 48 его значений, приведенных в табл. 1.

Таблица 1

m	$x_1(m)$	m	$x_1(m)$	m	$x_1(m)$
1	14/9	17	4/3	33	31/18
2	14/9	18	10/3	34	2/9
3	5/9	19	–5/3	35	20/9
4	20/9	20	4/3	36	26/9
5	37/18	21	11/6	37	20/9
6	23/9	22	13/3	38	11/9
7	5/9	23	–5/3	39	20/9
8	23/9	24	5/3	40	29/9
9	5/3	25	29/18	41	25/18
10	10/3	26	10/9	42	26/9
11	5/3	27	10/9	43	10/9
12	8/3	28	22/9	44	14/9
13	13/6	29	19/9	45	17/9
14	5/3	30	19/9	46	35/9
15	5/3	31	10/9	47	–10/9
16	3	32	25/9	48	17/9

Если значения $x_4 = 1$; $x_{3(1)} = 2$; $x_{3(2)} = 3$; $x_{2(1)} = -2/9$; $x_{2(2)} = -2/3$; $x_{2(3)} = 2/3$; $x_{2(4)} = -4/9$; $x_{2(5)} = -8/9$; $x_{2(6)} = 4/9$ подставить в исходную систему уравнений, то получим те же самые значения неизвестного x_1. Следовательно, метод работает правильно.

Из примеров видно, что предлагаемый метод является достаточно общим. Он позволяет решать СЛАУ для основных случаев, имеющих место в практике: 1) когда система уравнений является совместной и определенной, т. е. обладает одним-единственным решением; 2) когда система уравнений является совместной и неопределенной, если решений больше чем одно. Последний случай возникает, например, при решении задач параметрического синтеза схем электронных устройств. Кроме того, метод относится к группе точных методов, так как не содержит математических операций, приводящих к накоплению ошибки. Он позволяет решать любую систему линейных уравнений без перестановок последних, так как в отличие от известных точных методов не содержит операции деления на опорный (ведущий) коэффициент, который может оказаться нулевым, а основан на операции умножения на смежные коэффициенты уравнений систем. Метод позволяет находить все множество решений, которое система уравнений может иметь, и при этом «показывает», какое из решений имеет место, а какое нет. Если система уравнений является совместной и определенной, то метод дает единственное решение системы, и т. д.

Заключение

Предлагаемый метод прост, удобен в реализации и является весьма перспективным для решения самых разнообразных научно-технических задач, которые используют решение СЛАУ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ильин В. Н. Основы автоматизации схемотехнического проектирования. М. : Энергия, 1979. 392 с.
2. Автоматизация схемотехнического проектирования / В.Н.Ильин, В.Т. и др. М. : Радио и связь, 1987. 368 с.
3. Чье Ен Ун. Схемотехника. Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2007. 383 с.
4. Фадеев Д. К., Фадеев В. Н. Вычислительные методы линейной алгебры. М. : Физматиз, 1969. 734 с.
5. Демидович Б. П., Марон И. А. Основы вычислительной математики. М. : Физматиз, 1963. 660 с.
6. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М. : Наука, 1980. 976 с.
7. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М. : Наука, 1978. 832 с.
8. Крылов В. И., Бобков В. В., Монастырный П. И. Вычислительные методы. Т. 1. М. : Наука, 1976. 304 с.
9. Чуа Л. О., Лин Пен-Мин. Машинный анализ электронных схем: Алгоритмы и вычислительные методы. М. : Энергия, 1980. 640 с.
10. Курош А. Г. Курс высшей алгебры. М. : Наука, 1971. 432 с.
11. Шеин А. Б., Лазарева Н. М. Методы проектирования электронных устройств. М. : Инфра-Инженерия, 2011. 456 с.

УДК 517.927.4

Дрегля Алена Ивановна,
м. н. с. НИЧ Иркутского государственного университета,
тел. 8-9149147774, e-mail: ad@math.isu.ru

О РАЗРЕШИМОСТИ ОДНОЙ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ В МОДЕЛЯХ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

A.I. Dreglea

SOLVABILITY OF ONE BOUNDARY VALUE PROBLEM IN THE BOUNDARY LAYER MODELS

Аннотация. *Доказана теорема существования непрерывных решений двухточечной краевой задачи для нелинейного дифференциального уравнения третьего порядка, возникающего в теории пограничного слоя при моделировании некоторых процессов в современных технологиях формования волокна.*

Ключевые слова: *краевые задачи, формование волокна, нелинейные дифференциальные уравнения, принцип Шаудера.*

Abstract. *The theorem of existence of continuous solutions of the boundary-value problem for the 3rd order nonlinear differential equation is proved. Such problems arise in the boundary layer theory in the modeling of some processes in modern melt spinning technologies.*

Keywords: *boundary layer theory, melt spinning, nonlinear differential equations, Schauder fixed point theorem.*

1. Постановка задачи

При моделировании ряда процессов в химических технологиях [1], [3–8], [10] важную роль играют уравнения пограничного слоя, в частности системы вида:

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{v}{a+y}=0, \qquad (1.1)$$

$$u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}=\nu_{nu}\left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{1}{a+y}\frac{\partial u}{\partial y}\right) \qquad (1.2)$$

с граничными условиями

$$u(x,0)=u_e,\ v(x,0)=0,\ \lim_{y\to\infty}u(x,y)=0.$$

Используя функцию тока $\psi(x,y)$, замену

$$u=\frac{1}{a+y}\frac{\partial\psi}{\partial x},\ v=-\frac{1}{a+y}\frac{\partial\psi}{\partial x},$$

где

$$\psi=fa\sqrt{u_e\nu_{nu}x},\ y=a\sqrt{2}\xi\eta,$$

$$x=\xi^2\frac{u_e a^2}{\nu_{nu}},$$

уравнение (1.2) в работе [10] преобразовано к виду

$$f_{\eta\eta\eta}=f_{\eta\eta}\frac{2\xi-f-\xi f_\xi}{\sqrt{2}(1+\xi\eta\sqrt{2})}+\frac{\xi f_\eta}{\sqrt{2}(1+\xi\eta\sqrt{2})^2}\times$$
$$\times[(1+\xi\eta\sqrt{2})f_{\eta\xi}-\eta\sqrt{2}f_\eta+ \qquad (1.3)$$
$$+\xi\sqrt{2}f_\xi+\sqrt{2}f-2\sqrt{2}\xi]$$

с граничными условиями:

$$f=0,\qquad \frac{f_\eta}{\sqrt{2}}=1 \text{ при } \eta=0, \qquad (1.4)$$

$$\frac{f_\eta}{\sqrt{2}(1+\xi\eta\sqrt{2})}=0 \text{ при } \eta=\infty. \qquad (1.5)$$

В первом приближении вместо уравнения (1.3) обычно (см. [7], [10]) решается обыкновенное дифференциальное уравнение третьего порядка вида

$$f_{\eta\eta\eta}+R(f,\eta)f_{\eta\eta}=0 \qquad (1.6)$$

с соответствующими граничными условиями. Поэтому в индустриальной математике важную роль играют теоремы существования и методы построения решений двухточечных краевых задач вида

$$x'''(t)+R(x(t),t)x''(t)=0,\ \alpha<t<\beta, \qquad (1.7)$$

$$x(\alpha)=a,\ x'(\alpha)=b,\ x(\beta)=c. \qquad (1.8)$$

В п. 2 данной статьи доказана теорема существования классических решений системы (1.7)–(1.8).

2. Теорема существования

Пусть

А. Функция $R(x,t)$ определена и непрерывна на компакте

$$D=\{x,t\mid |x|\le|a|+|b||\beta|+$$
$$+|c-a-b\beta|,\ \alpha\le t\le\beta\},$$

$$m=\min_{x,t\in D}R(x,t),\quad M=\max\left\{\max_{x,t\in D}R(x,t),0\right\}.$$

Ниже краевая задача (1.7), (1.8) сводится к нелинейному интегральному уравнению и, следуя [9, п. 35], применяется принцип неподвижной

точки Шаудера [9]. В результате доказано существование решения краевой задачи (1.7), (1.8) на любом конечном отрезке $[\alpha,\beta]$ в общем случае, когда функция $R(x,t)$ – любая непрерывная функция, удовлетворяющая условию А.

Теорема. *Пусть выполнено условие А. Тогда краевая задача (1.7), (1.8) имеет в классе* $C^{(3)}_{[\alpha,\beta]}$ *решение.*

Доказательство. Сведем задачу (1.7), (1.8) к нелинейному интегральному уравнению (2.4). Для этого введем обозначение $u = x''$ и перепишем уравнение (1.7) в виде

$$u' + R(x,t)u = 0$$

с условием

$$u(\alpha) = x''(\alpha),$$

где $x''(\alpha)$ определим позже. Тогда очевидно

$$x''(t) = x''(\alpha)e^{-\int_\alpha^t R(x(s),s)ds}. \qquad (2.1)$$

Путем интегрирования (2.1) от α до t с учетом граничного условия $x'(\alpha) = b$ получим равенство

$$x'(t) = b + x''(\alpha)\int_\alpha^t e^{-\int_\alpha^\sigma R(x(s),s)ds} d\sigma. \qquad (2.2)$$

Интегрируя (2.2) с учетом граничного условия $x(\alpha) = a$ получим уравнение

$$x(t) = a + bt + x''(\alpha)\int_\alpha^t\int_\alpha^\eta e^{-\int_\alpha^\sigma R(x(s),s)ds} d\sigma d\eta. \qquad (2.3)$$

Полагая в (2.3) $t = \beta$ и используя граничное условие $x(\beta) = c,$ найдем $x''(\alpha)$ по формуле

$$x''(\alpha) = \frac{c - a - b\beta}{\int_\alpha^\beta\int_\alpha^\eta e^{-\int_\alpha^\sigma R(x(s),s)ds} d\sigma d\eta}.$$

Подставляя вычисленное $x''(\alpha)$ в уравнение (2.3), получим искомое нелинейное интегральное уравнение, эквивалентное краевой задаче (1.7), (1.8):

$$x(t) = a + bt + \qquad (2.4)$$

$$+(c - a - b\beta)\frac{\int_\alpha^t\int_\alpha^\eta e^{-\int_\alpha^\sigma R(x(s),s)ds} d\sigma d\eta}{\int_\alpha^\beta\int_\alpha^\eta e^{-\int_\alpha^\sigma R(x(s),s)ds} d\sigma d\eta}$$

Для краткости введем обозначение

$$F_x(\eta) = \int_\alpha^\eta e^{-\int_\alpha^\sigma R(x(s),s)ds} d\sigma,\ \alpha < \eta < \beta. \qquad (2.5)$$

С учетом обозначения (2.5) интегральное уравнение (2.4) переписывается в краткой форме:

$$x(t) = a + bt + (c - a - b\beta)\times$$

$$\times\frac{\int_\alpha^t F_x(\eta)d\eta}{\int_\alpha^\beta F_x(\eta)d\eta} \equiv P_t(x),\ \ \alpha < t < \beta. \qquad (2.6)$$

При $\alpha \le t \le \beta$ и $\forall x \in C_{[\alpha,\beta]}$ имеем неравенство

$$0 \le \frac{\int_\alpha^t F_x(\eta)d\eta}{\int_\alpha^\beta F_x(\eta)d\eta} \le 1,$$

так как функция $F_x(\eta)$, определяемая формулой (2.5), положительна при $\eta > \alpha$ и $\forall x$. Следовательно, для $\forall x \in C_{[\alpha,\beta]}$ имеем оценку

$$\| P_t(x) \| \le | a | + | b | \beta | + | c - a - b\beta | = r, \qquad (2.7)$$

где $\| P_t(x) \| = \max_{\alpha\le t\le\beta} | P_t(x) |$. Тем более, при $\forall \| x \| \le r$ справедливо неравенство

$$\| P_t(x) \| \le r,$$

т. е. интегральный оператор $P_t : C_{[\alpha,\beta]} \to C_{[\alpha,\beta]}$ переводит шар $\| x \| \le r$ пространства $C_{[\alpha,\beta]}$ самого в себя.

Докажем, что оператор P_t вполне непрерывен. Для этого воспользуемся теоремой Арцелла ([9], стр. 198–200) о предкомпактности множеств в $C_{[\alpha,\beta]}$. Ввиду оценки (2.7) образ множества $\| x \| \le r$ при отображении $P_t(x)$ равномерно ограничен постоянной r.

Далее, очевидна оценка

$$| P_{t_1}(x) - P_{t_2}(x) | \le \qquad (2.8)$$

$$\le | b | | t_1 - t_2 | + \frac{| c - a - b\beta |}{| \int_\alpha^\beta F_x(\eta)d\eta |} | \int_{t_1}^{t_2} F_x(\eta)d\eta |.$$

Отметим, что, так как функция $F_x(t)$ положительна, то

$$| \int_{t_1}^{t_2} F_x(\eta)d\eta | = \int_{t_1}^{t_2} F_x(\eta)d\eta,\ \ t_1 < t_2.$$

Рассмотрим два случая.

Случай I: ($M > 0$).

$$\int_\alpha^\beta F_x(\eta)d\eta \ge \int_\alpha^\beta\int_\alpha^\eta e^{-M(\sigma-\alpha)}d\sigma d\eta =$$

$$= \int_\alpha^\beta \frac{e^{M\alpha}}{-M}(e^{-M\eta}-e^{-M\alpha})d\eta =$$

$$-\frac{e^{M\alpha}}{M}[-\frac{1}{M}e^{-M\beta}+\frac{1}{M}e^{-M\alpha}]+\frac{1}{M}(\beta-\alpha) =$$

$$= \frac{1}{M^2}\{M(\beta-\alpha)+e^{-M(\beta-\alpha)}-1\} > 0,\ \forall M > 0.$$

Случай II: ($M = 0$)

$$\int_\alpha^\beta F_x(\eta)d\eta \ge \int_\alpha^\beta\int_\alpha^\eta d\sigma d\eta = \int_\alpha^\beta(\eta-\alpha)d\eta =$$

$$= \frac{1}{2}(\beta^2-\alpha^2)-\alpha(\beta-\alpha) =$$

$$= (\beta-\alpha)\frac{(\beta+\alpha-2\alpha)}{2} = \frac{(\beta-\alpha)^2}{2}.$$

Следовательно, при $\forall x \in D$ справедливо неравенство

$$\int_\alpha^\beta F_x(\eta)d\eta \ge C_1 > 0, \qquad (2.9)$$

где

$$C_1 = \begin{cases} \frac{(\beta-\alpha)^2}{2}, & M = 0, \\ \frac{1}{M^2}(M(\beta-\alpha)+e^{-M(\beta-\alpha)}-1), & M > 0. \end{cases}$$

С другой стороны, очевидно и выполнение неравенства

$$F_x(\eta) \le \int_\alpha^\eta e^{-m(\sigma-\alpha)}d\sigma \le \int_\alpha^\beta e^{-m(\sigma-\alpha)}d\sigma = C_2,$$

где

$$C_2 = \begin{cases} \beta-\alpha, & m = 0 \\ \frac{1-e^{-m(\beta-\alpha)}}{m}, & m > 0 \\ \frac{e^{|m|(\beta-\alpha)}-1}{|m|}, & m < 0. \end{cases}$$

Таким образом, при $\forall x,t \in D$ справедливо неравенство

$$0 < F_x(\eta) \le C_2. \qquad (2.10)$$

В итоге неравенства (2.9), (2.10) при любых t_1, t_2 из отрезка $[\alpha,\beta]$ и любых $x(t)$ из шара $S(0,r)$ пространства $C_{[\alpha,\beta]}$ дают такое уточнение оценки (2.8):

$$|P_{t_1}(x)-P_{t_2}(x)| \le |b||t_1-t_2| +$$

$$+\frac{|c-a-b\beta|}{C_1}C_2|t_1-t_2| = l|t_1-t_2|,$$

где $l = |b| + \frac{|c-a-b\beta|}{C_1}C_2$. Итак, существует константа l такая, что при $\forall(x,t_1,t_2) \in D$ выполнена оценка

$$|P_{t_1}(x)-P_{t_2}(x)| \le l|t_1-t_2|.$$

При этом константа l не зависит от x, t_1, t_2 из D. Мы доказали, что образ $P_t(x)$ шара $S(0,r)$ равноограничен и равностепенно непрерывен в $C_{[\alpha,\beta]}$ и на основании теоремы Арцелла предкомпактен в $C_{[\alpha,\beta]}$.

Следовательно, оператор P_t вполне непрерывен. Итак, мы доказали, что оператор P_t удовлетворяет условиям принципа неподвижной точки Шаудера [9, с. 401]. Поэтому нелинейное интегральное уравнение (2.4) имеет в классе $C_{[\alpha,\beta]}$ решение.

Отметим, что ввиду структуры оператора P_t производные

$$\frac{d^iP_t}{dt^i}, i = 0,1,2,3 \quad \forall x \in C_{[\alpha,\beta]}$$

при $\forall x(t) \in C_{[\alpha,\beta]}$ будут непрерывны. Поэтому решение уравнения (2.4) будет три раза непрерывно дифференцируемо. Теорема доказана.

В заключение отметим, что в приложениях в теории полимеров представляют интерес теоремы существования краевых задач и численные методы для уравнения (1.6) на полуоси, т. е. когда в условии (1.8) $\beta = \infty$. Некоторые теоретические результаты и численные расчеты в этом направлении приведены в [2], [4], [7], [8].

Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг.», проект 2012-1.2.2.-12-000-1001-012.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аристов С. Н. Точные решения уравнений Навье-Стокса с линейной зависимостью компонент скорости от двух пространственных переменных/ С. Н. Аристов, Д. В. Князев, А. Д. Полянин // Теоретические основы химической технологии. 2009. Т. 43, No.5. С. 547–566.
2. Сидоров Н. А. О малых решениях нелинейных уравнений с векторным параметром в секториальных окрестностях / Н. А. Сидоров, Р. Ю. Леонтьев, А. И. Дрегля // Матем. заметки. 2012. Т. 91. С. 120–135.

3. Дрегля А. И. Некоторые аналитические и точные решения систем уравнений в теории моделирования полимеров // Сиб. журн. индустр. матем. 2008. Т. 11. № 3. С. 61–70.
4. Дрегля, А. Краевые задачи в моделировании формования волокон аналитические и численные методы / А. Дрегля. – Saarbrucken: Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. 110 с.
5. Glauert M. B., Lighthill M. J. The Axisymmetric Boundary Layer on a Long thin Cylinder. Proc. R. Soc. London, 1955. 320. P. 188–203.
6. Schlichting H. Boundary Layer Theory. 7-th ed. McGraw Hill, 1951.
7. Farrel P. A., Hegarty A. F., Miller J. J. H., O'Riordan E., Shishkin G. I. Robust Computational Techniques for Boundary Layers. Florida, [USA] : Chapman and Hall CRC, 2000.
8. Dreglea A.I., Shishkin G.I. Robust Numerical Method for a Singularly Perturbed Equation with Unboundedly Growing Convective Term at Infinity // Proceedings of International Conference on Computational Mathematics. Novosibirsk, 2004. P. 83–87.
9. Треногин В. А. Функциональный анализ. М : Наука. 1997. 488 с.
10. Richelle E. Momentum and Thermal Boundary Layer Along a Slender Cylinder in Axial Flow // Int. J. Heat and Fluid Flow 16: 1995 Elsevier Science Inc., P. 99–105

УДК 517.98

Мижидон Арсалан Дугарович,
д. т. н., профессор, зав. каф. «Прикладная математика»
Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления,
тел. (3012) 43-14-15, e-mail: miarsdu@esstu.ru
Баргуев Сергей Ганжурович (Гавриилович),
к. ф.-м. н., доцент, зав. каф. «Высшая математика и общепрофессиональные дисциплины»
Бурятского филиала Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики,
тел. (3012) 42-35-26, e-mail: barguev@yandex.ru

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЛАСТИНЫ С ТВЕРДЫМИ ТЕЛАМИ

S.G. Barguev, A.D. Mizhidon

MATHEMATICAL MODEL OF A PLATE WITH SOLID BODIES

Аннотация. *Рассматривается вывод уравнений движения твердых тел, установленных с помощью упругих элементов на упругой пластине.*

Ключевые слова: *виброзащита, пластина, твердые тела, уравнения движения, принцип Гамильтона.*

Abstract. *In the article the finding movement equations of the solid bodies, established on the elastic plate by means of elastic elements.*

Keywords: *vibroprotection, plate, solid bodies, movement equations, principle of Hamilton.*

Введение

Вибрацию широко применяют в самых различных областях техники для защиты оборудования, чувствительного к увеличению динамических нагрузок. Современная теория виброзащиты помогает в основном исследовать и конструировать систему виброизоляции, когда источник и объект виброзащиты можно рассматривать как абсолютно твердые тела. В действительности в виброзащитных системах (ВЗС) под влиянием внешних воздействий возникают не только перемещения источника и объекта как твердых тел, но и их упругие деформации. В этом случае ограничиваются рассмотрением источника и объекта как упруго–вязкой системы с конечным числом степеней свободы, описываемой дифференциальными уравнениями Лагранжа второго рода [1].

Целью данной работы является вывод уравнений движения твердых тел, установленных с помощью упругих элементов на упругой пластине.

1. Основные обозначения

Рассмотрим следующую механическую систему (рис. 1). На упругой пластине 1, прикрепленной к твердому телу 2, установлены N объектов защиты, допускающих моделирование в виде твердых тел. Предполагается, что масса твердого тела 2 значительно превышает сумму масс объектов защиты и пластины. Источником динамических воздействий является заданное поступательное колебание твердого тела 2.

Введем следующие системы координат (рис. 2):

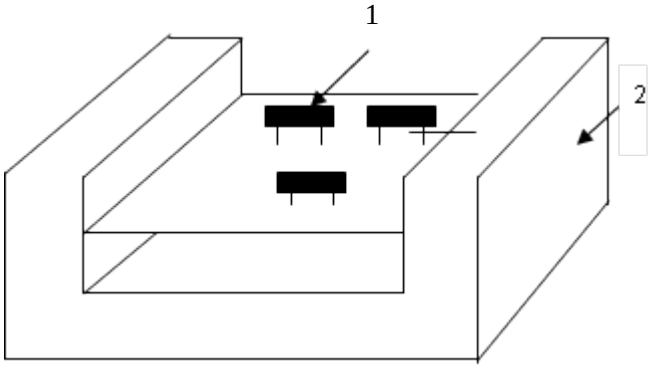


Рис. 1. Схема механической системы

1) $\overline{\overline{O}}^{i} x^i y^i z^i$ – декартова система координат жестко связанная с *i*-м телом (подвижная), с началом в центре масс и совпадающая с главными осями инерции объекта;

2) $\overline{O}^{i} \xi^i \eta^i \zeta^i$ – декартова система координат (неподвижная), совпадающая в положении равновесия с системой $\overline{\overline{O}}^{i} x^i y^i z^i$.

3) $\overline{O}xyz$ – декартова система координат жестко связанная с пластиной (подвижная), определяющая начальные положения точек упругой пластины;

4) $Ou_x u_y u_z$ – декартова система координат (неподвижная), совпадающая в положении равновесия с системой $\overline{O}xyz$.

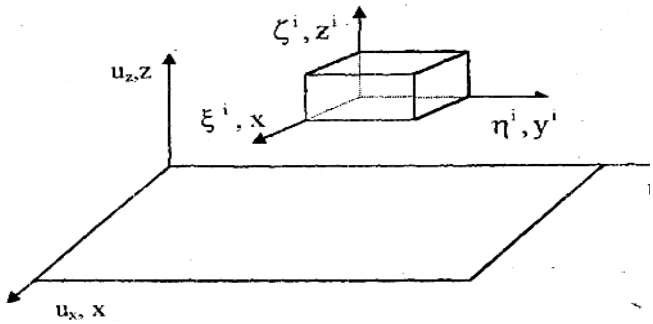


Рис. 2. Оси координат механической системы

Твердое тело 2 совершает заданные перемещения в направлении осей Ou_x, Ou_y, Ou_z соответственно по законам $\sigma_1(t), \sigma_2(t), \sigma_3(t)$.

Положение объектов защиты описывается с помощью обобщенных координат $q^i = (q_1^i, q_2^i, q_3^i, q_4^i, q_5^i, q_6^i)^T$. Первые три компоненты – смещения в направлении осей $\overline{O}\xi^i, \overline{O}\eta^i, \overline{O}\zeta^i$, последующие – повороты относительно тех же осей.

Перемещения точек упругой пластины в момент времени *t* характеризуются в направлении оси Ou_z, функцией $u(x, y, t)$, а в направлении осей Ou_x, Ou_y заданными функциями $\sigma_1(t) + x$, $\sigma_2(t) + y$, где (x, y) – координаты проекции точки упругой пластины на плоскость $\overline{O}xy$ подвижной системы координат. При этом смещения $u(x, y, t)$ удовлетворяют граничным условиям

$$u(x,0,t) = u(x,l,t) = \sigma_3(t),$$
$$\frac{\partial u}{\partial x}(x,0,t) = \frac{\partial u}{\partial x}(x,l,t). \qquad (1)$$

2. Определение деформаций амортизаторов в направлении главных осей жесткости

Предположим, что каждое *i*-е тело устанавливается на упругой пластине с помощью N амортизаторов.

Проекции перемещений точки крепления j-го амортизатора к *i*-му телу на оси координат системы $\overline{O}^{i} \xi^i \eta^i \zeta^i$ имеют вид [1]

$$V_j^i = X_j^i q^i, \qquad (2)$$

где x_j^i, y_j^i, z_j^i – координаты в системе $\overline{\overline{O}}^{i} x^i y^i z^i$ точки крепления *j*-го амортизатора к *i*-му телу,

$$V_j^i = \begin{pmatrix} V_{j1}^i \\ V_{j2}^i \\ V_{j3}^i \end{pmatrix}, \quad X_j^i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z_j^i & -y_j^i \\ 0 & 1 & 0 & -z_j^i & 0 & x_j^i \\ 0 & 0 & 1 & y_j^i & -x_j^i & 0 \end{pmatrix},$$

q^i – матрица-столбец.

Перемещения этой точки в координатной системе $Ou_x u_y u_z$ можно представить в виде

$$W_j^i = \beta^i V_j^i + \Theta^i. \qquad (3)$$

Здесь

$W_j^i = \begin{pmatrix} W_{j1}^i \\ W_{j2}^i \\ W_{j3}^i \end{pmatrix}$; $\Theta^i = \begin{pmatrix} \Theta_1^i \\ \Theta_2^i \\ \Theta_3^i \end{pmatrix}$ – координаты точки $\overline{O}^{i}$ относительно $Ou_x u_y u_z$; $\beta^i = [\beta_{ks}^i], (s,k = 1,2,3)$ – матрица направляющих косинусов, определяющая ориентацию системы координат $\overline{O}^{i} \xi^i \eta^i \zeta^i$ относительно $Ou_x u_y u_z$. Введя $\alpha^{ij} = [\alpha_{ks}^{ij}], (s,k = 1,2,3)$ – матрицу направляющих косинусов, определяющую ориентацию главных осей жесткости *j*-го амортизатора *i*-го тела, запишем перемещения

точки крепления амортизатора в направлении главных осей жесткости в виде

$$S_j^{Ti} = \alpha^{ij} W_j^i, (k = 1,2,3), \quad (4)$$

где $S_j^{Ti} = \begin{pmatrix} S_{j1}^{Ti} \\ S_{j2}^{Ti} \\ S_{j3}^{Ti} \end{pmatrix}$.

Перемещения точки крепления *j*-го амортизатора *i*-го тела к пластине в системе координат $Ou_x u_y u_z$ представляются следующим образом:

$$\begin{aligned} u_{j1}^i &= \sigma_1(t) + x_{ij}, \\ u_{j2}^i &= \sigma_2(t) + y_{ij}, \\ u_{j3}^i &= u(x_{ij}, y_{ij}, t), \end{aligned} \quad (5)$$

где x_{ij}, y_{ij} – координата точки крепления амортизатора к пластине в системе $\overline{Oxyz}$.

В направлении главных осей жесткости амортизатора перемещения точки крепления *i*-го амортизатора *j*-го тела к пластине определяется выражением

$$S_j^{Oi} = \alpha^{ij} u_j^i, \quad (6)$$

где $S_j^{Oi} = \begin{pmatrix} S_{j1}^{Oi} \\ S_{j2}^{Oi} \\ S_{j3}^{Oi} \end{pmatrix}$.

Таким образом, деформацию *j*-го амортизатора *i*-го тела в направлении главных осей жесткости в силу (2)–(3) можно записать виде

$$\Delta_j^i = \alpha^{ij} \beta^i X_j^i q^i + \alpha^{ij} \Theta^i - \alpha^{ij} u_j^i, \quad (7)$$

где $\Delta_j^i = \begin{pmatrix} \Delta_{j1}^i \\ \Delta_{j2}^i \\ \Delta_{j3}^i \end{pmatrix}$.

3. Потенциальная и кинетическая энергия системы.

Потенциальная энергия деформаций *j*-го амортизатора *i*-го тела определяется выражением

$$\Pi_j^i = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{3} c_{jk}^i \Delta_{jk}^{i\,2}, \quad (8)$$

где $c_{j1}^i, c_{j2}^i, c_{j3}^i$ – жесткости амортизатора в направлении соответствующих главных осей жесткости. Введя матрицу

$$C_{j^*}^i = \begin{pmatrix} c_{j1}^i & 0 & 0 \\ 0 & c_{j1}^i & 0 \\ 0 & 0 & c_{j3}^i \end{pmatrix},$$

запишем (8) в матричном виде

$$\Pi_j^i = \frac{1}{2} \Delta_j^{iT} C_{j^*}^i \Delta_j^i. \quad (9)$$

Здесь и ниже (*T*) – знак транспонирования.

Учитывая, что вектор деформаций Δ_j^i в матричных обозначениях определяется формулой (7), представим (9) в виде

$$\begin{aligned} \Pi_j^i = \frac{1}{2} (& q^{iT} C_j^i q^i + 2 D_j^i q^i + a_j^i + \\ & + u_j^{iT} E_j^i u_j^i + 2 u_j^{iT} F_j^i q_j^i + 2 G_j^i u_j^i) \end{aligned} \quad (10)$$

где a_j^i – число,

$C_j^i[6\times6], D_j^i[1\times6], E_j^i[3\times3], F_j^i[3\times6], G_j^i[1\times3]$ – матрицы, определяемые соотношениями

$$\begin{aligned} C_j^i &= X_j^{iT} \beta^{iT} \alpha^{ijT} C_{j^*}^i \alpha^{ij} \beta^i X_j^i, \\ D_j^i &= \Theta^{iT} \alpha^{ijT} C_{j^*}^i \alpha^{ij} \beta^i X_j^i, \\ a_j^i &= \Theta^{iT} \alpha^{ijT} C_{j^*}^i \alpha^{ij} \Theta^i, \\ E_j^i &= \alpha^{ijT} C_{j^*}^i \alpha^{ij}, \\ G_j^i &= -\Theta^{iT} \alpha^{ijT} C_{j^*}^i \alpha^{ij}, \\ F_j^i &= -\alpha^{ijT} C_{j^*}^i \alpha^{ij} \beta^i X_j^i. \end{aligned}$$

Таким образом, потенциальная энергия деформаций амортизаторов определяется суммой

$$\Pi = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N_i} \Pi_j^i. \quad (11)$$

Здесь Π_j^i – потенциальная энергия *j*-го амортизатора *i*-го тела, определяемая в матричном виде формулой (10).

Кинетическая энергия объектов защиты является суммой кинетических энергий отдельных тел

$$T = \sum_{i=1}^{N} T_i, \quad (12)$$

где T_i – кинетическая энергия *i*-го тела, определяемая соотношением

$$T_i = \frac{1}{2} \dot{q}^T A^i \dot{q}. \quad (13)$$

Здесь A^i – матрица инерции *i*-го тела.

Потенциальная энергия деформации пластины, согласно [1], может быть записана в виде

$$U=\frac{1}{2}\iint\limits_{\Omega}D\left\{(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2})^2-2(1-\nu)[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}-(\frac{\partial^2 u}{\partial x\partial y})^2]\right\}d\Omega,\quad(14)$$

где D – цилиндрическая жесткость пластины, ν – коэффициент Пуассона.

Учитывая только силы инерции в вертикальном направлении, запишем кинетическую энергию пластины [2]:

$$T_*=\frac{1}{2}\iint\limits_{S}\rho h(\frac{\partial u}{\partial t})^2\,dxdy\,. \qquad (15)$$

Здесь ρ – плотность материала, h – толщина пластины.

4. Вывод уравнений

Для получения уравнений движения воспользуемся принципом Гамильтона, который справедлив как для систем с конечным числом степеней свободы, так и для распределенных систем.

Интеграл действия имеет вид

$$I=\int\limits_{0}^{t_1}(T-\Pi+T_*-U)dt\,.$$

Согласно принципу Гамильтона, уравнения движения системы получаются из условия, что на любых изохронных вариациях обобщенных координат, обращающихся в нуль на концах отрезка $[0,t_1]$, вариация интеграла действия обращается в нуль

$$\delta I=0\,.$$

Интеграл действия в силу соотношений (10)–(15), определяющих кинетическую и потенциальную энергию системы, запишем в виде

$$\begin{aligned}I=&\frac{1}{2}\int\limits_{0}^{t_1}[\sum_{i=1}^{N}\dot{q}^{T}A^i\dot{q}-\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N_i}(q^{iT}C_j^iq^i+2D_j^iq^i)]dt-\\&-\frac{1}{2}\int\limits_{0}^{t_1}(a_j^i+u_j^{iT}E_j^iu_j^i+2u_j^{iT}F_j^iq^i+2G_j^iu_j^i)dt+\\&+\frac{1}{2}\int\limits_{0}^{t_1}\iint\limits_{\Omega}(\rho h(\frac{\partial u}{\partial t})^2-D(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2})^2)d\Omega dt+\\&+\frac{1}{2}\int\limits_{0}^{t_1}\iint\limits_{\Omega}(2(1-\nu)[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}-(\frac{\partial^2 u}{\partial x\partial y})^2])d\Omega dt.\end{aligned} \qquad (16)$$

Вариация в первых двух интегралах из (16) определяется в виде

$$\begin{aligned}\delta I_1=&\int\limits_{0}^{t_1}([\sum_{i=1}^{N}\ddot{q}^{iT}A^i\delta q^i])dt-\\&-\int\limits_{0}^{t_1}[\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N_i}(q^{iT}C_j^i+D_j^i+u_j^{iT}F_j^i)]\delta q^i dt-\\&-\int\limits_{0}^{t_1}([\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N_i}(u_j^{iT}E_j^i+q^{iT}F_j^{iT}+G_j^i)]\delta u_j^i)dt,\end{aligned} \qquad (17)$$

$$\delta u_j^i=\begin{pmatrix}0\\0\\\delta u(x_{ij},y_{ij},t)\end{pmatrix}. \qquad (18)$$

Здесь $\delta u(x,y,t)$ – вариация обобщенной координаты $u(x,y,t)$, характеризующей смещения точек пластины в направлении оси Ou_z.

Введя вектор e_j^i, составленный из третьего столбца матрицы E_j^i, и вектор f_j^i, составленный из третьего столбца матрицы F_j^{iT}, учитывая соотношения (5) и (18), преобразуем (17):

$$\begin{aligned}\delta I_1=&-\int\limits_{0}^{t_1}\left\{[\sum_{i=1}^{N}\ddot{q}^{iT}A^i+\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N_i}(q^{iT}C_j^i+D_j^i+u_j^{iT}F_j^i)]\delta q^i+\right.\\&+\iint\limits_{\Omega}[\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N_i}(\sigma_1(t)+x)e_{j1}^i+(\sigma_2(t)+y)e_{j2}^i+u(x,y,t)e_{j3}^i+\\&\left.+q^{iT}f_j^i+g_j^i)]\delta(x-x_{ij})\delta(y-y_{ij})\delta u(x,y,t)\,d\Omega\right\}dt.\end{aligned} \qquad (19)$$

При предположении, что пластина является однородной и ее толщина h постоянна; вариация второго интеграла из (16) имеет вид [2]

$$\begin{aligned}\delta I_2=&-\int\limits_{0}^{t_1}\iint\limits_{\Omega}[D(\frac{\partial^4 u}{\partial x^4}+2\frac{\partial^4 u}{\partial x^2\partial y^2}+\frac{\partial^4 u}{\partial y^4})+\\&+\rho h\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}]\delta u(x,y,t)d\Omega dt.\end{aligned} \qquad (20)$$

Таким образом, в соответствии с (19) и (20), вариацию интеграла действия (16) запишем следующим образом:

$$\delta I = -\int_0^{t_1}[\sum_{i=1}^{N} \ddot{q}^{iT} A^i]q^i dt -$$

$$-\int_0^{t_1}(\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N_i}(q^{iT}C_j^i + D_j^i + u_j^{iT}F_j^i)]\delta q^i)dt -$$

$$-\int_0^{t_1}(\iint_\Omega[\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N_i}(\sigma_1(t)+x)e_{j1}^i\delta(x-x_{ij})\delta(y-y_{ij})])\times$$

$$\times\delta u(x,y,t)d\Omega]dt - \int_0^{t_1}(\iint_\Omega[\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N_i}((\sigma_2(t)+y)e_{j2}^i +$$

$$+u(x,y,t)e_{j3}^i)\delta(x-x_{ij})\delta(y-y_{ij})])\delta u d\Omega]dt - \quad (21)$$

$$-\int_0^{t_1}(\iint_\Omega[\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N_i}(q^{iT}f_j^i + g_j^i)\delta(x-x_{ij})\delta(y-y_{ij})])\times$$

$$\times\delta u(x,y,t)d\Omega)dt -$$

$$-\int_0^{t_1}(\iint_\Omega(\rho h\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + D(\frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 u}{\partial x^2\partial y^2} + \frac{\partial^4 u}{\partial y^4}))\times$$

$$\times\delta u(x,y,t)d\Omega)dt.$$

Вариация (21) будет равна нулю, если будут выполняться соотношения

$$\sum_{i=1}^{N}\ddot{q}^{iT}A^i + \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N_i}(q^{iT}C_j^i + D_j^i + u_j^{iT}F_j^i) = 0,$$

$$\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N_i}(\sigma_1(t)+x)e_{j1}^i + (\sigma_2(t)+y)e_{j2}^i + u(x,y,t)e_{j3}^i +$$

$$+q^{iT}f_j^i + g_j^i)]\delta(x-x_{ij})\delta(y-y_{ij}) + \rho h\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + D(\frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + \quad (22)$$

$$+2\frac{\partial^4 u}{\partial x^2\partial y^2} + \frac{\partial^4 u}{\partial y^4}) = 0.$$

Таким образом, уравнения движения системы твердых тел, установленных на упругой пластине, определяются соотношениями (22).

Уравнения (22) являются смешанной (гибридной) системой дифференциальных уравнений, содержащей $6N$ обыкновенных дифференциальных уравнений и одно уравнение в частных производных. Исследование такой смешанной системы является сложной математической задачей. Наличие в уравнении в частных производных сингулярностей типа δ-функций приводит к необходимости понимания решения системы (22) в обобщенном смысле [3].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 12-08-00309-А).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вибрации в технике : справочник. Т. 5. М. : Машиностроение, 1978. 356 с.
2. Вибрации в технике : справочник. Т. 6. М. : Машиностроение, 1978. 352 с.
3. Владимиров В. С. Уравнения математической физике. М. : Наука, 1976. 527 с.

УДК 519.87:519.722:519.213

Соколова Ирина Сибагатулловна,
аспирант, Челябинский государственный университет, тел. 89085795940
Тырсин Александр Николаевич,
д-р техн. наук, в. н. с., научно-инженерный центр «Надежность и ресурс больших систем машин» УрО РАН, тел. 89221007452

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНТРОПИЙНО-ВЕРОЯТНОСТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ СИСТЕМАМИ

I.S. Sokolova, A.N. Tyrsin

USE OF ENTROPY-PROBABILISTIC MODELING IN PROBLEMS OF MONITORING AND MANAGEMENT OF COMPLEX SYSTEMS

Аннотация. *Показаны примеры применения энтропийно-вероятностного моделирования с целью анализа и управляющего воздействия на сложные системы. Первый пример сравнивает две группы угледобывающих предприятий отличающихся между собой уровнем травматизма (высокий и низкий). Даются рекомендации по снижению травматизма. Второй пример связан с системой, влияющей на демографическую обстановку в стране и демонстрирует задачу, основанную на гипотезе, что для увеличения численности населения нужно максимизировать энтропию данной системы.*

Ключевые слова: *энтропия, вероятность, модель, сложная система, многомерная случайная величина.*

Abstract. *The paper describes examples of entropy-probabilistic modeling to analyze and manage complex systems. The first example compares two groups of coal mines with different levels of injuries (high and low). It provides recommendations to reduce injuries. The second example is the system that affects the demographic situation in the country and demonstrates the task based on the hypothesis that an increase in population is achieved by the maximum of the entropy of the system.*

Keywords: *entropy, probability, model, complex system, multi-dimensional random variable.*

Введение

Одним из перспективных направлений моделирования сложных стохастических систем является использование энтропии, которая может выступать в роли универсального параметра [1] и идеально подходит для решения задач о поведении сложных стохастических систем.

В [2] предлагается подход к моделированию систем, основанный на представлении сложной стохастической системы *S* в виде случайного нормально распределенного вектора $\mathbf{Y} = (Y_1, Y_2, .., Y_m)^T$, $Y_i \sim N(a_i, \sigma_{Y_i}^2)$ с заданной корреляционной матрицей

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1 & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & 1 & \dots & r_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & 1 \end{pmatrix}.$$

Каждый элемент этого вектора является одномерной случайной величиной, которая характеризует функционирование соответствующего элемента системы *S*. Установлено, что энтропия такой системы определяется как [2]

$$H(\mathbf{Y}) = \sum_{i=1}^{m} H(Y_i) + \frac{1}{2}\ln|\mathbf{R}|, \qquad (1)$$

где $H(Y_i) = \frac{1}{2}\ln\left[(2\pi e)\sigma_{Y_i}^2\right]$.

Согласно (1), энтропия стохастической системы складывается из двух составляющих, которые характеризуют ее различные свойства, т. е. в виде вектора

$$\mathbf{h} = \left(H_1(\mathbf{Y}); H_2(\mathbf{Y})\right) = \left(\sum_{i=1}^{m} H(Y_i); \frac{1}{2}\ln(|\mathbf{R}|)\right). \qquad (2)$$

Энтропийно-вероятностная модель, основанная на соотношениях (1), (2), может использоваться для решения различных задач. К ним можно отнести оптимизационные задачи эффективно-

го управления системой на основе увеличения или уменьшения ее энтропии, а также задачи мониторинга состояния стохастических систем. Рассмотрим примеры использования энтропийно-вероятностного моделирования для указанных классов задач.

Моделирование системы, характеризующей безопасность производства

Современные предприятия для обеспечения долгосрочного устойчивого функционирования должны постоянно повышать не только эффективность и конкурентоспособность производства, но и безопасность [3]. Рассмотрим пример, связанный с безопасностью на предприятиях. Обратимся к табл. 1, содержащей статистические исследования по 17 угледобывающим предприятиям, предоставленные сотрудником лаборатории безопасности технологических процессов горного производства ОАО «НТЦ-НИИОГР» О.С. Седовой.

Таблица 1

№	x	z	n	r	m	Коэф-т частоты травмирования на 1000 чел.
1	0,52	0,57	0,71	0,59	0,57	13,17
2	0,42	0,62	0,78	0,62	0,58	15,22
3	0,62	0,67	0,76	0,73	0,62	8,76
4	0,69	0,60	0,80	0,63	0,64	5,79
5	0,71	0,60	0,78	0,75	0,69	8,18
6	0,53	0,48	0,68	0,54	0,59	16,52
7	0,75	0,65	0,83	0,63	0,64	6,43
8	0,55	0,47	0,72	0,60	0,54	15,21
9	0,54	0,56	0,72	0,60	0,63	27,41
10	0,45	0,46	0,60	0,47	0,49	31,67
11	0,40	0,26	0,61	0,44	0,41	34,40
12	0,56	0,63	0,68	0,76	0,57	11,61
13	0,81	0,60	0,81	0,78	0,76	21,65
14	0,46	0,40	0,65	0,54	0,32	37,49
15	0,35	0,37	0,60	0,48	0,43	43,68
16	0,50	0,32	0,57	0,49	0,32	49,69
17	0,69	0,58	0,61	0,62	0,58	35,34

В [4] отмечено, что «анализ статистических данных и опыта работы отечественных и зарубежных угледобывающих предприятий показал, что уровень производственного травматизма обусловлен на 3–7 % опасными условиями труда (горно-геологическими, природными и технико-технологическими факторами) и на 93–97 % опасными действиями персонала: отступлениями от должностных и технологических инструкций, нарушениями правил безопасности, личной неосторожностью». Автор выделяет и описывает 5 факторов, формирующих опасные действия персонала, называемые организационным риском: x – компетентность персонала; z – мотивация персонала на безопасное производство; n – взаимодействие структурных подразделений шахты; r – взаимодействие персонала в области безопасности производства; m – информационное обеспечение в области безопасности производства.

Факторный анализ, проведенный с целью исследования структуры взаимодействия этих 5 признаков организационного риска показал, что два исходных фактора объясняют 88 % всей вариации исходных признаков. Матрица факторного отображения приведена в табл. 2.

Таблица 2

Показатели	Y_1	Y_2
x	0,348	**0,922**
z	**0,841**	0,412
n	**0,857**	0,343
r	0,664	**0,626**
m	**0,762**	0,539
λ_j	4,029	0,374
δ, %	0,517	0,364

Фактор Y_1 представляет собой линейную комбинацию стандартизированных факторов $\bar{z}, \bar{n}, \bar{m}$; Y_2 – линейную комбинацию стандартизированных факторов $\bar{x}, \bar{r}$. Компонента Y_1 характеризует организацию безопасного производства. Компонента Y_2 характеризует профессионализм персонала.

$$Y_1 = \frac{1}{4{,}029}(0{,}841\bar{z} + 0{,}857\bar{n} + 0{,}762\bar{m}),$$

$$Y_2 = \frac{1}{0{,}374}(0{,}922\bar{x} + 0{,}626\bar{r}).$$

Разобьем исходные данные на две группы. В группе 1 будут находиться предприятия с коэффициентом частоты травмирования от 5,79 до 16,53 случаев на 1000 человек, а именно шахты 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 12. Будем считать группу 1 группой с низким уровнем травмирования. В группе 2 – предприятия с уровнем травмирования от 21,65 до 49,69 случаев на 1000 человек (высокий уровень) – это шахты 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17. Сокращенная макросистема, разбитая на две группы, представлена в табл. 3.

Гипотеза о нормальном распределении элементов полученной макросистемы не отвергается

критерием Шапиро – Уилка на уровне значимости $\alpha = 0{,}1$.

Энтропийно-вероятностная модель для первой группы предприятий представляет собой вектор

$$\mathbf{h} = \left(H_1(\mathbf{Y}); H_2(\mathbf{Y})\right) = \left(2{,}42; -0{,}31\right);$$
$$H(\mathbf{Y}) = 2{,}11.$$

Для второй группы:

$$\mathbf{h} = \left(H_1(\mathbf{Y}); H_2(\mathbf{Y})\right) = \left(3{,}73; -0{,}7\right);$$
$$H(\mathbf{Y}) = 3{,}04.$$

Таблица 3

Группа	№	Y_1	Y_2	Коэф-т частоты травмирования на 1000 трудящихся
1	4	0,53	2,89	5,80
	7	0,69	3,94	6,43
	5	0,54	5,11	8,186
	3	0,49	3,02	8,76
	12	0,17	2,43	11,61
	1	0,15	–1,01	13,17
	8	–0,06	–0,35	15,21
	2	0,41	–2,36	15,22
	6	–0,05	–1,53	16,52
2	13	0,73	7,53	21,65
	9	0,24	–0,54	27,41
	10	–0,46	–4,25	31,67
	11	–0,89	–5,61	34,40
	17	–0,09	2,61	35,34
	14	–0,68	–2,85	37,49
	15	–0,69	–5,60	43,68
	16	–1,03	–3,03	49,69

Очевидно, что энтропия второй группы, которая характеризуется высоким уровнем травматизма, оказалась выше за счет высоких значений дисперсий. Высокий уровень энтропии, как показатель уровня неопределенности, – признак плохой организации и нечеткости действий в системах. Поэтому для второй группы предприятий необходимо принять меры по снижению уровня энтропии. В случае, когда известны величины, на которые снизятся дисперсии элементов второй группы $\sigma^2_{Y_1} = 0{,}33$ и $\sigma^2_{Y_2} = 18{,}53$, обозначим их как d_1 и d_2 соответственно, при осуществлении управленческих мероприятий, обеспеченных единицей ресурса, задача минимизации энтропии для группы 2 может быть представлена в виде

$$\begin{cases} \dfrac{1}{2}\ln\left[(2\pi e)^2 (0{,}33 - x_1 d_1)(18{,}53 - x_2 d_2)\left|\mathbf{R}\right|\right] \to \min\limits_{x_i}, \\ \sum\limits_{i=1}^{2} x_i \le K, \\ x_1 \ge 0,\ x_2 \ge 0, \end{cases}$$

где K – количество ресурсов, и предполагается, что изменение уровня корреляционных связей при этом пренебрежительно мало.

Решение поставленной задачи обеспечит снижение энтропии, а следовательно, и уровня травматизма предприятий второй группы.

Моделирование системы, оказывающей влияние на численность населения страны

Анализ литературы [5, 6, 7] показывает, что среди существенных факторов, влияющих на демографическую обстановку в стране, есть такие показатели, как уровень жизни, уровень здравоохранения, условия труда и быта людей страны, уровень смертности, катаклизмы, войны.

Исходя из этих факторов и руководствуясь данными, имеющимися в ежегодно издаваемых государственным фондом статистики сборниках «Россия в цифрах», сформируем систему основных факторов $S = (S_1, S_2, ..., S_{14})$, оказывающих влияние на численность населения за период 2000–2011 гг. (табл. 4): S_1 – фактическое конечное потребление домашних хозяйств на душу населения, руб.; S_2 – среднедушевые денежные доходы населения (в месяц), руб.; S_3 – среднемесячная номинальная начисленная заработная плата работников организаций, руб.; S_4 – средний размер назначенных пенсий, руб.; S_5 – величина прожиточного минимума (в среднем на душу населения), руб. в месяц; S_6 – численность населения с денежными доходами ниже величины прожиточного минимума, в процентах от общей численности населения; S_7 – коэффициент фондов (коэффициент дифференциации доходов) в разах; S_8 – минимальный размер оплаты труда (в среднем за год), руб.; S_9 – численность безработных, тыс. чел.; S_{10} – численность пострадавших при несчастных случаях на производстве с утратой трудоспособности на один рабочий день и более и со смертельным исходом, на 1000 работающих; S_{11} – численность экономически активного населения; S_{12} – численность врачей на 10000 человек населения; S_{13} – мощность врачебных амбулаторных учреждений, посещений в смену: на 10000 человек населения; S_{14} – естественный прирост, убыль (–) населения; Z – численность населения, млн чел.

Таблица 4

Год	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
2000	26014	2281	2223	694,3	1210
2001	34637	3061	3240,4	1024	1500
2002	44440	3947	4360,3	1379	1808
2003	53276	5171	5498,5	1637	2112
2004	65186	6337	6831,8	1915	2376
2005	87030	8112	8555	2364	3018
2006	106766	9947	10727,7	2726	3422
2007	133185	12603	17290	3116	3847
2008	166839	14948	18638	4199	4593
2009	176443	17009	21193	5191	5153
2010	193576	18887	20952	7476	5688
2011	224206	20701	23693	8203	6369

Таблица 4 (продолжение)

Год	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}
2000	29	13,9	107,8	1037	5,1
2001	27,3	14	250	1122,7	5
2002	24,2	14	400	1499,7	4,5
2003	20,3	14,5	487,5	1638,9	3,9
2004	17,8	14,8	600	1920,3	3,4
2005	17,7	15,2	746,7	1830,1	3,1
2006	15,2	16	1000	1742	2,9
2007	13,3	16,8	1500	1553	2,7
2008	13,4	16,8	2300	1522	2,5
2009	13	16,7	4330	2147	2,1
2010	12,6	16,5	4330	1589	2,2
2011	12,8	16,1	4471	1286	2,1

Таблица 4 (окончание)

Год	S_{11}	S_{12}	S_{13}	S_{14}	Z
2000	72332	46,8	243	–6,6	145,6
2001	70968	46,9	245	–6,6	146,3
2002	72421	47,4	248	–6,5	145,6
2003	72835	48	249	–6,2	145
2004	72909	48,4	251	–5,6	144,2
2005	73811	48,8	257	–5,9	143,5
2006	74156	49,4	256	–4,8	142,8
2007	75046	49,8	259	–3,3	142,2
2008	75757	49,6	257	–2,5	142
2009	75658	50,1	258	–1,8	141,9
2010	75440	50,1	258	–1,7	141,9
2011	75752	50,1	258	–0,9	142,9

Факторный анализ показал, что три исходных фактора (главные компоненты) объясняют 98 % всей вариации исходных признаков.

Матрица факторного отображения приведена в табл. 5.

Фактор Y_1 представляет собой линейную комбинацию стандартизированных факторов $\overline{S_1}, \overline{S_2}, \overline{S_3}, \overline{S_4}, \overline{S_5}, \overline{S_8}, \overline{S_{14}}$; Y_3 – линейную комбинацию стандартизированных факторов $\overline{S_6}, \overline{S_7}, \overline{S_{10}}, \overline{S_{11}}, \overline{S_{12}}, \overline{S_{13}}$. Y_2 отвечает S_9.

Компонента Y_1 характеризует уровень жизни населения и естественный прирост. Компонента Y_2 – уровень безработицы, а Y_3 – численность экономически активного населения, в том числе населения с низким доходом и пострадавших на производстве, и уровень здравоохранения.

Таблица 5

	Y_1	Y_2	Y_3
S_1	**0,820**	0,102	0,560
S_2	**0,827**	0,132	0,546
S_3	**0,784**	0,121	0,599
S_4	**0,922**	0,056	0,351
S_5	**0,834**	0,144	0,528
S_6	-0,516	-0,410	**-0,736**
S_7	0,497	0,216	**0,818**
S_8	**0,939**	0,155	0,285
S_9	0,025	**0,967**	0,245
S_{10}	-0,613	-0,399	**-0,675**
S_{11}	0,635	0,203	**0,713**
S_{12}	0,601	0,335	**0,720**
S_{13}	0,462	0,366	**0,784**
S_{14}	**0,835**	0,072	0,529
λ_j	6,963	1,692	5,105
δ, %	0,497	0,121	0,365

Главные компоненты равны:

$$Y_1 = \frac{1}{6{,}963}(0{,}820\overline{S_1} + 0{,}827\overline{S_2} + 0{,}784\overline{S_3} +$$

$$+ 0{,}922\overline{S_4} + 0{,}834\overline{S_5} + 0{,}939\overline{S_8} + 0{,}939\overline{S_{14}}),$$

$$Y_2 = \frac{1}{1{,}692} \cdot 0{,}967\overline{S_9},$$

$$Y_3 = \frac{1}{5{,}105} \cdot (-0{,}736\overline{S_6} + 0{,}818\overline{S_7} - 0{,}675\overline{S_{10}} +$$

$$+0{,}713\overline{S_{11}} + 0{,}720\overline{S_{12}} + 0{,}784\overline{S_{13}}).$$

Таким образом, размерность системы сократилась с 14 до 3.

В результате получили описание макросистемы в виде случайного вектора $\mathbf{Y} = (Y_1, Y_2, Y_3)$. С учетом матрицы факторного отображения сформируем теперь сокращенное описание системы (табл. 6).

Гипотеза о нормальном распределении элементов полученной макросистемы не отвергается критерием Шапиро – Уилка на уровне значимости $\alpha = 0{,}1$.

Ковариационная матрица для $\mathbf{Y} = (Y_1, Y_2, Y_3)$:

$$\mathbf{\Sigma} = \begin{pmatrix} 0{,}653 & 0{,}111 & 0{,}590 \\ 0{,}111 & 0{,}299 & 0{,}230 \\ 0{,}590 & 0{,}230 & 0{,}668 \end{pmatrix}.$$

Таблица 6

Годы	Y_1	Y_2	Y_3
2000	–0,973	–0,957	–1,331
2001	–0,880	–0,804	–1,316
2002	–0,773	–0,132	–0,919
2003	–0,661	0,116	–0,553
2004	–0,525	0,617	–0,285
2005	–0,366	0,457	0,091
2006	–0,139	0,300	0,356
2007	0,221	–0,037	0,738
2008	0,559	–0,093	0,745
2009	0,940	1,021	0,864
2010	1,165	0,027	0,815
2011	1,432	–0,513	0,794

Пусть экспертным путем установлено, что вложение единицы ресурсов (например, финансовых) в каждое отдельно взятое *i*-е направление приведет к увеличению дисперсии соответствующего показателя Y_i на значение согласно табл. 7. Как случается в практических задачах, количество ресурсов ограниченно и равно *K*.

Таблица 7

Фактор	Y_1	Y_2	Y_3
Прирост дисперсии	d_1	d_2	d_3

Искомому распределению ресурса в виде точки $C = (C_1, C_2, C_3)$ представлен в соответствие вектор с независимыми компонентами

$$U = (U_1, U_2, U_3),\ U_i \sim N(a_i, \sigma_{U_i}),$$

где $\sigma^2_{U_i} = C_i d_i$ – число, на которое повысится дисперсия Y_i при вложении C_i ресурсов.

Тогда имеем задачу:

$$\begin{cases} \dfrac{1}{2}\ln\left[(2\pi e)^3 \left|\mathbf{\Sigma}^*\right|\right] \to \max\limits_{C_i}, \\ \sum\limits_{i=1}^{3} C_i = K, \\ C_i \geq 0, \\ \operatorname{cov}(U_i, Y_j) = \operatorname{cov}(U_i, U_j) = 0,\ i, j = 1, 2, 3, \end{cases}$$

где ковариационная матрица равна

$$\mathbf{\Sigma}^* = \begin{pmatrix} 0{,}653 + C_1 d_1 & 0{,}111 & 0{,}590 \\ 0{,}111 & 0{,}299 + C_2 d_2 & 0{,}230 \\ 0{,}590 & 0{,}230 & 0{,}668 + C_3 d_3 \end{pmatrix}.$$

Установлено, что для решения задачи максимизации энтропии одним из наиболее эффективных численных методов нулевого порядка является комплексный метод Бокса.

Решение задачи $\mathbf{C}^* = (C_1^*, C_2^*, C_3^*)$ обеспечит максимальный прирост энтропии для вектора $\mathbf{Y} = (Y_1, Y_2, Y_3)$ при имеющихся ресурсах.

Выводы

1. Единый критерий эффективности управления системой, в виде показателя уровня ее энтропии, обеспечивает возможность практического анализа состояния системы и выбор пути воздействия на нее.
2. Энтропийно-вероятностный подход универсален для широкого круга моделируемых систем.
3. Факторный анализ позволяет формировать систему признаков сложной системы для произвольного количества исходных признаков.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта 12-М-127-2049 фундаментальных исследований УрО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Прангишвили И. В. Энтропийные и другие системные закономерности: Вопросы управления сложными системами. М. : Наука, 2003. 428 с.
2. Тырсин А. Н., Соколова И. С. Энтропийно-вероятностное моделирование гауссовских стохастических систем // Математическое моделирование. 2012. Т. 24. № 1. С. 88–102.
3. Жизнеспособность предприятия: эффективность и безопасность : аналит. зап. по материалам семинара, Бакал, 10–15 апр. 2000. Челябинск : Бакальские рудники, 2000. 46 с.

4. Седова О. С. Снижение производственного травматизма на основе управления организационными рисками на угольных шахтах // Горный информ.-аналит. бюл. 2007. Т. 4. № 1. с. 245–253
5. Борисов В. А. Демография. М. : ИД NOTABENE, 1999. 2001. 272 с.
6. Медков В. М. Демография : учеб. пособие. Ростов-на-Дону : Феникс, 2002. 448 с.
7. Думная Н. Н. Грязнова А. Г. Макроэкономика. Теория и российская практика : учебник. М. : КНОРУС. 2004. 608 с.

УДК 532. 62

Ванчиков Виктор Цыренович,
к. т. н., докторант кафедры «Управление техническими системами», ФГБОУ ВПО ИрГУПС
Мухопад Александр Юрьевич,
к. т. н., докторант кафедры «Управление техническими системами», ФГБОУ ВПО ИрГУПС
Ванчиков Артур Викторович,
аспирант Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления, г. Улан-Удэ
Мухопад Юрий Федорович,
д. т. н., профессор кафедры «Управление техническими системами», ФГБОУ ВПО ИрГУПС

УПРОЧНЕНИЯ МНОГОСЛОЙНОЙ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ В НАНОТЕХНОЛОГИЯХ

V.C. Vanchikov, A.Yu. Mukhopad, A.V. Vanchikov, Yu.F. Mukhopad

REINFORCEMENT OF A LAMINATE FILM OF A FLUID IN NANOTECHNOLOGIES

Аннотация. *В статье рассматривается возможность замены в электронных устройствах полупроводников на аморфные органические материалы в виде многослойной пленки. Для получения бездефектной тонкой пленки органического материала предлагается подвергать растворы внешнему воздействию реализуемого потоком жидкости. Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден предлагаемый метод упрочнения тонкой пленки. Показано, что при числе Рейнольдса примерно равного шести можно получить прочные тонкие пленки.*

Ключевые слова: *пленка, многослойная структура, капилляр, упорядоченная структура, ламинарное течение, упрочнение.*

Abstract. *In paper substitution possibility in electronic arrangements of semiconductors on amorphous organic materials in the form of a laminate film is observed. For deriving of a faultless thin film of an organic material it is offered to expos solutes to an exposure implemented by a fluid stream. It is theoretically justified and experimentally the offered method of a reinforcement of a thin film is confirmed. It is displayed that at a Reynolds number about equal six it is possible to gain strong thin films.*

Keywords: *film, a multilayer structure, a capillary, ordered arrangement, a laminar flow, a reinforcement.*

Органическая электроника – одно из самых новых и перспективных направлений в электронике, ставящее своей целью перевод электронных устройств на новую элементную базу, где в качестве альтернативы кристаллическим полупроводникам предлагаются аморфные органические материалы. Развитие этого подхода в микроэлектронике требует решения ряда проблем. Одной из актуальных задач является разработка простых методов упорядочения структуры органических материалов. Для получения многослойных покрытий используется метод молекулярно-лучевой эпитаксии, который позволяет наносить на поверхность подложки многослойные кристаллические пленки. В этой связи в работе [1] утверждается, что формируемые пленки имеют идеальную кристаллическую структуру, в точности воспроизводящую структуру подложки. Из этого следует, что такая бездефектная структура должна обеспечивать высокую сдвиговую устойчивость пленки к разрушающему внешнему воздействию. Однако в работе [2] сказано, что полученные искусственным путем материалы с наноструктурой очень часто обладает слабой устойчивостью к внешним воздействиям. Методов управления структурой таких материалов не существует из-за отсутствия знаний о фундаментальных физических закономерностях их образования и поведения. Кроме того, исследование многослойной пленки с нанометровой толщиной слоев сдерживается сложностью методик вакуумного напыления, требующих дорогого и сложного оборудования.

При нанесении покрытия используется метод осаждения пара на твердую поверхность (мишень); при этом мишень переводят в парообразное состояние испарением в катодных пятнах вакуум-

ной дуги или распылением ионной бомбардировкой в тлеющем разряде. Недостатком испарения является то, что поток металлической плазмы содержит микроскопические жидкие капли испаряемого материала. При распылении одной из основных проблем является транспортировка пара до покрываемой поверхности [3]. В качестве альтернативной технологии изготовления многослойных металлических систем используются методы химического и электрохимического нанесения слоев из растворов [4]. Кроме того, существуют низкотемпературные плазмохимические методы выращивания пленок на подложке, в которых для кристаллизации аморфных кластеров применяют как печные отжиги, так и импульсные отжиги с применением лазеров [5].

Между тем искусственно или естественно упорядоченная система частиц с нанометрическими размерами обеспечивает возникновение у некоторых веществ ранее неизвестных механических, химических, электрофизических и других свойств, проявляющихся в виде квантово-размерных, синергетически-кооперативных и других эффектов; следствием наноразмерных эффектов упорядочения являются сверхпрочность, сверхпластичность, низкий износ и т. д. [6]. В этой связи интенсивно исследуется детальный механизм скачкообразного изменения у системы частиц их физических параметров. Результаты многолетних исследований низкоразмерных структур позволяют выделить некоторые общие свойства. Наблюдается изменение геометрической структуры по сравнению с объемным материалом. Поэтому исследование механизма и разработка методики упорядочения частиц многослойной неподвижной пленки вязкой несжимаемой жидкости на поверхности твердого тела, в результате чего происходит более компактная упаковка слоев, приобретает весьма актуальное значение. Это направление как парадигма представляет теоретический и большой технологический интерес с точки зрения понятия «нанотехнология» в биологии, медицине, технике.

Целью работы является разработка способа получения многослойной пленки вязкой несжимаемой жидкости с компактной упаковкой слоев и его экспериментальная реализация.

Постановка задачи

Хаотичная бомбардировка микрочастицами или каплями расплава поверхности наращиваемой пленки образует на ней поочередно слои с неровными поверхностями; и этот неконтролируемый процесс приводит к формированию неоднородной микроструктуры пленки. Кроме того, небольшой размер вакуумных камер газоразрядных устройств затрудняет использование дополнительных средств, разрешающих задачу искусственного упорядочения структуры покрытия. Для получения бездефектной тонкой пленки, состоящей из множества слоев, при использовании методов электронно-лучевого напыления, магнетронного распыления, осаждения из коллоидных растворов или при химическом и электрохимическом нанесении слоев из растворов требуется подвергать «притирающему» внешнему воздействию молекулярно-шероховатую поверхность пленки; в результате можно получить более компактную упаковку слоев.

Структуру покрытия можно упорядочить, если использовать проявление «латентного периода ориентации молекул смазочной жидкости» на неподвижной твердой поверхности по направлению перемещения другой твердой поверхности. В результате «притирающего» воздействия на частицы смазки [7, 8, 9] вышеуказанное явление увеличивает «сдвиговую устойчивость» граничного слоя жидкости. Образуется пристенный слой, представляющий собой многослойную пленку, толщина которой составлена из множества последовательно сформированных наслоений. Для этой цели использована способность потока жидкости оказывать «притирающее» усилие на молекулы, находящиеся неподвижно на «поверхности» граничного слоя. В этом случае использовано свойство касательной составляющей силы динамического давления потока, которое «разглаживает» молекулярно-шероховатую «поверхность» неподвижного граничного слоя жидкости.

В этой связи возникает задача проведения экспериментального исследования и теоретического обоснования, указывающих на возможность реализации метода упрочнения тонкой пленки с использованием указанного режима течения.

Методика экспериментального исследования

В соответствии с теорией изотермической гидромеханики вязкой несжимаемой жидкости при постановке эксперимента в качестве модели расплавленного материала используем воду (в экспериментальной гидродинамике модельные эксперименты проводятся с использованием воды при комнатной температуре и атмосферном давлении [10]). Кроме того, в соответствии с работой [11] требуется обеспечить равномерное течение. Такое течение реализуется в горизонтально расположенном капилляре. Тогда из рассмотрения исключаются силы тяжести и конвективные составляющие сил инерции, затрудняющие анализ. В соответствии с этими условиями изготовлен капиллярный прибор специальной конструкции с горизонтальным расположенным капилляра [12]. Схема прибора приведена на рис. 1. Для обеспечения равномерного течения поддерживалось постоянство поверхности уровня в напорном сосуде 1, объем которого примерно равнялся 2 л. При этом постоянная высота уровня в сосуде 1 обеспечивалась сливной трубкой 3 и регулированием расхода

жидкости через трубку 6 вентилем 5. Успокоительная решетка 4 с размером отверстий порядка 1 мм устанавливалась на произвольной высоте выше расположения капилляра (она служит для гашения случайных возмущений, приносимых потоком). Сосуд 1 имеет сечение, намного превышающее диаметр капилляра 2, – для поддержания постоянной величины перепада давления. Капилляр 2 имеет длину 2 см, диаметр 0,2 мм. Жидкость, находящаяся ниже уровня расположения капиллярной трубки (уровень 0–0), выполняет задачу гравитационного уловителя от случайных примесей.

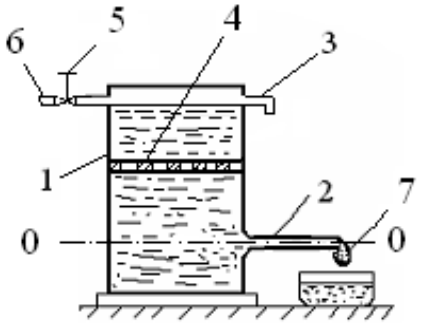


Рис. 1. Схема прибора для определения силы адгезии жидкости и твердого тела

Вместе с тем, движущейся силе давления противодействуют силы внутреннего трения между слоями жидкости, силы адгезии частиц потока с микрочастицами стенки капилляра, сила поверхностного натяжения, которые совместно формируют сферу капли 7 на конце капилляра. Капля отрывается в тот момент, когда ее вес станет равным или превысит на бесконечно малую величину силу поверхностного натяжения, удерживающую каплю. Такое взаимодействие сил, имеющих постоянное значение при одинаковых условиях проведения опыта, обеспечивает постоянство объема капли с течением времени при уменьшении просвета капилляра в случае увеличения толщины неподвижного граничного слоя жидкости на микроскопическую величину (вполне удовлетворительное для количественной оценки весьма малых изменений расхода, наблюдаемых в опытах [6, 8, 9, 11]). Измерение быстроты наполнения мерного сосуда постоянного и малого объема (вместимости капли) позволяет определить уменьшение объемного расхода в долях микролитра, что, в свою очередь, позволяет регистрировать увеличение толщины неподвижного граничного слоя на стенке капилляра на величину порядка нескольких слоев.

Правомерность такого представления подтверждается тем, что в работе [13] показано, что метод взвешивания капель является довольно точным методом определения величины поверхностной свободной энергии. При этом необходимо отметить, что устранение систематической методической погрешности от фактора механической нестабильности – образующейся цилиндрической шейки на последней стадии формирования сферы капли – достигается требованием медленного наполнения объема капли. Это обстоятельство связано с тем, что уравновешивающая сила поверхностного натяжения должна быть соизмерима с силами, которые действуют разрушающе на неустойчивую жидкую цилиндрическую шейку. Преждевременный разрыв шейки предотвращается уменьшением быстроты наполнения мерного сосуда. Так, например, если сфера капли формируется в течении 60 с, то погрешность измерения составляет всего 0,2 %. При устранении методических и инструментальных погрешностей точность определения поверхностного натяжения этим методом достигает 0,1 %.

Для определения влияния на результаты опытов материала капилляра применены капилляры из пирексового стекла, нержавеющей стали. Кроме того, в опытах использована дистиллированная и бидистиллированная вода.

Опыты проводятся в максимально стабильных условиях.

Результаты измерения времени наполнения мерного сосуда малой вместимости

На рис. 1 показано оборудование, необходимое для проведения работы: прибор для определения силы адгезии жидкости и твердого тела, из которого через капиллярную трубку каплями вытекает бидистиллированная вода. При этом для прямого измерения времени наполнения мерного сосуда постоянного и малого объема (вместимости капли) используется секундомер с пределами измерения от 0 до 30 мин, с ценой деления 0,2 с, с абсолютной инструментальной погрешностью ± 1 с за 30 мин.

Обозначим длительность наполнения мерного сосуда в начале эксперимента через tn. Этот период характеризуется равномерностью толщины неподвижного граничного слоя жидкости на стенке капилляра, отсутствием уменьшения просвета капилляра и постоянством величины объемного расхода воды.

Данные, полученные в ходе измерения времени наполнения мерного сосуда tn в начальный период проведения эксперимента – в точке ξ, приведенной на рис. 2 (когда начался процесс увеличения толщины граничного слоя жидкости на стенке капилляра), сведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что среднее арифметическое значение длительности наполнения мерного сосуда $< t_n > \approx 46{,}08$ с.

Таблица 1

Результаты измерения времени наполнения мерного сосуда постоянной и малой вместимости t_n

№ измерения	t_n , с	$\lvert t_n - < t_n > \rvert$, с	$(t_n - < t_n >)^2$, $с^2$
1	46, 4	0,32	0,1024
2	46,2	0,12	0,0144
3	45,8	0,28	0,0784
4	45,8	0,28	0,0784
5	46,2	0,12	0,0144

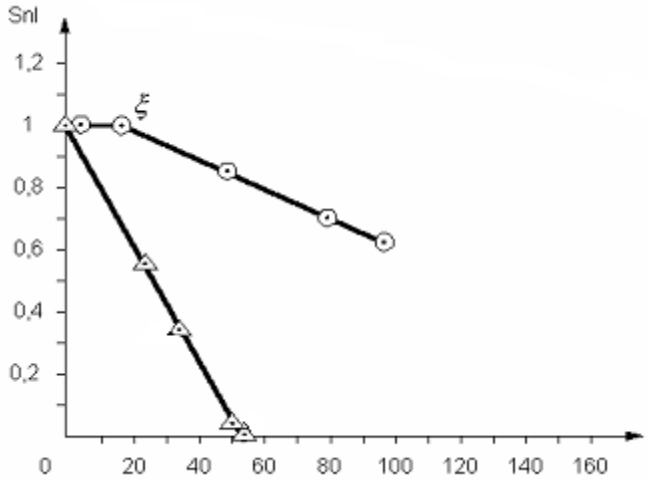


Рис. 2. Зависимость закрытия просвета капилляра от времени (при укладке на его стенке частиц ламинарного потока в виде многослойной пленки вязкой несжимаемой жидкости)

Если систематическими погрешностями можно пренебречь, а случайные погрешности подчиняются распределению Гаусса, то при числе измерений $n = 5$ с надежностью, приблизительно равной 2/3, можно принять, что абсолютная погрешность равна стандартной (среднеквадратичной) погрешности [14]:

$$\delta\,(t_n) = \sqrt{\frac{\sum_{1}^{n}\left(t_n - \langle t_n \rangle\right)^2}{n(n-1)}}\ \text{с} \approx 0{,}12\ \text{с}.$$

Из таблицы значений коэффициентов Стьюдента находим для пяти измерений с надежностью, приблизительно равной 2/3, коэффициент, равный 1,2. Тогда

$$<t_n> = (46{,}08 \pm 0{,}14)\ \text{с}.$$

Полагая, что погрешность, вносимая секундомером, равна $\pm 0{,}5$ цены наименьшего деления его шкалы (0,1 с), найдем стандартную погрешность измерения времени наполнения мерного сосуда в начале эксперимента – когда еще не начался процесс увеличения толщины граничного слоя жидкости на стенке капилляра [14]:

$$\delta\, t_n = \sqrt{(0{,}14)^2 + (0{,}1)^2}\ \text{с} \approx 0{,}2\ \text{с}.$$

Таким образом, в результате измерения времени наполнения мерного сосуда – в начале эксперимента – получено:

$$t_n = (46{,}1 \pm 0{,}2)\ \text{с}.$$

При этом относительная погрешность измерения времени наполнения мерного сосуда составила:

$$\varepsilon = \frac{0{,}2}{46{,}1} \times 100\ \% \approx 0{,}4\ \%.$$

Для того чтобы определить величину расхода в указанной выше точке ξ, в работе [11] использовался метод взвешивания капель (приведенный в работе [13]), который позволяет достаточно точно определить вес, приходящейся на одну каплю. В результате определен вес одной капли воды, равный (46,0 ± 0,1) мг; причем масса капли распределена в объеме, равном (46,0 ± 0,1) микролитров (мкл).

Таким образом, в работах [9, 11] определяется переход ламинарного течения вязкой несжимаемой жидкости при расходе, приблизительно равном 1 мкл/с, в другой (особый) вид течения, характеризуемый процессом укладки частиц потока на стенке капилляра в виде толстой неподвижной пленки, состоящей из упорядоченных мультимолекулярных слоев. Результат расчета, полученный в этой работе, с учетом указанного расхода дает число Рейнольдса, приблизительно равное 6,3.

Между тем в указанных работах предполагалось, что из-за микроскопического размера молекулы потока жидкости, прилипающей к «поверхности» неподвижного граничного слоя (молекулы которого обездвижены силами адгезии микрочастиц стенки капилляра), проходное сечение капилляра уменьшается на микроскопическую величину. В процессе образования пленки, состоящей из мультимолекулярных слоев, на стенке капилляра величина такого микроскопического су-

жения просвета капилляра с течением времени, измеряемой десятками часов, приведет к макроскопически заметному уменьшению величины расхода. Это явление должно сопровождаться таким увеличением длительности наполнения мерного сосуда постоянной и малой вместимости, зависящего от объема капли, которую уже можно измерить, например, секундомером.

Из рис. 2 видно, что с течением времени t, равном 23 ч 48 мин., наблюдается сужение площади просвета капилляра $S_L = \pi r^2$. Образование мультимолекулярных наслоений на стенке капилляра из нержавеющей стали приводит к относительному изменению эффективной площади поперечного сечения капилляра. Это явление объясняется закрытием просвета капилляра $S_{nL} \approx 0{,}550$. Это приводит к увеличению времени наполнения мерного сосуда постоянной и малой вместимости приблизительно на 82 %. Для капилляра из пирексового стекла время сужения составляет 42 ч 18 мин, и при $S_{nL} \approx 0{,}851$ длительность наполнения этого же мерного сосуда возрастает приблизительно на 18 %.

Отношение величины сужения площади просвета капилляра $S_L = \pi\, r_L^{\,2}$ к величине площади поперечного сечения капилляра, когда отсутствует процесс прилипания частиц потока к граничному слою $S_n = \pi\, r_n^{\,2}$, т. е. когда не происходит утолщения неподвижного пристенного слоя жидкости обозначен через S_{nL} [6]. Безразмерная величина S_{nL} показывает, что, измеряя быстроту наполнения мерного сосуда постоянной и малой вместимости, т. е. выполняя прямое измерение времени наполнения объема капли, можно оценивать косвенно изменение толщины неподвижного граничного слоя, или, точнее, закрытие просвета капилляра:

$$\frac{t_n}{t_L} = \frac{\pi r_L^{\,2}}{\pi r_n^{\,2}} = S_{nL}, \qquad (1)$$

где $t_L = (t_n + \Delta\, t)$ – увеличение длительности наполнения мерного сосуда постоянной и малой вместимости на величину Δt, обусловленное уменьшением расхода – вследствие перекрытия просвета капилляра утолщением неподвижного граничного слоя. К примеру, в результате прямых измерений времени наполнения объема капли в точке t, равной 23 ч 48 мин, приведенной на рис. 2, получено значение $t_L = (83{,}8 \pm 0{,}2)$ для капилляра из нержавеющей стали; в точке t, равной 42 ч 18 мин – значение $t_L = (54,\, 2 \pm 0{,}2)$ для капилляра из пирекса. Исходя из этих значений t_L, определим среднее арифметическое значение закрытия просвета капилляра из нержавеющей стали

$$< S_{nL} > = \frac{46{,}1c}{83{,}8c} \approx 0,\, 550;$$

для капилляра из пирекса

$$< S_{nL} > = \frac{46{,}1c}{54{,}2c} \approx 0{,}851.$$

Относительная стандартная погрешность определения величины закрытия просвета капилляра из нержавеющей стали составляет

$$\delta\, S_{nL} / < S_{nL} > = \sqrt{(0{,}2/46{,}1)^2 + (0{,}2/83{,}8)^2} \approx \approx 4{,}9\times 10^{-3}.$$

Тогда стандартная погрешность величины закрытия просвета капилляра из нержавеющей стали

$$\delta\, S_{nL} = 0{,}550\times 4{,}9\times 10^{-3} \approx 0{,}003.$$

Округляя полученные значения, запишем окончательный результат в виде

$$S_{nL} = (0{,}550 \pm 0{,}003).$$

Относительная погрешность косвенного измерения закрытия просвета капилляра из нержавеющей стали приблизительно равна 0,5 %.

Аналогично получим для капилляра из пирекса

$$S_{nL} = (0{,}851 \pm 0{,}004).$$

Относительная погрешность косвенного измерения закрытия капилляра из пирекса приблизительно равна 0,5 %.

Таким образом, результаты измерений времени наполнения мерного сосуда показали возможность искусственного упорядочения структуры тонкой пленки в зависимости от качества материала. По аналогии расплавление материала на поверхности твердого тела, которое происходит под действием силы динамического давления потока и взаимодействия силы адгезии микрочастиц твердой поверхности, зависит от качества материала.

Обратимся теперь к формуле расхода Гагена – Пуазейля, с помощью которой покажем правомерность предположения о сужении просвета капилляра, происходящего в результате процесса утолщения неподвижной пленки жидкости на стенке капилляра, а также теоретически обоснуем экспериментально полученное соотношение (1):

$$\frac{V}{t_n} = \frac{\pi r_n^{\,2}}{4\eta} \cdot \frac{r_n^{\,2}}{2} \cdot \frac{\Delta p}{L}, \qquad (2)$$

где V – объем мерного сосуда постоянной и малой вместимости (капли); t_n – время наполнения объема V; $\pi\, r_n^{\,2}$ – площадь поперечного сечения капилляра; r_n – радиус капилляра (при этом множитель $(r_n^{\,2})/\,2$ количественно выражает влияние сил адгезии частиц потока жидкости с микрочастицами стенки капилляра на кинематические характеристики течения или, иными словами, учитывается результирующий фактор одновременного процесса прилипания частиц потока жидкости к стенке капилляра и отрыва этих частиц от последнего);

Δp – перепад давлений на концах трубки; η – динамическая вязкость; L – длина капиллярной трубки.

В формуле (2) при фиксированной величине перепада давлений Δp значение r_n (радиус эффективного сечения капилляра с учетом вычета микроскопической толщины неподвижного граничного слоя) после точки ξ, показанной на рис. 2, уменьшается с течением времени t, вследствие чего будет увеличиваться время наполнения мерного сосуда, а остальные величины – при одних и тех же контролируемых условиях проведения эксперимента – остаются постоянными.

Далее обозначим через t_L время наполнения объема капли, достаточное для «эффекта накопления» последовательных микроскопических уменьшений величины поперечного эффективного сечения капилляра на размер прилипающих к стенке молекул жидкости в макроскопически измеряемое наслоение; в результате указанный эффект приводит к реализации возможности прямого измерения t_L. Действительно, после точки ξ – при продолжительном наблюдении – можно проводить прямое измерение увеличения времени наполнения мерного сосуда t_L, обусловленного уменьшением расхода из-за сужения просвета капилляра при утолщении граничного слоя на Δr.

Вышеуказанный процесс замедленного наполнения мерного сосуда представим следующим образом:

$$\frac{V}{t_L} = \frac{\pi r_n^{\,2}}{4\eta} \cdot \frac{r_L^{\,2}}{2} \cdot \frac{\Delta p}{L}, \qquad (3)$$

где $r_L = (r_n - \Delta r)$ – радиус капилляра, уменьшенный на величину утолщения неподвижного граничного слоя Δr; t_L – время наполнения мерного сосуда постоянной и малой вместимости V.

Уменьшение просвета капилляра, обусловленное утолщением граничного слоя, определяется отношением величин расхода V/t_L из выражения (3) к расходу V/t_n, приведенного в (2):

$$\frac{V}{t_L} : \frac{V}{t_n} = \frac{\pi r_n^{\,2}}{4\eta} \cdot \frac{r_L^{\,2}}{2} \cdot \frac{\Delta p}{L} : \frac{\pi r_n^{\,2}}{4\eta} \cdot \frac{r_n^{\,2}}{2} \cdot \frac{\Delta p}{L}.$$

Отсюда находим

$$\frac{t_n}{t_L} = \frac{\pi r_L^{\,2}}{\pi r_n^{\,2}}. \qquad (4)$$

Обозначая $\pi r_n^{\,2}$ через S_n, $\pi r_L^{\,2}$ – S_L, получим

$$\frac{t_n}{t_L} = \frac{S_L}{S_n} = S_{nL}.$$

Кроме того,

$$t_n S_n = t_L S_L = K,$$

где K – постоянная величина. Из соотношения (4) следует, что произведение времени наполнения мерного сосуда постоянной и малой вместимости – объема капли – на площадь поперечного сечения капилляра есть величина постоянная.

Соотношения (2)–(4) составляют основу теоретического обоснования экспериментально полученного результата (1), который показывает, что, проводя прямое измерение мерного сосуда постоянной и малой вместимости – объема капли, – можно косвенно оценивать сужение просвета капилляра, обусловленное утолщением неподвижного граничного слоя вязкой несжимаемой жидкости на стенке капилляра.

Результаты измерения утолщения граничного слоя вязкой несжимаемой жидкости в капилляре

Микроскопический размер частицы жидкости, прилипающей слоями на стенке капилляра, а также неразличимость частицы потока и частицы неподвижного граничного слоя не позволяет прямым измерением определить величину утолщения граничного слоя вязкой несжимаемой жидкости на стенке капилляра. Для косвенного измерения величины утолщения граничного слоя воспользуемся соотношением (1) и, преобразуя его, получим

$$S_{nL} = \frac{\pi r_L^{\,2}}{\pi r_n^{\,2}} = \frac{(r_n - \Delta r)^2}{r_n^{\,2}} = 1 - \left(\frac{2\Delta r}{r_n} - \frac{\Delta r^2}{r_n^{\,2}} \right), \qquad (5)$$

где $(2\Delta r) / r_n$ – уменьшение просвета капилляра с течением времени t после точки ξ, приведенной на рис. 2. Если пренебречь величиной $\Delta r^2 / r_n^{\,2}$ из-за ее чрезмерной малости, то равенство (5) можно представить в таком виде:

$$S_{nL}(t) = 1 - (2\Delta r) / r_n, \qquad (6)$$

С течением времени t_ξ процесс прилипания частиц потока к неподвижному граничному слою приводит к утолщению последнего, что сопровождается сужением просвета капилляра, которое уменьшает расход жидкости, т. е. после точки ξ, приведенной на рис. 2, эффективное сечение капилляра уменьшается во времени от 0 до t_ξ:

$$\int_0^{t_\xi} (2\Delta r / r_n)\, \mathrm{d}\, t = (2\Delta r / r_n)\, t_\xi,$$

где t_ξ – время в часах, отсчет которого ведется от точки ξ, принятой за нуль.

Обозначая утолщение неподвижного граничного слоя $(2\Delta r/r_n)$, происходящее в течение одного часа, через ξ, получим

$$S_{nL} = 1 - \xi\, t_\xi, \qquad (7)$$

где $S_{nL} = 1$ – отражает режим течения жидкости в капиллярной трубке, когда не происходит утолщение неподвижного граничного слоя жидкости; $\xi\, t_\xi$ – процесс утолщения неподвижного граничного слоя с течением времени t_ξ. Ясно, что когда $\xi\, t_\xi = 0$,

то $S_{nL} = 1$. Если $\xi\ t_{\xi} = 1$, то $S_{nL} = 0$; т. е. полностью перекрывается просвет капилляра, тем самым прекращается течение жидкости через капиллярную трубку.

Поэтому в работе [11] режим течения, когда образуется мультимолекулярные слои вязкой несжимаемой жидкости на стенке капилляра, определялся числом Рейнольдса.

Из уравнений (2) и (3), а также используя гидравлическую форму уравнения неразрывности, определим среднюю скорость течения воды в капилляре:

$$v = \left(\frac{V}{t_n}\right) : S,$$

где S – площадь поперечного сечения трубки.

Подставляя вышеуказанное значение порогового расхода воды, приблизительно равное 1 мкл/с, а также значение радиуса капилляра 2 (рис. 1), найдем

$$v \approx 0{,}032 \text{ м/с}.$$

Далее, взяв в качестве характерного размера диаметр капилляра в формуле, определяющей число Рейнольдса, и подставляя в нее найденное значение скорости, определим

$$\mathrm{Re} = F_i / F_\eta \approx 6{,}3 \approx 2\ \pi.$$

В работе [8] показано, что при деформации сдвига кристалл с идеальной структурой и граничный слой жидкости в капилляре ведут себя практически одинаково. При этом коэффициент пропорциональности $1/2\pi$ между величиной предельной нагрузки (прочности) и модулем сдвига кристалла с идеальной структурой, установленный Я.И. Френкелем, количественно совпадает с коэффициентом пропорциональности между силами F_η вязкости и силами F_i инерции:

$$F_\eta = F_i / 2\pi\ .$$

Кроме того, в работе [15] показано, что граничный слой вязкой несжимаемой жидкости, обездвиженной силами адгезии стенки капилляра, проявляет свойство, присущее кристаллу с идеальной структурой, т. е. имеет бездефектную структуру.

Механизм когезии частиц ламинарного потока вязкой несжимаемой жидкости к неподвижному граничному слою на качественном уровне можно представить следующим образом. Ориентирующее воздействие силы динамического давления потока по направлению течения на частицы граничного слоя приводит к упорядочению структуры последнего. Процесс упорядочения сопровождается усилением межмолекулярных связей, что приводит к увеличению «сдвиговой прочности» граничного слоя. Кроме того, в соответствии с эффектом Максвелла [16] частицы потока ориентированы по направлению течения. Между слоями потока и упорядоченно расположенными слоями на «поверхности» граничного слоя возникает дополнительная сила взаимодействия, обусловленная появлением у последнего избыточной когезионной энергии [17], сопровождаемая процессом прилипания частиц потока, что приводит к образованию мультимолекулярных неподвижных слоев вязкой несжимаемой жидкости на поверхности твердого тела.

Выводы

1. Результаты измерений времени наполнения мерного сосуда постоянной и малой вместимости подтверждают возможность реализации метода искусственного упорядочения структуры тонкой пленки расплавленного материала на поверхности твердого тела, которое происходит под действием силы динамического давления потока и закрепляется в таком положении силами адгезии микрочастиц твердой поверхности.

2. Анализ результатов косвенного измерения закрытия просвета капилляра для ламинарного течения вязкой несжимаемой жидкости показал, что произведение времени наполнения мерного сосуда постоянной и малой вместимости (объема капли) на площадь поперечного сечения капилляра есть величина постоянная.

3. Показано, что при течении расплавленного материала, характеризуемого числом Рейнольдса, приблизительно равном 6,3, можно получить тонкие пленки, обладающие высокой сдвиговой устойчивостью к разрушающему внешнему воздействию.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Влияние дефектов структуры на поведение незамкнутых кристаллических наноструктур / С. Г. Псахье и др. // Изв. вузов. Физика. 2009. № 6. С.49–53.
2. Дмитриев С. В., Потекаев А. И., Самсонов А. В. Длиннопериодические состояния кристаллической системы частиц конечных размеров // Изв. вузов. Физика. 2009. № 6. С. 68–81.
3. Компактный источник пара материала проводящей мишени, распыляемой ионами с энергией 3 кэВ при давлении 0,05 Па / С. Н. Григорьев и др. // ПТЭ. 2009. № 5. С. 127.
4. Установка для получения металлических многослойных покрытий с нанометровой толщиной слоев / Г. В. Струков и др.// ПТЭ. 2009. № 5. С. 123.
5. Бугаев К. О., Володин В. А. Формирование нанокластеров кремния в пленках SiNx : H с применением печных отжигов с давлением до 11 килобар и исследование их оптических свойств

// Нанотехнология: Наука и производство. № 2. 2010. С. 70–76.
6. Холмогоров И. В., Ванчиков В. Ц. Адгезия жидкости при обтекании поверхности твердого тела // Вестник машиностроения. 2008. № 6. С. 33.
7. Ахматов А. С. Молекулярная физика граничного трения. М. : Физматгиз, 1963. С. 208.
8. Там же, с. 367.
9. Там же, с. 369.
10. Ванчиков В. Ц. Несущая способность смазки // Вестник машиностроения. 2007. № 1. С. 37.
11. Ванчиков В. Ц. Наноразмерный эффект сил Ван-дер-Ваальса в граничном слое жидкости // Вестник машиностроения. 2008. № 6. С. 35.
12. Емцов Б. Т. Техническая гидромеханика. М. : Машиностроение, 1978. С. 134.
13. Ванчиков В. Ц. Метод определения сил когезии в вязком подслое // Вестник машиностроения. 2007. № 6. С. 40.
14. Ванчиков В. Ц. Устройство определения силы адгезии жидкости и твердого тела // Патент на полезную модель № 72764 РФ. Опубл. 27.04. 2008. Бюл. № 12.
15. Адамсон А. Физическая химия поверхностей. М. : Мир, 1978. С. 22–24.
16. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике. М. : Наука, 1990. С. 582–585.
17. Ванчиков В. Ц. Адгезия жидкости к твердой поверхности обтекания // Вестник машиностроения. 2009. № 11. С. 27–30.
18. Михайлов И. Г., Соловьев В. А., Сырников Ю. П. Основы молекулярной акустики М. : Наука, 1964. С. 426.
19. Ванчиков В. Ц. Гидродинамические свойства и методы управления вязким подслоем технических систем : дисс. … канд. техн. наук. Улан-Удэ: Восточно-Сибирский гос. технол. ун-т, 2001.

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
Лыткина Елена Михайловна,
к. т. н., доцент, Иркутский государственный университет путей сообщения, тел. (395-2) 638-357, e-mail: vgozbenko@yandex.ru

КОЛЕБАНИЯ ЭКИПАЖА С УПРУГО-ПОДВЕШЕННЫМ ГРУЗОМ ПРИ СИЛОВОМ ВОЗМУЩЕНИИ

A.A. Akhmadeeva, V.E. Gozbenko, E.M. Lytkina

OSCILLATIONS OF A VEHICLE WITH THE ELASTIC-SUSPENDED CARGO AT FORCE PERTURBATION

Аннотация. *Рассмотрена задача построения математической модели вынужденных колебаний системы «вагон – груз». Получены дифференциальные уравнения колебаний и рассмотрена возможность использования данной системы в виде динамического гасителя колебаний груза. Приведены условия гашения колебаний груза и амплитудно-частотные характеристики.*

Ключевые слова: *вынужденные колебания, силовое возмущение, вагон, груз, резонанс, амплитудно-частотная характеристика, частные решения.*

Abstract. *The problem of construction of mathematical model of constrained oscillations of «carriage – cargo» system is observed, the differential equations of oscillations are gained, and the possibility of using the given system in the form of a dynamic suppressor of oscillations of a cargo is observed. Conditions of blanking out oscillations of a cargo and amplitude-frequency characteristics are resulted.*

Keywords: *constrained oscillations, force perturbation, carriage, cargo, resonance, amplitude-frequency characteristic, particular solutions.*

Технология решения задач динамики машин предполагает выбор и построение динамических математических моделей. Большое разнообразие технических объектов и широкий спектр их физико-механических свойств, особенностей конструктивно-технического исполнения естественным образом приводят к разнообразию математических моделей.

Проблема виброзащиты и виброизоляции технических объектов относится к числу комплексных проблем, связанных с различными отраслями техники. Особое значение эта проблема

приобретает на транспорте, в частности железнодорожном, для которого надежность работы транспортных средств, оборудования, человека-оператора и обеспечение безопасности перевозок непосредственно определяются уровнями вибрационных и ударных воздействий [3].

Кузов вагона с грузом во время движения совершает сложные колебательные перемещения вследствие взаимодействия пути и подвижного состава. Рассмотрим расчетную модель грузового вагона с размещенным в нем грузом, предназначенную для исследования подпрыгивания, галопирования и боковой качки (рис. 1) [1]. Общее число степеней свободы модели равно шести:

а) для кузова – вертикальное перемещение центра тяжести кузова ($z_К$), угловые перемещения поворота кузова относительно их главных центральных осей инерции, перпендикулярных продольной плоскости, в которой исследуется движение ($\varphi_К, \psi_К$);

б) для груза – вертикальное перемещение центра тяжести груза (z_W), угловые перемещения поворота груза относительно их главных центральных осей инерции, перпендикулярных продольной плоскости, в которой исследуется движение (φ_W, ψ_W).

Для исключения случаев угрозы безопасности движения грузовых поездов и сохранности перевозимых на открытом подвижном составе различного рода грузов большое значение имеет их рациональное размещение и надежное крепление на этих средствах перевозки, поэтому полагаем что груз в вагоне закреплен согласно техническим условиям [5].

На рис. 1. обозначено: c_{11}, c_{12}, c_{21}, c_{22} – приведенные жесткости рессорного подвешивания, c_{31}, c_{32}, c_{41}, c_{42} – приведенные жесткости элементов закрепления груза, $L_1 + L_2$ – база вагона, $b_1 + b_2$ – поперечная база кузова, $L_3 + L_4$ – расстояние между точками крепления груза, L_5, L_6 – расстояния от центра тяжести вагона до точек крепления груза.

Будем рассматривать вынужденные колебания системы. В этом случае на систему действуют возмущающие силы, являющиеся некоторыми заданными функциями времени *t*. Примем, что обобщенные возмущающие силы являются гармоническими функциями времени, имеющими одинаковую частоту *p* и различные амплитуды H_1, H_2, H_3, H_4, H_5 и H_6 т. е.

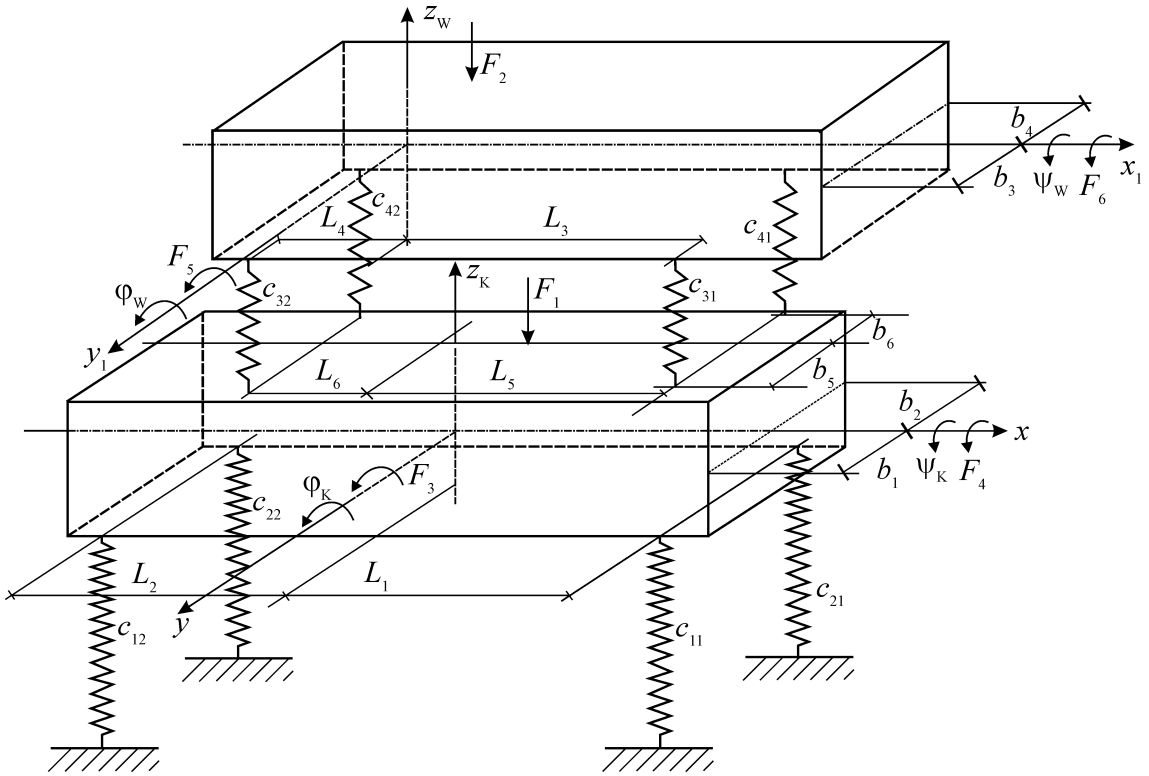


Рис. 1. Модель вагона с закрепленным на нем грузом

$$\begin{cases} F_1 = H_1 \sin pt; \\ F_2 = H_2 \sin pt; \\ F_3 = H_3 \sin pt; \\ F_4 = H_4 \sin pt; \\ F_5 = H_5 \sin pt; \\ F_6 = H_6 \sin pt. \end{cases}$$

Дифференциальные уравнения вынужденных колебаний этой системы примут вид:

$$\begin{cases} A_{11}\ddot{z}_K + C_{11}z_K + C_{12}z_W + C_{13}\varphi_K + \\ +C_{14}\psi_K + C_{15}\varphi_W + C_{16}\psi_W = F_1; \\ A_{22}\ddot{z}_W + C_{21}z_K + C_{22}z_W + C_{23}\varphi_K + \\ +C_{24}\psi_K + C_{25}\varphi_W + C_{26}\psi_W = F_2; \\ A_{33}\ddot{\varphi}_K + C_{31}z_K + C_{32}z_W + C_{33}\varphi_K + \\ +C_{34}\psi_K + C_{35}\varphi_W + C_{36}\psi_W = F_3; \\ A_{44}\ddot{\psi}_K + C_{41}z_K + C_{42}z_W + C_{43}\varphi_K + \\ +C_{44}\psi_K + C_{45}\varphi_W + C_{46}\psi_W = F_4; \\ A_{55}\ddot{\varphi}_W + C_{51}z_K + C_{52}z_W + C_{53}\varphi_K + \\ +C_{54}\psi_K + C_{55}\varphi_W + C_{56}\psi_W = F_5; \\ A_{66}\ddot{\psi}_W + C_{61}z_K + C_{62}z_W + C_{63}\varphi_K + \\ +C_{64}\psi_K + C_{65}\varphi_W + C_{66}\psi_W = F_6, \end{cases} \quad (1)$$

где $A_{11} = m_K$; $A_{22} = m_W$;

$C_{11} = c_{11} + c_{12} + c_{21} + c_{22} + c_{31} + c_{32} + c_{41} + c_{42}$;

$C_{12} = C_{21} = -c_{31} - c_{42} - c_{41} - c_{32}$;

$C_{13} = C_{31} = c_{11}L_1 + c_{21}L_1 - c_{22}L_2 - c_{12}L_2 + c_{31}L_5 +$
$+c_{41}L_5 - c_{42}L_6 - c_{32}L_6$;

$C_{14} = C_{41} = -c_{11}b_1 + c_{21}b_2 + c_{22}b_2 - c_{12}b_1 - c_{31}b_5 + c_{41}b_6 +$
$+c_{42}b_6 - c_{32}b_5$;

$C_{15} = C_{51} = -c_{31}L_3 - c_{41}L_3 + c_{42}L_4 + c_{32}L_4$;

$C_{16} = C_{61} = c_{31}b_3 - c_{41}b_4 - c_{42}b_4 + c_{32}b_3$;

$C_{22} = c_{31} + c_{41} + c_{42} + c_{32}$;

$C_{23} = C_{32} = -c_{31}L_5 - c_{41}L_5 + c_{42}L_6 + c_{32}L_6$;

$C_{24} = C_{42} = c_{31}b_5 - c_{41}b_6 - c_{42}b_6 + c_{32}b_5$;

$C_{25} = C_{52} = c_{31}L_3 + c_{41}L_3 - c_{42}L_4 - c_{32}L_4$;

$C_{26} = C_{62} = -c_{31}b_3 + c_{41}b_4 + c_{42}b_4 - c_{32}b_3$; $A_{33} = I_y$;

$C_{33} = c_{11}L_1^2 + c_{12}L_2^2 + c_{21}L_1^2 + c_{22}L_2^2 + c_{31}L_5^2 + c_{32}L_6^2 +$
$+c_{41}L_5^2 + c_{42}L_6^2$;

$C_{34} = C_{43} = -c_{11}L_1b_1 + c_{12}L_2b_1 + c_{21}L_1b_2 - c_{22}L_2b_2 -$
$-c_{31}L_5b_5 + c_{32}L_6b_5 + c_{41}L_5b_6 - c_{42}L_6b_6$;

$C_{35} = C_{53} = -c_{31}L_5L_3 - c_{32}L_6L_4 - c_{41}L_5L_3 - c_{42}L_6L_4$;

$C_{36} = C_{63} = c_{31}L_5b_3 - c_{32}L_6b_3 - c_{41}L_5b_4 + c_{42}L_6b_4$;

$A_{44} = I_x$;

$C_{44} = c_{11}b_1^2 + c_{12}b_1^2 + c_{21}b_2^2 + c_{22}b_2^2 + c_{31}b_5^2 + c_{32}b_5^2 +$
$+c_{41}b_6^2 + c_{42}b_6^2$;

$C_{45} = C_{54} = c_{31}L_3b_5 - c_{32}L_4b_5 - c_{41}L_3b_6 + c_{42}L_4b_6$;

$C_{46} = C_{64} = -c_{31}b_5b_3 - c_{32}b_5b_3 - c_{41}b_6b_4 - c_{42}b_6b_4$;

$A_{55} = I_{y1}$, $C_{55} = c_{31}L_3^2 + c_{32}L_4^2 + c_{41}L_3^2 + c_{42}L_4^2$;

$C_{56} = C_{65} = -c_{31}L_3b_3 + c_{32}L_4b_3 - c_{41}L_3b_4 - c_{42}L_4b_4$;

$A_{66} = I_{x1}$, $C_{66} = c_{31}b_3^2 + c_{32}b_3^2 + c_{41}b_4^2 + c_{42}b_4^2$.

Частные решения системы (1), характеризующие вынужденные колебания, будем искать в виде

$z_{\hat{E}} = A_1 \sin pt$, $z_W = A_2 \sin pt$, $\phi_K = A_3 \sin pt$,

$\psi_K = A_4 \sin pt$, $\phi_W = A_5 \sin pt$, $\psi_W = A_6 \sin pt$.

Найденные решения для амплитуд груза можно представить в виде

$$A_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta},\ A_5 = \frac{\Delta_5}{\Delta},\ A_6 = \frac{\Delta_6}{\Delta}, \quad (2)$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} C_{11} - A_{11}p^2 & H_1 & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & H_2 & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & H_3 & C_{33} - A_{33}p^2 & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & H_4 & C_{43} & C_{44} - A_{44}p^2 & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & H_5 & C_{53} & C_{54} & C_{55} - A_{55}p^2 & C_{56} \\ C_{61} & H_6 & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} - A_{66}p^2 \end{vmatrix},$$

$$\Delta_5 = \begin{vmatrix} C_{11} - A_{11}p^2 & C_{12} & C_{13} & C_{14} & H_1 & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} - A_{22}p^2 & C_{23} & C_{24} & H_2 & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} - A_{33}p^2 & C_{34} & H_3 & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} - A_{44}p^2 & H_4 & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & H_5 & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & H_6 & C_{66} - A_{66}p^2 \end{vmatrix},$$

$$\Delta_6 = \begin{vmatrix} C_{11} - A_{11}p^2 & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & H_1 \\ C_{21} & C_{22} - A_{22}p^2 & C_{23} & C_{24} & C_{25} & H_2 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} - A_{33}p^2 & C_{34} & C_{35} & H_3 \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} - A_{44}p^2 & C_{45} & H_4 \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} - A_{55}p^2 & H_5 \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & H_6 \end{vmatrix},$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} C_{11} - A_{11}p^2 & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} - A_{22}p^2 & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} - A_{33}p^2 & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} - A_{44}p^2 & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} - A_{55}p^2 & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} - A_{66}p^2 \end{vmatrix}.$$

Рассмотрим возможность использования данной системы в виде динамического гасителя подавления колебаний груза.

Возможными являются следующие случаи:

1. $\Delta_2 = 0$, тогда отсутствуют вертикальные колебания груза (по координате z_W);
2. $\Delta_5 = 0$, тогда отсутствуют угловые колебания груза (по координате φ_W);
3. $\Delta_6 = 0$, тогда отсутствуют угловые колебания груза (по координате ψ_W);
4. $\Delta_2 = 0$, $\Delta_5 = 0$ и $\Delta_6 = 0$, тогда колебания груза полностью отсутствуют.

Определитель Δ обращается в нуль, при совпадении частоты вынуждающей силы с любой из собственных частот, а амплитуды A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6 станут бесконечно большими, при этом имеем резонанс.

Полученные уравнения достаточно сложны, и получить аналитические решения затруднительно, поэтому на рис. 2–4 приведены фрагменты примеров амплитудно-частотных характеристик для обобщенных координат груза, полученных в пакете MATHCAD [2]. Массо-инерционные и геометрические параметры в расчетах соответствуют экипажу 4-осного цельнометаллического полувагона с глухими торцевыми стенами, модель 12-132-02.

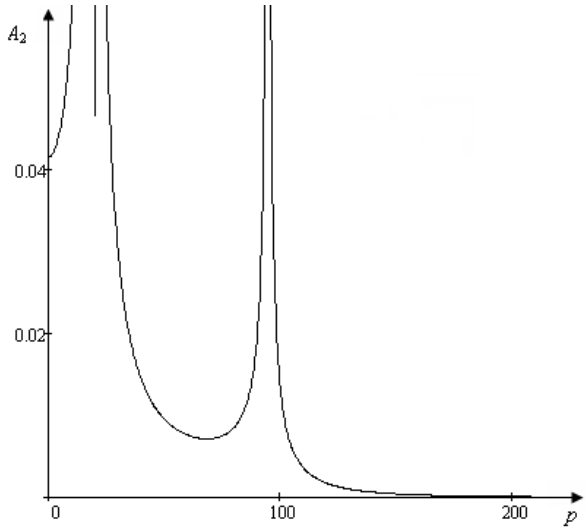


Рис. 2. АЧХ вертикальных колебаний груза (координата z_W)

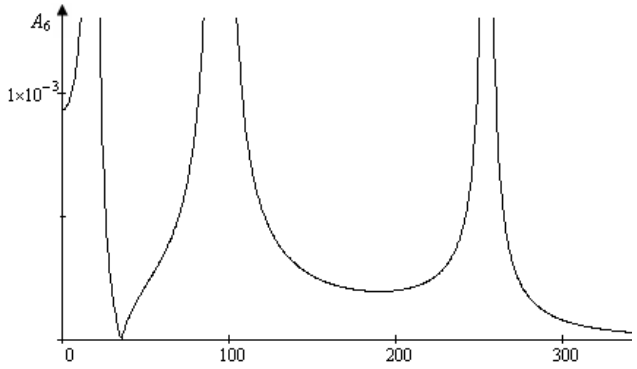


Рис. 3. АЧХ угловых колебаний груза (координата ψ_W)

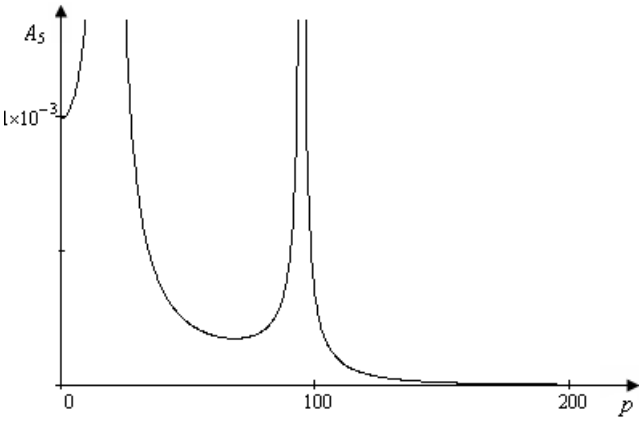


Рис. 4. АЧХ угловых колебаний груза (координата φ_W)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ахмадеева А. А., Гозбенко В. Е. Рациональное задание числа степеней свободы динамической модели грузового вагона // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 4(12). С. 25–28.
2. Гурский Д. А. Вычисления в MathCAD. Минск : Новое знание, 2003. 814 с.
3. Елисеев С. В. Математические модели и анализ динамических свойств механических систем : моногр. М., 2009. 205 с. Деп. ВИНИТИ. № 782-В2009, 08.12.2009.
4. Комаров М. С. Динамика механизмов и машин. М. : Машиностроение, 1969. 296 с.
5. Технические условия размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах. М. : Юртранс, 2003. 544 с.

УДК 621.311

Колотов Андрей Васильевич,
к. т. н., доцент кафедры «Теория и конструирование механических систем»
ПИ ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», тел. (8-391) 2-497-263, e-mail: kolotoff555@mail.ru.
Мерко Михаил Алексеевич,
к. т. н., доцент кафедры «Теория и конструирование механических систем»
ПИ ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», тел. (8-391) 2-497-263, e-mail: mma20010@mail.ru.
Беляков Евгений Викторович,
старший преподаватель кафедры «Теория и конструирование механических систем»
ПИ ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», тел. (8-391) 2-497-263, e-mail: belyakoff777@mail.ru.
Меснянкин Марк Вадимович,
старший преподаватель кафедры «Теория и конструирование механических систем»
ПИ ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», тел. (8-391) 2-497-263, e-mail: mesmark@yandex.ru.

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗУБЧАТЫХ МЕХАНИЗМОВ ПРИВОДОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ СО СВЯЗАННЫМИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ КОЛЕСАМИ

A.V. Kolotov, M.A. Merko, E.V. Belyakov, M.V. Mesnjankin

AUTOMATED DESIGNING OF GEAR MECHANISMS OF DRIVES OF THE PROCESS EQUIPMENT WITH CONNECTED CYLINDRICAL WHEELS

Аннотация. *Рассмотрены особенности автоматизированного проектирования зубчатых механизмов приводов технологического оборудования со связанными цилиндрическими колесами.*

Ключевые слова: *зубчатые механизмы, привод, механизмы со связанными цилиндрическими колесами, объемный блокирующий контур, показатели качества.*

Abstract. *The article is focused on automated designing features of gear mechanisms of drives of the process equipment with connected cylindrical wheels.*

Keywords: *gear mechanisms, drive, mechanisms with the connected cylindrical wheels, volume blocking contour, quality indicators.*

Зубчатыми механизмами приводов технологического оборудования со связанными цилиндрическими колесами являются механизмы, структура которых содержит хотя бы одно зубчатое колесо, одновременно образующее зацепления с двумя или более другими зубчатыми колесами. Особенности расчета геометрических параметров зубчатых колес механизмов данного вида представлены в работах И.А. Болотовского [1, 2].

Существующие методики расчетов зубчатых механизмов со связанными цилиндрическими колесами не всегда позволяют обеспечить требуемые величины показателей качества, а зачастую не дают однозначного приемлемого решения или вообще не имеют решений [3, 4]. Решение данной задачи для зубчатых механизмов данного вида возможно только с помощью метода объемного блокирующего контура (ОБК). В этом случае достижение желаемых значений показателей качества возможно только при одновременном рассмотрении совместного существования областей (зон) параметров, обеспечивающих величины показателей качества зубчатых механизмов со связанными цилиндрическими колесами внешнего и внутреннего зацеплений [5…7]. При этом необходимо учитывать, что результат напрямую зависит от требований, предъявляемых к значениям геометрических параметров зацеплений, образованных связанными цилиндрическими колесами. Непосредственное влияние на точность получаемого результата оказывают: коэффициент торцового перекрытия, заострение головок зубьев, интерференция, положение полюса зацепления, приведенный радиус кривизны профилей зубьев в полюсе, скорость общей контактной точки при ее движении по профилю зуба, скорость скольжения в заданной контактной точке, удельные скольжения в нижних точках активного профиля зуба и др.

Каждый из перечисленных параметров в той или иной мере оказывает существенное влияние на эксплуатационные показатели как механизма, так и всего привода в целом. Например: для получения требуемых значений коэффициентов, учитывающих форму зуба и концентрацию напряжений, необходимо осуществить выбор значений

коэффициентов относительного смещения для всех связанных цилиндрических колес, находящихся в зацеплениях в области объемного блокирующего контура, соответствующей положительным значениям данных параметров. При этом наиболее оптимальные значения коэффициентов относительного смещения определяются пересечением поверхностей выровненных удельных скольжений. Рост значений данных коэффициентов приводит к увеличению углов зацепления для каждой пары связанных колес. Это обстоятельство увеличивает начальные межосевые расстояния, что, в свою очередь, способствует уменьшению контактных напряжений в зоне контакта зубьев связанных колес в каждом зацеплении. Если выбранная точка находится внутри объемного блокирующего контура и лежит на пересечении поверхностей, образованных проекциями линий выровненных удельных скольжений плоских блокирующих контуров соответствующих пар зацеплений, то можно считать, что получен оптимальный вариант сочетания значений коэффициентов относительного смещения для всех связанных цилиндрических колес. В этом случае износ контактных поверхностей зубьев любого колеса будет иметь место в полюсе их зацепления, что вызовет рост контактной выносливости механизма со связанными колесами.

Используя основные положения, рекомендованные для выбора коэффициентов относительного смещения по плоским блокирующим контурам [1, 2], авторы сформировали алгоритм определения параметров, оказывающих основное влияние на величины показателей качества зубчатых механизмов со связанными цилиндрическими колесами методом объемного блокирующего контура [8], состоящего из следующих основных модулей (рис. 1):

1. Модуль исходных данных, которые разделены на два направления:

– параметры зубчатых колес и зацеплений, где z_1, z_2, z_3 – числа зубьев связанных колес; β – угол наклона зубьев; a_w^{12}, a_w^{23}, a_w^{13} – начальные межосевые расстояния каждого зацепления;

– параметры нормального исходного производящего контура, α – угол профиля зуба рейки, m – модуль зацепления; h_a^* – коэффициент высоты головки зуба; h_l^* – коэффициент граничной высоты; c^* – коэффициент радиального зазора; h_g^* – коэффициент высоты модификации головки зуба; Δ^* – коэффициент глубины модификации головки зуба.

2. Модуль формирования плоских блокирующих контуров, ограниченных линиями интерференции.

3. Модуль формирования объемного блокирующего контура, ограниченного поверхностями интерференции.

4. Модуль ввода значений показателей качества, где ε_α^{12}, ε_α^{23}, ε_α^{13} – коэффициенты торцового перекрытия зацеплений; s_a^{12}, s_a^{23}, s_a^{13} – коэффициенты толщины зубьев на поверхности вершин колес в каждом зацеплении; $x_{1,2,3} \geq x_{1,2,3\min}$ – условие, ограничивающее подрез зубьев колес; $\vartheta_{p1} = \vartheta_{p2}$, $\vartheta_{p2} = \vartheta_{p3}$, $\vartheta_{p1} = \vartheta_{p3}$ – коэффициенты выравненных удельных скольжений для каждой пары зацепления.

5. Модуль формирования плоских блокирующих контуров, ограниченных линиями показателей качества.

6. Модуль формирования объемного блокирующего контура, ограниченного поверхностями показателей качества.

7. Модуль логической операции, определяющий, задано или нет значение начального межосевого расстояния, который при результате «да» обеспечивает переход к модулю 8, а при «нет», соответственно, переводит к модулю 9.

8. Модуль логической операции, определяющий, заданы или нет значения начального межосевого расстояния для всех трех зацеплений, который при результате «да» обеспечивает переход к модулю 10, а при «нет», соответственно, переводит к модулю 11.

9. Модуль формирования областей совместного существования для всех зацеплений механизма со связанными колесами, которые определят пространство объемного блокирующего контура, ограниченного поверхностями показателей качества.

10. Модуль формирования решения, которое в каждом частном случае может быть удовлетворяющим или не удовлетворяющим задаваемым (принятым) критериям.

11. Модуль формирования решения, представляющий собой диапазон величин коэффициентов относительных смещений x_1, x_2 и x_3 для каждого колеса, которые обеспечивают условия «вписывания» всех зацеплений в регламентированные начальные межосевые расстояния при заданном сочетании показателей качества.

12. Модуль логической операции, определяющий, соответствуют или нет полученные результаты принятым критериям, который при результате «да» обеспечивает переход к модулю 4, а при «нет», соответственно, к модулю 13.

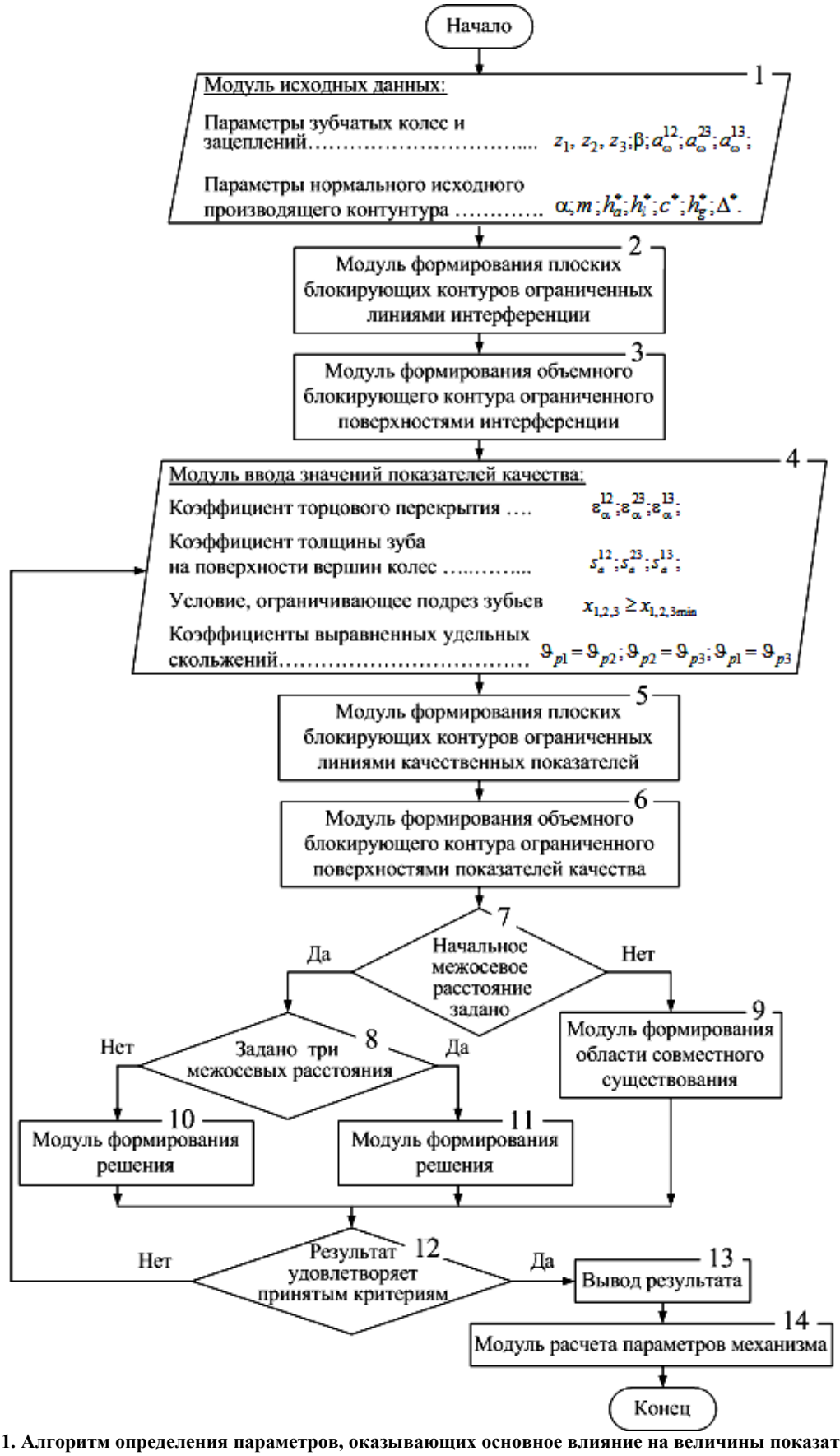


Рис. 1. Алгоритм определения параметров, оказывающих основное влияние на величины показателей качества зубчатых механизмов со связанными цилиндрическими колесами методом объемного блокирующего контура

13. Модуль вывода результата.

14. Модуль расчета параметров механизма.

С целью повышения эффективности процесса проектирования зубчатых механизмов приводов технологического оборудования со связанными цилиндрическими колесами авторами разработан программный комплекс (ПК) «Контур», реализующий данный алгоритм. При создании ПК «Контур» предпочтение было отдано среде программирования Borland Delphi и открытой графической библиотеке, использующей технологию OpenGL, что позволяет сформировать независимый от языка программирования кроссплатформенный программный интерфейс, необходимый для написания приложений, применяющих двумерную или трёхмерную компьютерную графику. Для удобства использования ПК «Контур» снабжен программой инсталляции, которая позволяет установить на персональный компьютер пользователя весь комплекс с минимальным количеством действий. После проведения данных мероприятий на рабочем столе ПЭВМ появляется иконка, нажатием на которую осуществляется запуск программного комплекса, что сопровождается появлением на экране монитора окна модуля исходных данных (рис. 2). В ячейках этого окна необходимо указать значения не только параметров зубчатых колес с учетом особенностей обоих видов зацеплений, но и параметров нормального исходного производящего контура, принадлежащего режущему инструменту. Далее нажатием кнопки «Enter» на клавиатуре ПЭВМ запускается расчет геометрических параметров для каждой пары зацепления связанных цилиндрических колес зубчатого механизма, который может выполняться для обоих видов зацепления. Полученный результат передается в модуль формирования плоских блокирующих контуров, что способствует его активации. Результат вычислений, выполненных модулем исходных данных может быть транслирован в программные средства Microsoft Word или Microsoft Excel нажатием кнопки, содержащейся во вкладке «Отчет».

Получив необходимую информацию, модуль формирования выполняет построение плоских блокирующих контуров для каждого зацепления связанных цилиндрических колес. Результат построения передается в модуль формирования объемного блокирующего контура, что обеспечивает его запуск.

Модуль ОБК начинает работу с формирования глобальной системы координат $\Sigma = \{0; X_1; X_2; X_3\}$, состоящей из трех координатных плоскостей h – X_1, 0, X_2; v – X_1, 0, X_3; w – X_2, 0, X_3. На координатных плоскостях глобальной системы располагаются плоские прямоугольные (декартовые) системы координат h – $\Sigma = \{0_h; x_{1h}; x_{2h}\}$, v – $\Sigma = \{0_v; x_{1v}; x_{3v}\}$, w – $\Sigma = \{0_w; x_{2w}; x_{3w}\}$, каждая из которых соответствует паре колес, образующих зацепление. Затем с системами координат каждой координатной плоскости совмещаются системы координат соответствующего плоского блокирующего контура, построенного предшествующим модулем, что обеспечивает их правильное позиционирование в гло-

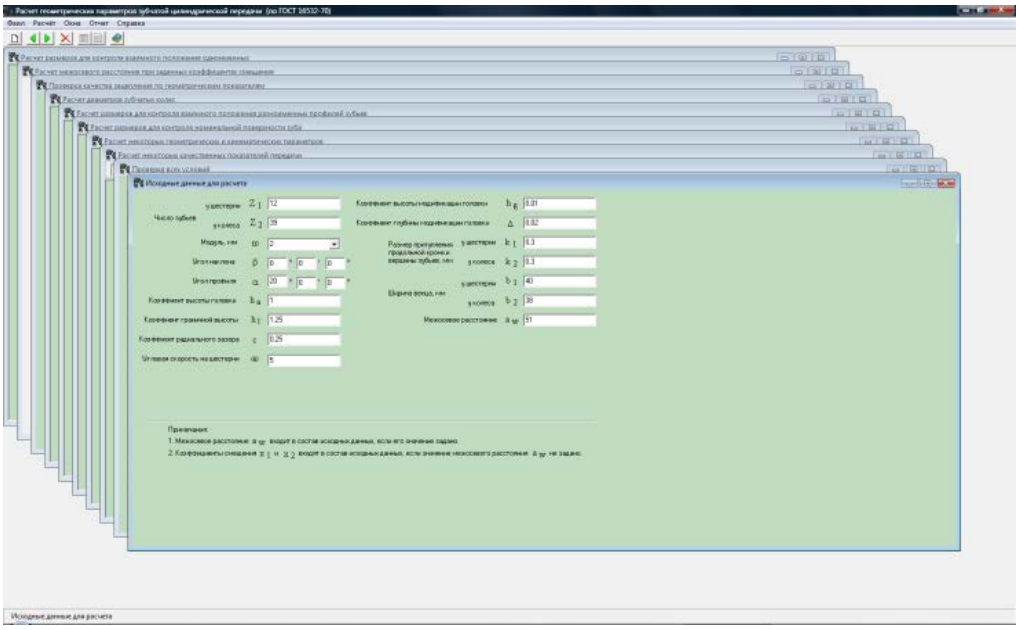


Рис. 2. Вид окна модуля исходных данных ПК «Контур»

бальной системе координат. Проецирование кривых показателей качества плоских блокирующих контуров, расположенных на соответствующих координатных плоскостях $h = x_{1h}\,x_{2h}$, $v = x_{1v}\,x_{3v}$, $w = x_{2w}\,x_{3w}$, осуществляется построением объемного блокирующего контура. ОБК формируется пересечением поверхностей, образованных совокупностью координат точек, определяющих положение линий интерференции зубьев на плоских блокирующих контурах, расположенных на соответствующих координатных плоскостях глобальной системы координат. ОБК имеет собственную систему координат $\Sigma = \{0; x_1; x_2; x_3\}$, расположенную в глобальной системе координат $\Sigma = \{0; X_1; X_2; X_3\}$, а точка 0, соответствующая началу отсчета собственной системы координат $\Sigma = \{0; x_1; x_2; x_3\}$, не совпадает с точкой 0, являющейся началом отсчета глобальной системы координат $\Sigma = \{0; X_1; X_2; X_3\}$. Полученный результат передается в модуль ввода значений показателей качества, что сопровождается выводом на экран соответствующего окна (рис. 3, а).

В ячейках окна модуля ввода необходимо указать значения показателей качества, которыми должен обладать проектируемый зубчатый механизм со связанными колесами. Эти данные вместе

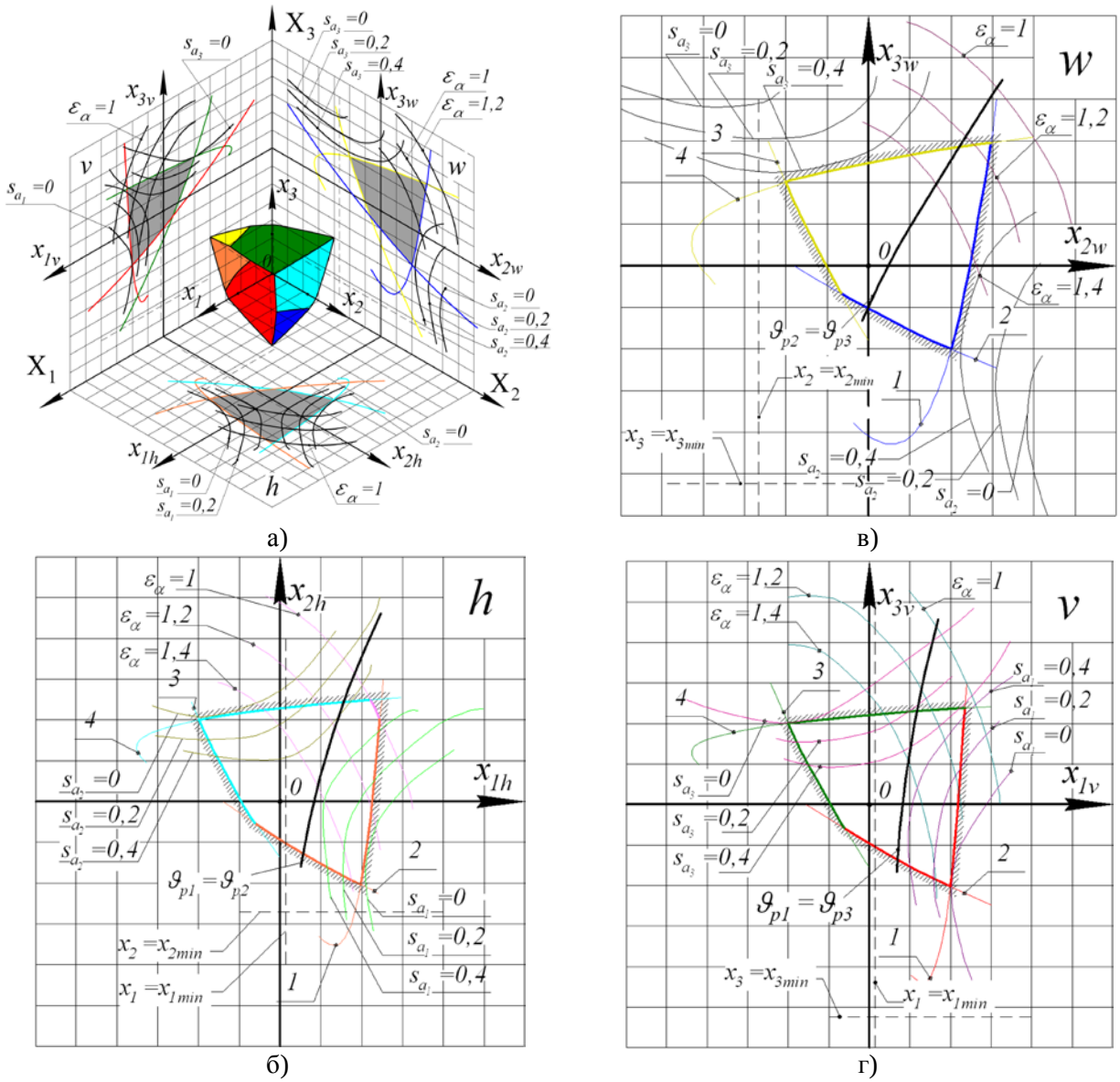


Рис. 3. Вид результата работы модулей 3 и 5 в программной среде «Контур»:
а – объемный блокирующий контур в глобальной системе координат, образованный поверхностями интерференции; б, в, г – плоские блокирующие контуры, ограниченные линиями интерференции, с нанесенными линиями показателей качества на соответствующих координатных плоскостях для колес z_1 и z_2 – h; колес z_3 и z_2 – w; колес z_1 и z_3 – v

с результатами работы модуля ОБК передаются в модуль формирования плоских блокирующих контуров для нанесения ограничительных линий на их поверхности, что обеспечивает учет заданных величин показателей качества в ячейках окна этого модуля.

В результате получаем плоские блокирующие контуры, ограниченные линиями интерференции, с нанесенными линиями показателей качества на соответствующих координатных плоскостях для колес z_1 и $z_2 - h$; колес z_2 и $z_3 - w$; колес z_1 и $z_3 - v$ (рис. 3, *б–г*). Данные действия позволяют реализовать процесс формирования плоских блокирующих контуров, ограниченных линиями показателей качества. Эти контуры передаются в модуль формирования объемного блокирующего контура с целью нанесения ограничений на его объем поверхностями показателей качества.

Полученный ОБК (рис. 4, *а*) передается в модуль логической операции, который определяет, задано или нет значение начального межосевого расстояния. При результате «да» обеспечивает переход к модулю 8, а при «нет» соответственно переводит к модулю 9.

Все дальнейшие действия ПК «Контур» реализует посредствам работы одного из модулей формирования 9…11. Выбор коэффициентов относительного смещения при заданных межосевых расстояниях для трех зацеплений осуществляется посредством проецирования линий соответствующих суммарным коэффициентам смещения для всех зацеплений $x_1 + x_2 = x_{\Sigma_{12}}$, $x_2 + x_3 = x_{\Sigma_{23}}$ и $x_1 + x_3 = x_{\Sigma_{13}}$. Точка пересечения этих линий в объемном блокирующем контуре однозначно определит значения коэффициентов относительного смещения для каждого из колес (рис. 4, *б*). При этом в каждом частном случае получается только одно возможное решение, удовлетворяющее принятым критериям. Определение коэффициентов относительного смещения при заданных межосевых расстояниях для двух зацеплений аналогично выше представленному случаю с той лишь разницей, что на координатные плоскости осуществляется наложение не трех прямых, а двух для соответствующих зацеплений. При этом имеем не однозначное решение, а диапазон значений коэффициентов относительного смещения для каждого колеса. Полученные результаты передаются в модуль логической операции, а также могут транслироваться в программное средство Microsoft Word (рис. 4).

Модуль 12 производит действия, связанные с определением, соответствуют или нет результаты работы всех предшествующих модулей принятым критериям, и при результате «да» обеспечивает переход к модулю 4, а при «нет», соответственно, переводит к модулю 13. Возврат к модулю 4 указывает на отсутствие решения задачи при заданных показателях качества, что потребует корректировки их значений.

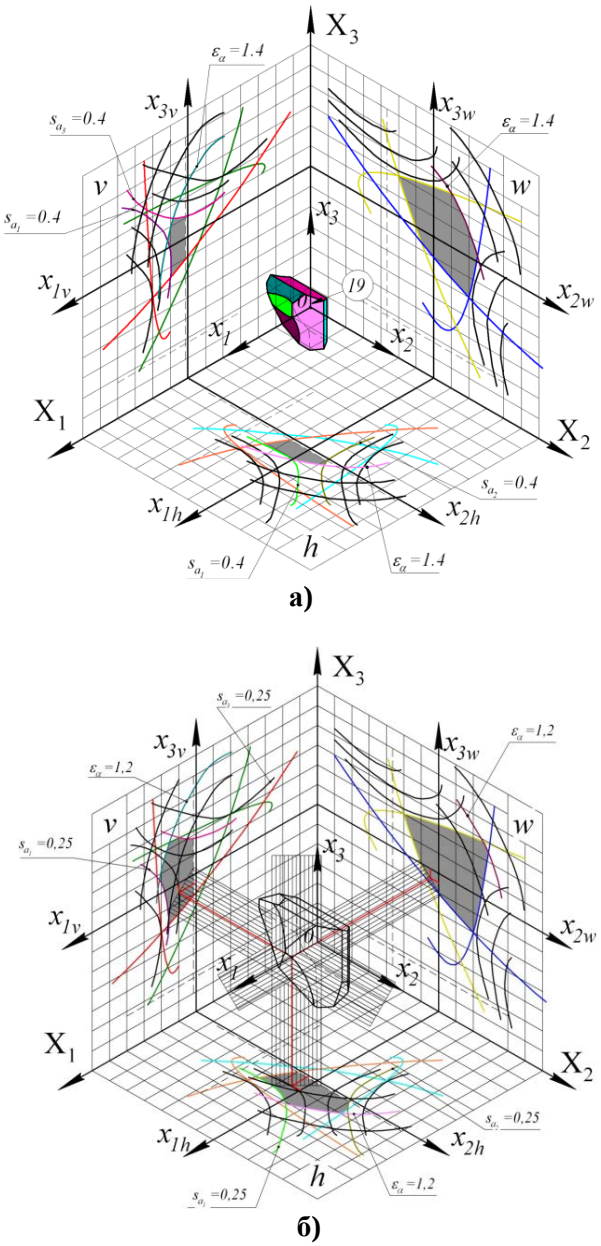


Рис. 4. Вид результата работы модулей 6 и 11:
а – объемный блокирующий контур, ограниченный поверхностями показателей качества;
б – объемный блокирующий контур, обеспечивающий формирование значений коэффициентов относительного смещения при заданных трех межосевых расстояниях

Модуль 13 осуществляет вывода результата работы всех предшествующих модулей с передачей данных в модуль 14, который выполняет рас-

чет параметров зубчатого механизма со связанными колесами с последующей передачей результата в программные средства Microsoft Word или Microsoft Excel.

Программный комплекс «Контур» реализует предлагаемый алгоритм и создает возможность для исключения ошибок при решении задачи по обеспечению показателей качества механизмов со связанными зубчатыми колесами посредством применения метода объемного блокирующего контура на стадиях расчета и проектирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Болотовский И. А. Справочник по геометрическому расчету эвольвентных зубчатых и червячных передач. М. : Машиностроение, 1986. 448 с.
2. Болотовский И. А., Гурьев Б. И., Смирнов В. Э., Шендерей Б. И. Цилиндрические эвольвентные зубчатые передачи внутреннего зацепления. М. : Машиностроение, 1977. 174 с.
3. Сильченко П. Н., Колотов А. В., Мерко М. А., Швец Д. А. Методика определения коэффициентов относительного смещения для обеспечения требуемых качественных показателей зубчатых механизмов // Проблемы механики современных машин: материалы Третьей междунар. конф./ Вост. –Сиб гос. технол. ун-та. Улан-Удэ, 2006. Т. 1 С. 132 – 135.
4. Сильченко П. Н., Колотов А. В., Мерко М. А., Швец Д. А. Метод построения объемных блокирующих контуров для зубчатых колес // Сб. докл. междунар. конф. по теории механизмов и механике машин. Краснодар / Кубан. гос. технол. ун-т, 2006. С. 81–135.
5. Сильченко П. Н., Колотов А. В., Мерко М. А. Построение объемных блокирующих контуров при расчете зубчатых передач с зацеплением двух и более колес для обеспечения всех требуемых эксплуатационных показателей // Технология машиностроения. 2006. № 9 С. 57–60.
6. Сильченко П. Н., Колотов А. В. , Мерко М. А. Анализ влияния параметров зубчатых колес для достижения необходимых качественных показателей // Технология машиностроения. 2007. № 11 С. 50–54.
7. Мерко М. А., Колотов А. В. , Меснянкин М. В Обеспечение минимизации скоростей удельных скольжений для рядных цилиндрических передач методом объемного блокирующего контура // Механики XXI веку : сб. докл. : VIII Всерос. науч.-тенх. конф. с междунар. участием. Братск : БрГУ, 2009. С. 50–52.
8. Колотов А. В. Обеспечение качественных показателей зубчатых передач со связанными зубчатыми цилиндрическими колесами : автореф. дис. … канд. техн. наук. Красноярск, 2006. 23 с.

УДК 621.542:533.6.01

Конищева Ольга Васильевна,
к. т. н., доцент кафедры «Теория и конструирование механических систем» ПИ ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»
Брюховецкая Елена Викторовна
к. т. н., доцент кафедры «Проектирование и экспериментальная механика машин» Политехнического института Сибирского федерального университета
т. (391) 24-97-555

РАСЧЕТ ПОДЪЕМНОЙ СИЛЫ ВИХРЕВОГО СТРУЙНОГО ЗАХВАТНОГО УСТРОЙСТВА (ВСЗУ)

O.V. Konischeva, E.V. Bruhovezckaya

THE CALCULATION OF ASCENSIONAL POWER FOR VORTEX JET GRIPPING DEVICE

Аннотация. *Даны описание и принцип действия ВСЗУ. Представлены результаты экспериментальных исследований области разрежения в местах контакта устройства с плоским объектом. Приведены результаты расчета подъемной силы на основе данных измерений в зависимости от зазора между поверхностями устройства и пластины.*

Ключевые слова: *захватное устройство, вихревое движение, струйное движение, подъем, подъемная сила.*

Abstract. *The description and principle of operation of vortex jet gripping device are presented. The results of experimental research in exhaustion area in the points of the device contact with a flat object are given. The results of ascensional power calculation on the basis of measurement depending on the*

gap between surfaces of the device and plate are described.

Keywords: *gripping device, vortex motion, jet motion, exhaustion, ascensional power.*

В основу разработанных конструкций ВСЗУ положен известный эффект присасывающего действия струи, истекающей из отверстия малого диаметра и взаимодействующей с обтекаемой ею плоской, цилиндрической или шаровой поверхностью, и вихревой эффект, который заключается в следующем. Под действием центробежных сил, возникающих во вращающемся потоке, частицы газа смещаются в периферийную область камеры, образуя спиральную вихревую струю. В приосевой области образуются зоны разрежения (зоны обратных потоков). Характерной особенностью взаимодействия закрученной струи с плоской преградой является то, что при расположении преграды в непосредственной близости от торцевой поверхности вихревой камеры возникает отрицательное избыточное давление. В этом случае истекающая из цилиндрической камеры струя прилипает к торцевой поверхности и притягивает преграду.

В предлагаемом устройстве воздух истекает не через сужающее отверстие, а наоборот, через расширяющееся, что позволяет увеличить область разрежения. При этом истечение происходит через боковой кольцевой зазор, когда воздушный поток на своем пути встречает преграду, которая может располагаться на различном расстоянии от устройства. В этом случае воздушные струи перемещаются не к центру устройства, а от него.

ВСЗУ представляет собой вихревую камеру 1 (рис. 1) диаметром $d_к$ = 70 мм, высотой H = 50 мм, с тангенциальной подачей сжатого воздуха через четыре отверстия диаметром $d_с$ = 4 мм. В нижней части вихревая камера плавно переходит в торец 2 диаметром $D_т$ = 200 мм. В кожух 3 для создания замкнутой полости вокруг входных отверстий нагнетается сжатый воздух под разным давлением $p_и$ от источника 4. Верхнее отверстие закрывается пробкой 5 или используется для установки вставки, позволяющей получить более узкие зазоры на выходе из камеры. При приближении устройства к плоской пластине 6 образуется узкий кольцевой зазор, истекающая струя прилипает к торцу, создается разрежение. Кроме этого за счет вихревого эффекта возникает разрежение и в центральной части камеры. За счет образующихся зон разрежений пластина присасывается к торцу устройства.

Для измерения давлений использовалась пластина 6, имеющая отверстие 7 диаметром 0,3 мм, и водяной манометр 8 с пределами измерений ±700 мм вод. ст. Пластина закреплялась на нижнем основании торца струбцинами 9, а зазор

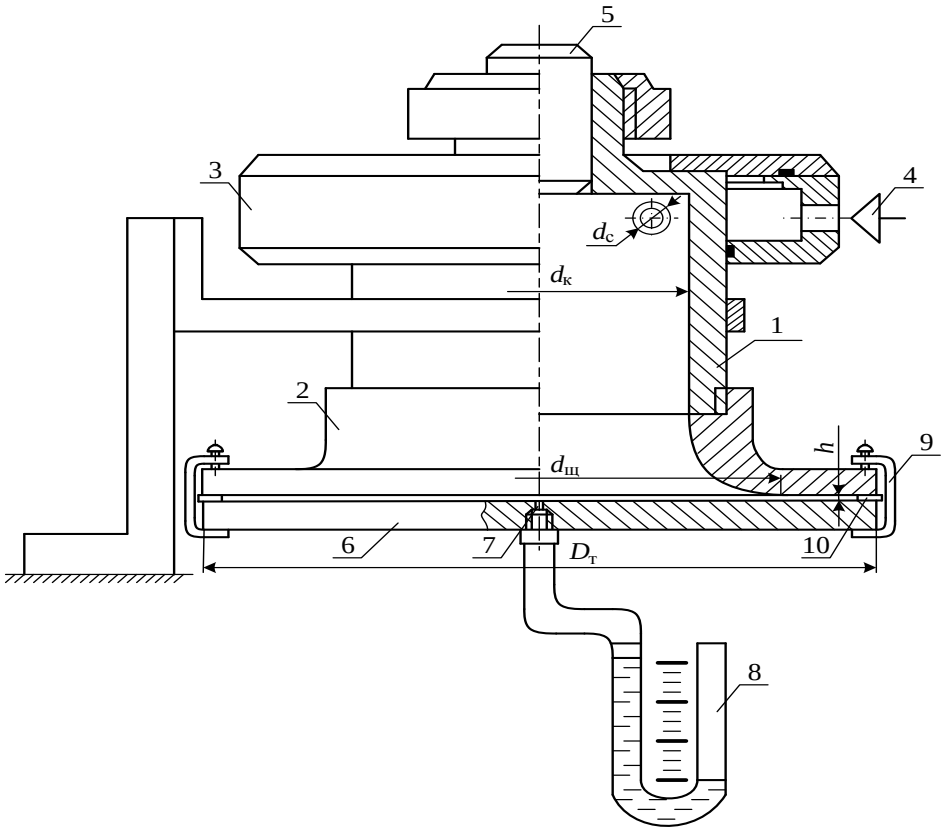


Рис. 1. Вихревое струйное захватное устройство

выдерживался с помощью планок различной толщины 10, которые помещались между торцом устройства и пластиной. Таким образом, пластина, полностью перекрывающая торец устройства, располагалась на расстоянии h = 0,3–2 мм от него и перемещалась вдоль радиуса с шагом 2 мм.

В вихревых устройствах на периферии всегда имеется область избыточного давления, которое обычно тем больше, чем больше разрежение в центре. В нашем случае, когда воздух выходит не через центровое отверстие, а через боковую кольцевую щель и движется в плоскопараллельном узком зазоре, избыточное давление на периферии уменьшается и при определенных условиях исчезает совсем (рис. 2). Происходит как бы перемещение эпюры давлений вниз.

Наибольшее разрежение в центре отвечает такому положению пластины, когда окружная (тангенциальная) составляющая скорости $v_{\tau max}$ будет наибольшей. Тангенциальная составляющая, с одной стороны, возрастает с уменьшением площади выходного кольцевого отверстия, а с другой стороны, уменьшается с увеличением сопротивления камеры, которое возрастает при этом. Поэтому существует оптимум, когда сопротивление будет не настолько большим, чтобы препятствовать обеспечению наибольшей $v_{\tau max}$ при наименьшем сечении выходной кольцевой щели.

Выход воздуха через периферийную щель способствует увеличению разрежения за счет составляющей скорости и силами вязкостного трения, то

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \rho \frac{v_\varphi^2}{r} - \rho v_r \frac{\partial v_r}{\partial r}, \qquad (1)$$

где $v_\varphi = v_\tau$.

На рис. 2 представлены результаты измерений давления на поверхности пластины. Давление на входе $p_и = 0{,}3 \cdot 10^5$ Па (0,3 ат), расход $Q = 5{,}8 \cdot 10^{-3}$ м^3/с. При очень маленьких зазорах $h < 0{,}3$ мм вообще отсутствует разрежение в центре (на графиках не представлено), при h = 0,3 мм появляется небольшая область разрежения r_p = 4 мм и большое избыточное давление на периферии p_{max} = 2650 Па. Максимум давлений находится на радиусе r = 45–50 мм. Второй максимум, который возникает на периферии при малых зазорах, объясняется падением радиальной скорости из-за увеличения площади зазора при удалении от центра. Это вытекает из уравнения (1). При увеличении зазора область разрежения и его максимум увеличиваются. При зазоре h = 0,8 мм избыточное давление в трех точках равно нулю. При дальнейшем увеличении зазора во всей области контакта отсутствует избыточное давление. При h = 1 мм разрежение достигает максимального значения 3040 Па, а область разрежения r_p = 75 мм. При $h > 1$ мм происходит уменьшение величины разрежения и расширение его области до 100 мм при h = 2 мм, т. е. область отрицательных давлений полностью занимает рабочую поверхность устройства. На графиках видно, что при зазорах больше 1 мм давление изменяется более плавно.

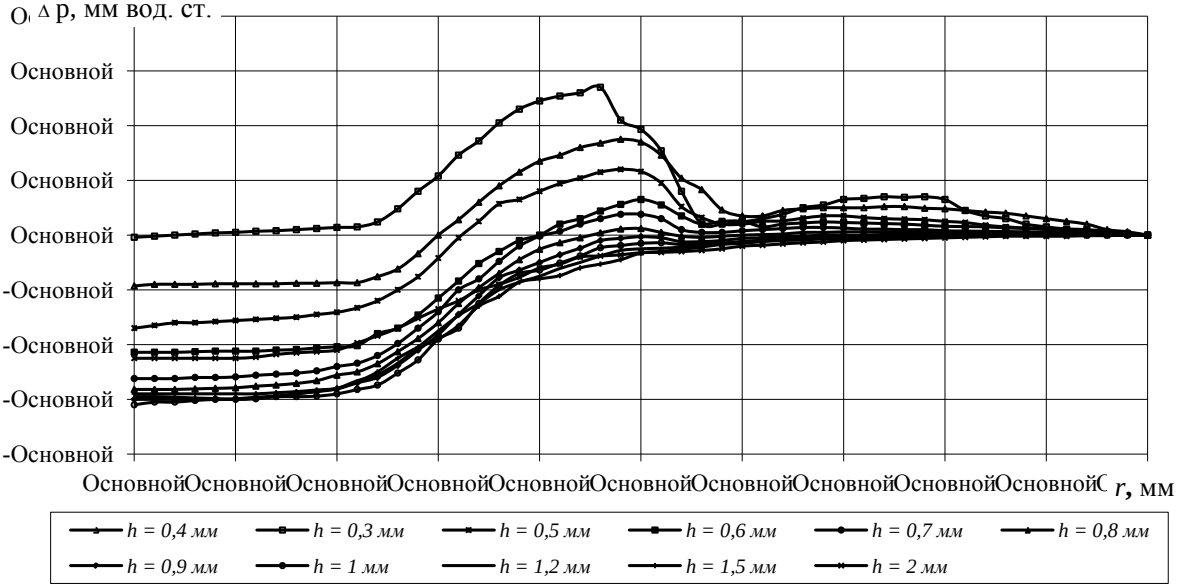


Рис. 2. Результаты измерения давления на поверхности пластины

По измеренным давлениям определим подъемную силу, интегрируя давление по площади контакта пластины с устройством:

$$F = \int_{r=0}^{r=100} \Delta p 2\pi r dr \approx \sum 0{,}5 \cdot 9{,}807 \cdot 10^{-6} \pi (\Delta \eth_i + \Delta p_{i+1})(r_{i+1}^2 - r_i^2), \quad (2)$$

где Δp – перепад давления в мм вод. ст. (1 мм вод. ст. = 9,807 Па), r – радиус в мм, F – подъемная сила в Н.

В результате расчета получены величины подъемной силы при разных зазорах h и построена кривая этой зависимости (рис. 3), при этом сплошная кривая построена по результатам расчетов, а пунктирная по полиномиальному ряду. На графике видно, что наибольшие значения подъемной силы существуют при зазорах h = 1...1,6 мм. При зазорах меньше 0,6 мм возникает отталкивающая сила. Наибольшие значения подъемной силы для этого опыта составили 11...12,8 Н, и это при довольно небольшом давлении на входе (всего 0,3 ат), экспериментально определенная сила при этом же давлении составила 2...5 Н. В опытах использовалось давление до 3 ат. В ходе экспериментальных измерений силы было выявлено, что при увеличении давления в 10 раз сила, изменяясь по квадратичному закону, увеличивается примерно в 30 раз [1]. Тогда предполагаемая сила может достигнуть значений 300 Н.

При опытном определении силы зазор не фиксировался и устанавливался самопроизвольно. Очевидно, установив упоры, удерживающие пластину на определенном оптимальном расстоянии, можно значительно увеличить подъемную силу. При этом пластина будет жестко удерживаться на торце устройства, а не плавать на воздушной подушке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Конищева О. В. Определение силы, удерживающей плоский объект посредством вихревого струйного устройства // Вестник КГТУ. Машиностроение. Красноярск : КГТУ, 2000. Вып. 21.

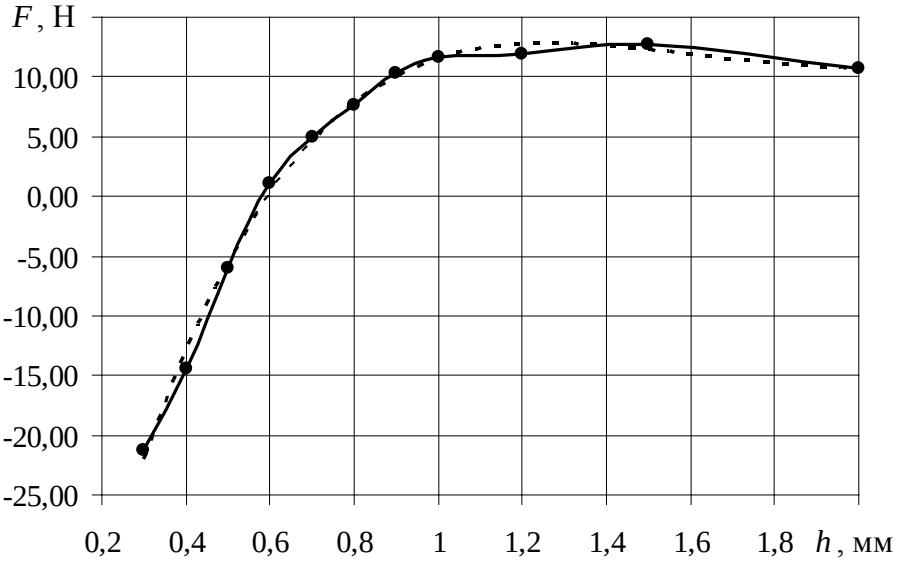


Рис. 3. Подъемная сила при различных зазорах

УДК 621:534.834:886.6

Елисеев Сергей Викторович,
д. т. н., профессор, директор
НОЦ современных технологий, системного анализа и моделирования
Иркутского государственного университета путей сообщения, тел.: 8(3952)598428, e-mail: eliseev_s@inbox.ru
Ковыршин Сергей Владимирович,
к. т. н., доцент кафедры «Управление техническими системами»
Иркутского государственного университета путей сообщения, e-mail: sergcow@mail.ru
Большаков Роман Сергеевич,
аспирант Иркутского государственного университета путей сообщения, e-mail: bolshakov_rs@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ КОМПАКТОВ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ В МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ. ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ЭЛЕМЕНТАМИ СИСТЕМ И ФОРМЫ СОЕДИНЕНИЯ

S.V. Eliseev, S.V. Kovirshin, R.S. Bolshakov

CONSTRUCTION FEATURES OF ELASTIC ELEMENTS COMPACTS IN MECHANICAL OSCILLATION SYSTEMS. INTERACTIONS WITH SYSTEM SELEMENTS AND CONNECTION FORMS

Аннотация. *Рассматриваются возможности упрощения построения математических моделей механических систем с несколькими степенями свободы на основе введения понятия об упругом компакте или квазипружине. Предложено использование передаточных функций в режимах зануления промежуточных масс. Статические свойства системы определяются из передаточной функции системы при комплексной переменной, равной нулю. Приведены примеры определения параметров упругих компактов из различных элементов типового набора.*

Ключевые слова: *приведенная жесткость, динамическая жесткость, упрощение механических колебательных систем, передаточная функция.*

Abstract. *Simplification possibilities of mathematical models formation of mechanical systems with several degrees of freedom based on definition introduction about elastic compact or quasispring are considered. Transfer functions using in zeroing intermediate masses regimes is offered. Statical features of system are defined from transfer function of system at complex variable which is equal to zero. Estimation parameters examples of elastic compacts from different elements of standard set are shown.*

Keywords: *reducing elasticity, dynamical elasticity, simplification of mechanical oscillation systems, transfer function.*

Введение

Упругие устройства в теории колебаний и ее приложениях являются одними из основных элементов, обеспечивающих колебательный характер динамического состояния системы. Конструктивно-технические формы реализации упругих элементов широко представлены во многих работах, например [1–4]. Особенности упругих систем достаточно многообразны и нашли отражение в работах, связанных с учетом нелинейностей и конструктивного демпфирования [5–8]. Вместе с тем многие вопросы детализации представлений о комплексных свойствах пружин по-прежнему привлекают внимание специалистов в области динамики машин. В частности, это определяется тем, что реальные элементы механических систем отличаются от идеальных и физико-механические свойства пружин во многих случаях представляют собой проявление некоторой интеграции свойств. Особенно характерно такое восприятие упругих элементов в теории подвесок транспортных средств, задачах создания вибрационной техники, а также в задачах защиты машин и оборудования от вибрационных воздействий [9–12].

При всем внимании к вопросам использования упругих элементов при решении задач проектирования, расчета и эксплуатации технических объектов в меньшей степени оказалась изученной оценка свойств упругих систем, то есть упругих свойств структур, формируемых на основе соединений упругих элементов как таковых и во взаи-

модействиях с другими элементами в частности. Особый интерес в этом плане вызывают взаимодействия с учетом связей, привносимых рычажными механизмами [13, 14]. В предлагаемой статье показаны возможности обобщенного подхода к оценке упругих свойств систем, которые в своем составе содержат разнородные элементы и связи.

I. Общие положения. Постановка задачи исследования

Рассмотрим ряд типовых расчетных схем технических объектов, полагая, что простейшими формами физических моделей являются механические системы с одной и двумя степенями свободы (рис. 1). В качестве внешнего воздействия в системах рассматривается гармоническая сила Q. Для описания динамических свойств используется операторный метод, предполагающий преобразования Лапласа по отношению к исходным математическим моделям в виде обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами и последующим построением структурных схем и соответствующих передаточных функций [13].

Такое упрощение (рис. 2) обеспечивается «обнулением» массоинерционного элемента ($m_1 = 0$).

При рассмотрении соединения большего числа элементов используется аналогичный вышерассмотренному прием, опирающийся на определение передаточной функции системы, из которой, в свою очередь, путем упрощения находится искомая общая упругость. По существу, определяются свойства некоторого комплекса элементов, в частности упругих элементов в соединении с другими типовыми элементами механических систем.

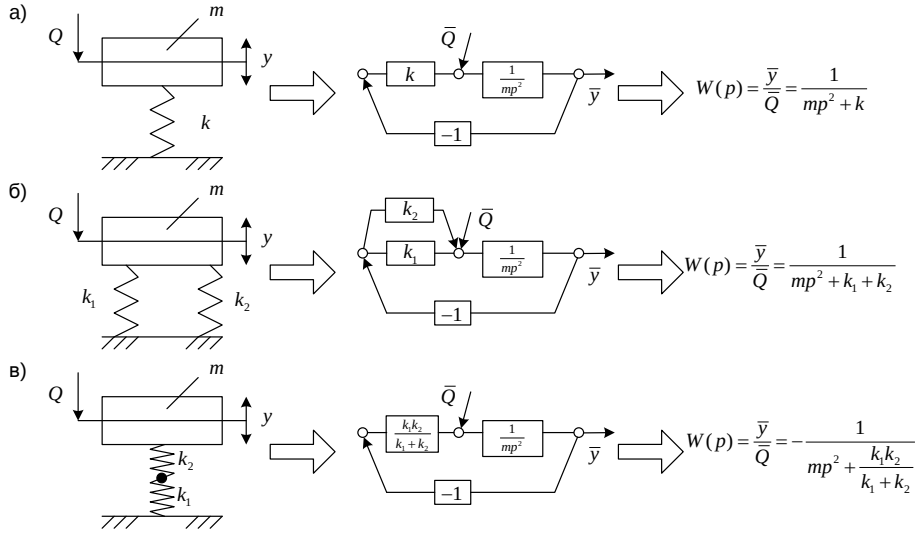
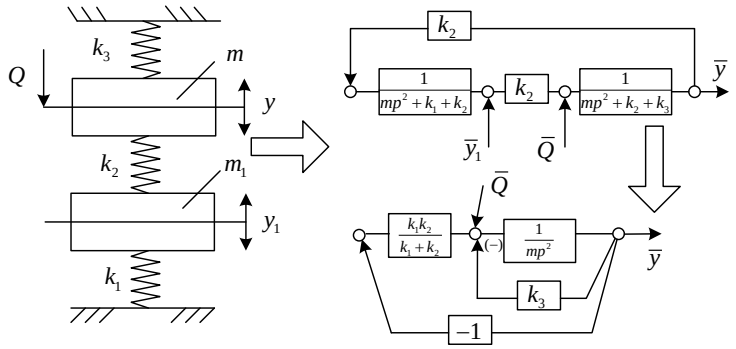


Рис. 1. Структурные схемы представления упругих элементов в системах с одной степенью свободы: *а* – одиночная пружина; *б* – параллельное соединение пружин; *в* – последовательное соединение пружин



$$W(p) = \frac{\overline{y}}{\overline{Q}} = -\frac{m_1 p^2 + k_1 + k_2}{(m_1 p^2 + k_1 + k_2)(mp^2 + k_2 + k_3) - k_2^2} \to m_1 = 0$$

$$m_1 = 0 \to W(p) = \frac{\overline{y}}{\overline{Q}} = -\frac{k_1 + k_2}{(k_1 + k_2)(mp^2 + k_2 + k_3) - k_2^2} = -\frac{1}{mp^2 + k_3 + \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2}}$$

Рис. 2. Схема получения последовательного соединения упругих элементов k_1 и k_2 путем «зануления» промежуточной массы m_1

Таким образом, при рассмотрении в механической системе упругих свойств некоторого комплекса (или компакта) можно выделить объект, то есть массу, к которой прикладывается сила, а остальная часть системы рассматривается как дополняющая по отношению к объекту часть общей системы. После определения соответствующей передаточной функции путем упрощений находятся необходимые статические и динамические характеристики.

II. Возможные формы соединения упругих элементов в структуры

Отметим, что рассмотренная выше передаточная функция в виде отношения изображений (входного (сила Q) и выходного (смещение y)) представляет собой динамическую податливость [13]. Для получения динамической жесткости необходимо произвести инверсию передаточной функции. Если система состоит только из идеальных пружин, то свойства упругого комплекса не будут зависеть от комплексной переменной p. Однако при наличии в структуре упругого комплекса (или компакта) диссипативных элементов и устройств для преобразования движения, называемых дифференцирующими звеньями первого и второго порядка, динамическая жесткость будет зависеть от комплексной переменной p. То есть динамическая жесткость системы в обобщенном смысле предполагается зависящей от частоты возмущающей силы. Передаточная функция, примеры определения которой приведены на рис. 2, дает возможность находить жесткость системы при статическом нагружении. Для этого надо сделать инверсию передаточной функции и принять $p = 0$; жесткость системы может таким образом рассматриваться как величина, обратная модулю передаточной функции в том ее определении, какое сделано выше.

Рассмотрение упругости системы обычно связано с силой, которая прикладывается к массоинерционному элементу системы. В этом случае смещение от действия силы определяется в той же точке. Если сила прикладывается к упругому элементу, то ситуации могут быть различными (рис. 3).

Упругость системы, как видно из рис. 3, зависит от вариантов взаимного расположения точек приложения сил и точек наблюдения за смещением координат, поскольку возможны ситуации для определения упругости системы, когда сила прикладывается (к примеру, рис. 3, *а*) к массе m_1, а упругость системы оценивается по смещению координаты y_2. Структурная схема системы на рис. 3, *а* приведена на рис. 4.

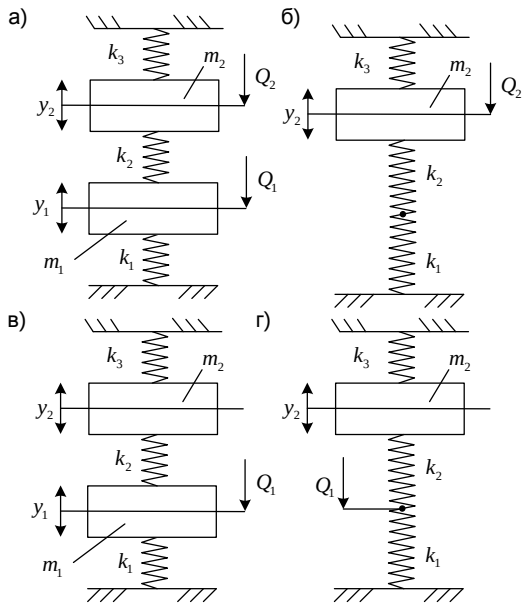


Рис. 3. Схемы для рассмотрения различных вариантов приложения сил

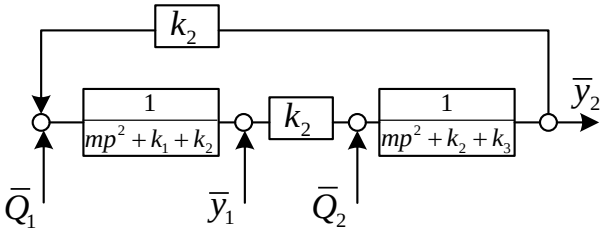


Рис. 4. Структурная схема система, соответствующая рис. 3, *а*

Из структурной схемы системы могут быть определены передаточные функции

$$W_1(p) = \frac{\overline{y}_1}{\overline{Q}_1}, W_2(p) = \frac{\overline{y}_1}{\overline{Q}_2}, W_3(p) = \frac{\overline{y}_2}{\overline{Q}_1}, W_4(p) = \frac{\overline{y}_2}{\overline{Q}_2},$$

что позволяет произвести необходимые оценки. Примем $Q_1 = 0$, $Q_2 \neq 0$, тогда

$$W_1(p) = \frac{\overline{y}_2}{\overline{Q}_2} = \frac{m_1 p^2 + k_1 + k_2}{A}, \qquad (1)$$

где

$$A = (m_1 p^2 + k_1 + k_2)(m_2 p^2 + k_2 + k_3) - k_2^2 \quad (2)$$

– характеристическое уравнение.

Из (1) можно найти статическую жесткость системы (рис. 3, *б*), которая составит

$$k' = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2} + k_3. \qquad (3)$$

Для случая $Q_2 = 0$, $Q_1 \neq 0$

$$W(p) = \frac{\overline{y}_1}{\overline{Q}_1} = \frac{m_2 p^2 + k_2 + k_3}{A}, \qquad (4)$$

откуда найдем, что при $m_2 = 0$ (рис. 3, *в*)

$$k'' = k_1 + \frac{k_2 k_3}{k_2 + k_3}. \qquad (5)$$

Если принять, что при $m_1 = 0$ (рис. 3, *г*), то

$$W(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{Q}_1} = \frac{k_2}{(m_2 p^2 + k_2 + k_3)(k_1 + k_2) - k_2^2} = \\ = \frac{k_2}{(m_2 p^2 + k_2 + k_3)k_1 + m_2 p^2 + k_2 k_3}, \quad (6)$$

откуда

$$k''' = \frac{k_2}{k_2 k_1 + k_3 k_1 + k_2 k_3}, k''' = k_3 + k_1 + \frac{k_3 k_1}{k_2}. \quad (7)$$

Если на схеме на рис. 3, *г* принять, что $k_3 = 0$, то $k''' = k_1$.

В свою очередь, примем на схеме рис. 3, *а*, что $m_2 = 0$, $k_3 = 0$, $Q_2 \neq 0$, $m_1 \neq 0$.

$$W(p) = \frac{\bar{y}_1}{\bar{Q}_2} = \frac{k_2}{(k_2 + k_3)(m_1 p^2 + k_1 + k_2) - k_2^2}, \quad (8)$$

откуда следует, что

$$k^{IV} = k_1 + k_3 + k_1 k_3, \quad (9)$$

откуда при $k_3 = 0$ найдем $k^{IV} = k_1$.

Этот случай отражает то обстоятельство, что приложение силы Q_2 непосредственно к пружине k_2 соответствует непосредственному приложению Q_2 к массе m_1. Приведенный результат находится в соответствии с результатами [15].

III. Система с тремя степенями свободы

Рассмотрим более сложную структуру, состоящую из трех массоинерционных элементов, образующих механическую цепь (рис. 5).

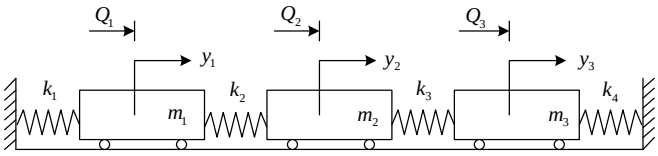


Рис. 5. Механическая цепь с тремя массоинерционными элементами

При рассмотрении цепной механической системы (рис. 5) связь между элементами m_1, m_2, m_3 обеспечивается упругими элементами $k_2 \neq 0$, $k_3 \neq 0$. Если $k_1 = 0$ и $k_4 = 0$, то система открыта и имеет цикличную координату. Для формирования определенного движения необходимо соединение одного из элементов m_3 и m_3 с неподвижной основой, тогда возможны ситуации: $k_1 = 0$, $k_4 \neq 0$, $k_1 \neq 0$, $k_4 = 0$, $k_1 \neq 0$, $k_4 \neq 0$. В последнем случае $k_1 \neq 0$, $k_4 \neq 0$ цепь на рис. 5 может рассматриваться замкнутой. На рис. 6 показаны некоторые конфигурации замкнутых механических цепей.

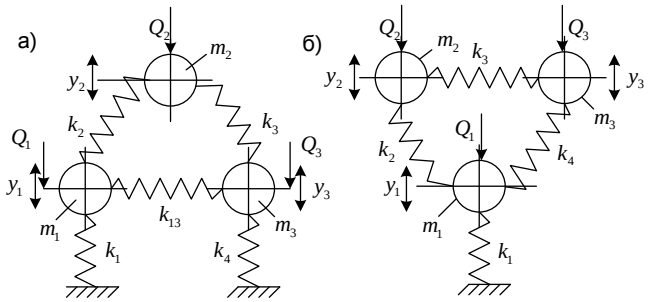


Рис. 6. Механические системы с тремя степенями свободы при наличии замкнутых контуров: а – при введение упругой связи k_{13}; б – введение трех упругих связей k_1, k_2, k_4 на одном элементе m_1

Для построения математических моделей на рис. 5 введем дополнительную упругую связь k_{13} и запишем выражения для кинетической и потенциальной энергий:

$$T = \frac{1}{2} m_1 \dot{y}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{y}_2^2 + \frac{1}{2} m_3 \dot{y}_3^2, \quad (10)$$

$$П = \frac{1}{2} k_1 y_1^2 + \frac{1}{2} k_2 (y_2 - y_1)^2 + \frac{1}{2} k_3 (y_3 - \\ - y_2)^2 + \frac{1}{2} k_4 y_3^2 + \frac{1}{2} k_{13} (y_3 - y_1)^2. \quad (11)$$

Уравнения движения системы, приведенной на рис. 5, имеют вид:

$$m_1 \ddot{y}_1 + k_1 y_1 + k_2 y_1 + k_{13} y_1 - k_2 y_2 - k_{13} y_3 = Q_1, \quad (12)$$

$$m_2 \ddot{y}_2 + k_2 y_2 + k_2 y_3 + k_2 y_1 - k_3 y_2 = Q_2, \quad (13)$$

$$m_3 \ddot{y}_3 + k_3 y_3 + k_{13} y_3 + k_4 y_3 - \\ - k_{13} y_1 - k_{13} y_1 - k_3 y_2 = Q_3. \quad (14)$$

В табл. 1 приведены коэффициенты уравнений (12)–(14).

Таблица 1

Коэффициенты системы уравнений в координатах y_1, y_2, y_3

a_{11}	a_{12}	a_{13}	*варианты*
$m_1p^2 + k_1 + k_2 + k_{13}$	$-k_2$	k_{13}	*Рис. 4.* $k_{13} \neq 0$
$m_1p^2 + k_1 + k_2$	$-k_2$	0	$k_{13} = 0$
a_{21}	a_{22}	a_{23}	*варианты*
$-k_2$	$m_2p^2 + k_2 + k_3$	$-k_3$	*Рис.4* $k_{13} \neq 0$
$-k_2$	$m_2p^2 + k_2 + k_3$	$-k_3$	$k_{13} = 0$
a_{31}	a_{32}	a_{33}	*варианты*
$-k_{13}$	$-k_3$	$m_3p^2 + k_3 + k_4 + k_{13}$	*Рис.4* $k_{13} \neq 0$
0	$-k_3$	$m_1p^2 + k_3 + k_4$	$k_{13} = 0$

Примечание. Табл. 1 может быть использована для случаев открытой цепи ($k_4 = 0$) и свободного движения ($k_4 = 0$, $k_4 = 0$).

Несколько иначе может быть построена математическая модель для системы на рис. 6, *а*, *б*. В этом случае кинетическая энергия соответствует выражению (10), а выражения для потенциальной энергии соответственно имеют вид:

$$П = \frac{1}{2}k_1 y_1^2 + \frac{1}{2}k_{13}(y_3 - y_1)^2 + \frac{1}{2}k_4 y_3^2 + \\ + \frac{1}{2}k_2(y_2 - y_1)^2 + \frac{1}{2}k_3(y_3 - y_2)^2, \quad (15)$$

$$П = \frac{1}{2}k_1 y_1^2 + \frac{1}{2}k_2(y_2 - y_1)^2 + \frac{1}{2}k_3 \times \\ \times (y_3 - y_2)^2 + \frac{1}{2}k_4(y_3 - y_2)^2. \quad (16)$$

В табл. 2 приведены коэффициенты уравнений движения для системы на рис. 6, *а*.

Таблица 2

Коэффициенты уравнений движения для системы по рис. 6, *а*

a_{11}	a_{12}	a_{13}
$m_1p^2 + k_1 + k_2 + k_{13}$	$-k_2$	$-k_{13}$
a_{21}	a_{22}	a_{23}
$-k_2$	$m_2p^2 + k_2 + k_3$	$-k_3$
a_{31}	a_{32}	a_{33}
$-k_{13}$	$-k_3$	$m_3p^2 + k_3 + k_4 + k_{13}$

В свою очередь, система на рис. 6, *б* имеет систему уравнений, коэффициенты которых представлены в табл. 3.

Таблица 3

Коэффициенты уравнений движения для системы по рис. 6, *б*

a_{11}	a_{12}	a_{13}
$m_1p^2 + k_1 + k_2$	$-k_2$	0
a_{21}	a_{22}	a_{23}
$-k_2$	$m_2p^2 + k_2 + k_3 + k_4$	$-k_3 - k_4$
a_{31}	a_{32}	a_{33}
0	$-k_3 - k_4$	$m_3p^2 + k_3 + k_4$

Из анализа табл. 1, 2, 3 следует, что будут различными структурные схемы всех систем на рис. 5 и 6 и передаточные функции систем, используемые для оценки упругих свойств как при статическом, так и при динамическом нагружениях. Случаи совместного нагружения по нескольким координатам не рассматриваются.

В структурных схемах на рис. 7 *а*, *б*, приведены изменения парциальных систем и перекрестных связей между системами.

Для нахождения передаточных функций по трем координатам y_1, y_2, y_3 от входных возмущений Q_1, Q_2, Q_3 можно воспользоваться формулами [15], поскольку структурные преобразования являются достаточно громоздкими.

$$\overline{y}_1 = \frac{Q_1(a_{22}a_{33} - a_{23}^2) + Q_2(a_{13}a_{32} - \\ - a_{12}a_{33}) + Q_3(a_{12}a_{23} - a_{13}a_{22})}{A}; \quad (17)$$

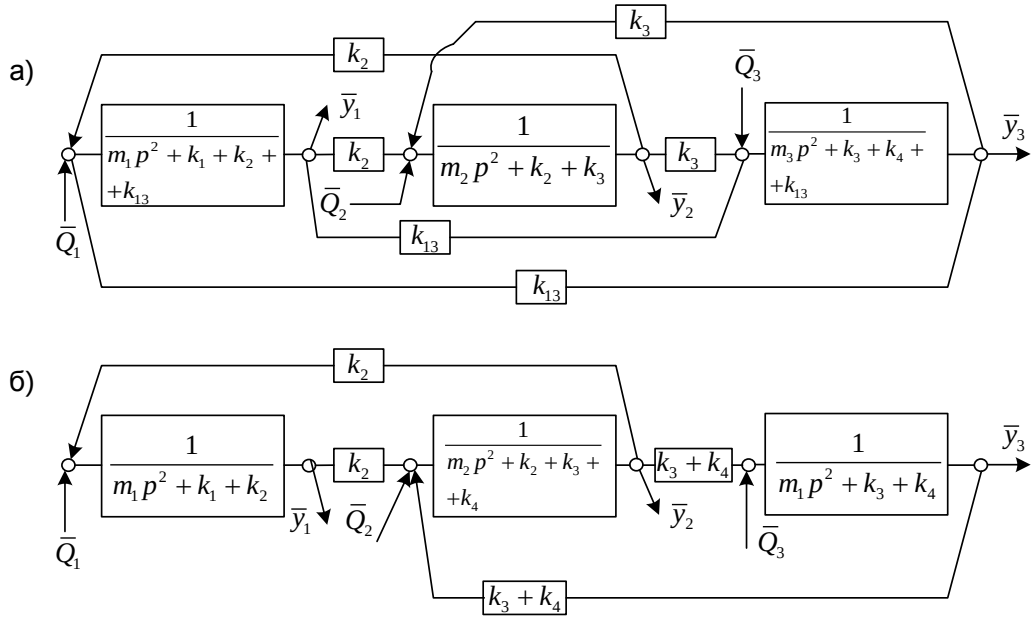


Рис. 7. Структурные схемы систем: а – схема соответствует рис. 5; б – схема соответствует рис. 6, *б*

$$\bar{y}_2 = \frac{Q_1(a_{23}a_{31} - a_{21}a_{33}) + Q_2(a_{11}a_{33} - \ldots}{A} \quad (18)$$
$$\underline{\ldots - a_{13}^2) + Q_3(a_{13}a_{21} - a_{11}a_{23})}$$

$$\bar{y}_3 = \frac{Q_1(a_{21}a_{32} - a_{22}a_{31}) + Q_2(a_{12}a_{31} - \ldots}{A} \quad (19)$$
$$\underline{\ldots - a_{11}a_{32}) + Q_3(a_{11}a_{22} - a_{12}^2)}$$

где

$A = a_{11}a_{22}a_{33} - a_{11}a_{23}a_{32} + a_{13}a_{21}a_{32} - a_{33}a_{12}^2 + a_{12}a_{23}a_{31} - a_{22}a_{13}a_{31}$ –характеристическое уравнение.

Рассмотрим ряд частных случаев, отражающих характерные особенности упругих структур. Примем $k_4 = 0$, $Q_2 = 0$, $Q_3 = 0$, $Q_1 \neq 0$, $k_{13} = 0$. Передаточная функция системы (рис. 6, *а*) принимает вид

$$W_1(p) = \frac{\bar{y}_1}{\bar{Q}_1} = \frac{(k_2 + k_3)(k_3 + k_4 + k_{13}) - k_3^2}{(m_1 p^2 + k_1 + k_2 + k_{13})(k_2 + \ldots}$$
$$\ldots\overline{\ldots + k_3)(k_3 + k_4 + k_{13}) - (m_1 p^2 + k_1 + k_2 + k_{13})}\ldots \quad (20)$$
$$\ldots\overline{\ldots \times k_3^2 + (-k_{13})(-k_2)(-k_3) - (k_3 + k_4 + k_{13}) \times}\ldots$$
$$\ldots\overline{\ldots \times k_2^2 + (-k_{13})(-k_2)(-k_3) - (k_2 + k_3)(-k_{13})^2}.$$

Сделаем ряд преобразований для выражения (20) и получим приведенную жесткость:

$$k_{np} = k_1. \quad (21)$$

Из анализа следует, что приведенная жесткость системы определяется значением жесткости пружины k_1. Если $k_4 \neq 0$, то приведенная жесткость определится выражением

$$k'_{np} = k_1 + \frac{k_2 k_3 k_4 + k_{13} k_4 (k_2 + k_3)}{(k_2 + k_3)(k_{13} + k_4) + k_2 k_3}. \quad (22)$$

В табл. 4 даны значения приведенных жесткостей при учете нагружения элементов m_1, m_2, m_3 соответственно силами Q_1, Q_2, Q_3 (варианты $k_4 = 0$, $k_4 \neq 0$).

Таким образом приведенная жесткость в точке приложения силы формируется упругими связями, которые находятся с двух сторон выделенного массоинерционного элемента. При этом общее значение приведенной жесткости зависит от особенностей структуры самой цепи, в частности таких свойств, как открытость и замкнутость, что можно сопоставить с возможностями определенных отражений, если процессы будут носить волновой характер. Хотя в теории упругих колебаний тел, имеющих, например, вид балок, продольные колебания могут рассматриваться как волновые процессы с отражением от свободных концов [16].

IV. Особенности моделей цепных систем

Полагая, что на схеме (рис. 6) упругости k_1, k_2, k_3, k_4 не равны нулю, $k_{13} = 0$, запишем последовательные значения приведенных жесткостей, переходя от m_1 к m_3 с одним и тем же значением внешней силы Q, тогда:

по координате y_1 –

$$k_{np} = k_1 + \frac{k_2 k_3 k_4}{k_2 k_3 + k_3 k_4 + k_2 k_4}, \quad (24)$$

по координате y_2 –

$$k_{np} = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2} + \frac{k_3 k_4}{k_3 + k_4}, \quad (25)$$

по координате y_3 –

$$k_{np} = k_4 + \frac{k_1 k_2 k_3}{k_1 k_2 + k_2 k_3 + k_1 k_3}. \quad (26)$$

При $k_4 = 0$ имеем соответственно:

по координате y_1 –

$$k_{np} = k_1; \quad (27)$$

по координате y_2 –

$$k_{np} = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2} \quad (28)$$

по координате y_3 –

$$k_{np} = \frac{k_1 k_2 k_3}{k_1 k_2 + k_2 k_3 + k_1 k_3}. \quad (29)$$

Если полагать, что $k_{13} \neq 0$, то при условиях нагружения силой Q получим:

по координате y_1 –

$$k_{np} = k_1; \quad (30)$$

по координате y_2 –

$$k_{np} = \frac{k_{13}(k_1 k_3 + k_1 k_2) + k_1 k_2 k_3}{k_{13}(k_1 + k_2 + k_3) + k_2 k_3 + k_1 k_3}; \quad (31)$$

по координате y_3 –

$$k_{np} = \frac{k_{13}(k_1 k_2 + k_1 k_3) + k_1 k_2 k_3}{(k_1 + k_{13})(k_2 + k_3) + k_2 k_3}. \quad (32)$$

Введение межкоординатных связей изменяет свойства упругой структуры (или упругого компакта). Отметим, что при перемещении положение точки приложения силы с увеличением числа элементов приведенная жесткость будет уменьшаться. Отличия приведенных жесткостей для открытых и замкнутых цепей имеют значения для построения математических моделей распространения волн.

Таблица 4

Значения приведенных жесткостей

$k'_{пр}$ ($Q_1 \neq 0, Q_2 = 0, Q_3 = 0$)	$k''_{пр}$ ($Q_1 = 0, Q_2 \neq 0, Q_3 = 0$)	$k'''_{пр}$ для y_3 ($Q_1 = 0, Q_2 = 0, Q_3 \neq 0$)	варианты
$k_1 + \dfrac{k_2k_3k_4 + k_{13}k_4(k_2+k_3)}{(k_2+k_3)(k_{13}+k_4) + k_2k_3}$.	$\dfrac{k_1(k_2k_3 + (k_2+k_3)(k_{13}+k_4)) + k_2k_3k_4 + k_{13}k_4(k_2+k_3)}{(k_1+k_2)(k_3+k_4+k_{13}) + k_{13}(k_3+k_4)}$	$\dfrac{k_1(k_2k_3 + (k_2+k_3)(k_{13}+k_4)) + k_2k_3k_4 + k_{13}k_4(k_2+k_3)}{k_2k_3 + (k_1+k_{13})(k_2+k_3)}$	Рис.5а. $k_4 \neq 0$
k_1	$\dfrac{k_1(k_2k_3 + (k_2+k_3)k_{13})}{(k_1+k_2)(k_3+k_{13}) + k_{13}k_3}$	$\dfrac{k_1(k_2k_3 + (k_2+k_3)k_{13})}{k_2k_3 + (k_1+k_{13})(k_2+k_3)}$	$k_4 = 0$
$k_{13} = 0$			варианты
$k_1 + \dfrac{k_2k_3k_4 + k_4(k_2+k_3)}{(k_2+k_3)k_4 + k_2k_3}$	$\dfrac{k_1(k_2k_3 + (k_2+k_3)k_4) + k_2k_3k_4}{(k_1+k_2)(k_3+k_4)}$	$\dfrac{k_1(k_2k_3 + (k_2+k_3)k_4) + k_2k_3k_4}{k_2k_3 + k_1(k_2+k_3)}$	Рис.5а. $k_4 \neq 0$
k_1	$\dfrac{k_1k_2k_3}{(k_1+k_2)k_3}$	$\dfrac{k_1k_2k_3}{k_2k_3 + k_1(k_2+k_3)}$	$k_4 = 0$
$k_3 = 0, k_{13} = 0$			варианты
$k_1 + \dfrac{k_4k_2}{k_2+k_4}$	$\dfrac{k_1k_2k_4}{(k_1+k_2)k_4}$	$\dfrac{k_1k_2k_4}{k_1k_2}$	Рис.5а. $k_4 \neq 0$
k_1	0	0	$k_4 = 0$
$k_3 = 0$			варианты
$k_1 + \dfrac{k_{13}k_4k_2}{k_2(k_{13}+k_4)}$	$\dfrac{k_1k_2(k_{13}+k_4) + k_{13}k_4k_2}{(k_1+k_2)(k_4+k_{13}) + k_{13}k_4}$	$\dfrac{k_1k_2(k_{13}+k_4) + k_{13}k_4k_2}{(k_1+k_{13})k_2}$	Рис.5а. $k_4 \neq 0$
k_1	$\dfrac{k_1k_2k_{13}}{(k_1+k_2)k_{13}}$	$\dfrac{k_1k_2k_{13}}{(k_1+k_{13})k_2}$	$k_4 = 0$
$k_2 = 0$			варианты
$k_1 + \dfrac{k_{13}k_4k_3)}{k_3(k_{13}+k_4)}$	$\dfrac{k_1k_3(k_{13}+k_4) + k_{13}k_4k_3}{k_1(k_3+k_4+k_{13}) + k_{13}(k_3+k_4)}$	$\dfrac{k_1k_3(k_{13}+k_4) + k_{13}k_4k_3)}{(k_1+k_{13})k_3}$	Рис.5а. $k_4 \neq 0$
k_1	$\dfrac{k_1k_3k_{13}}{k_1(k_3+k_{13}) + k_{13}k_3}$	$\dfrac{k_1k_3k_{13}}{(k_1+k_{13})k_3}$	$k_4 = 0$
$k_1 = 0$			варианты
$\dfrac{k_2k_3k_4 + k_{13}k_4(k_2+k_3)}{(k_2+k_3)(k_{13}+k_4) + k_2k_3}$	$\dfrac{k_2k_3k_4 + k_{13}k_4(k_2+k_3)}{k_2(k_3+k_4+k_{13}) + k_{13}(k_3+k_4)}$	$\dfrac{k_2k_3k_4 + k_{13}k_4(k_2+k_3)}{k_2k_3 + k_{13}(k_2+k_3)}$	Рис.5а. $k_4 \neq 0$
k_1	0	0	$k_4 = 0$
$k_1 = 0, k_2 = 0$			варианты
$\dfrac{k_{13}k_4k_3}{k_3(k_{13}+k_4)}$	$\dfrac{k_{13}k_4k_3}{k_{13}(k_3+k_4)}$	$\dfrac{k_{13}k_4k_3}{k_{13}k_3}$	Рис.5а. $k_4 \neq 0$
0	0	0	$k_4 = 0$
$k_1 = 0, k_{13} = 0$			варианты
$\dfrac{k_2k_3k_4}{(k_2+k_3)k_4 + k_2k_3}$.	$\dfrac{k_2k_3k_4}{k_2(k_3+k_4)}$	$\dfrac{k_2k_3k_4}{k_2k_3}$	Рис.5а. $k_4 \neq 0$
0	0	0	$k_4 = 0$

Примечание: рассматриваются случаи $Q_1 \neq 0, Q_2 = Q_3 = 0$, $Q_2 \neq 0, Q_1 = Q_3 = 0$, $Q_3 \neq 0, Q_1 = Q_2 = 0$.

Особенностью выше приведенных соображений является то, что движение системы даже при наличии нескольких степеней свободы не предполагает пространственных форм взаимодействия и преобразования движений. Алгоритм построения приведенных жесткостей в статических ситуациях основан на применении правил последовательного и параллельного соединения пружин, что характерно для теории цепей в целом [20] и для механических цепей в частности. Структуры из упругих элементов (или компакты) могут рассматриваться как квазипружины, поскольку усложнение их форм не изменяет правил их соединения, создания и преобразования. Аналогичная ситуация возникает и при рассмотрении вопросов, связанных с оценкой динамической жесткости. Однако прямое распространение вышеприведенного подхода должно вестись с учетом особенностей систем (линейность, наличие твердых тел и их сочленений, планарность) [4].

V. Рычажные связи в системах с упругими элементами

Введение и учет рычажных связей в механических колебательных системах привели к расширению представлений о свойствах систем в статических и динамических условиях взаимодействия совтавляющих элементов [1, 13, 14]. Вместе с тем рычажные механизмы в работах по теории цепей и операторным методам анализа и синтеза рычажные механизмы не рассматривались на уровне типовых элементов, поскольку представления о дуальных элементах цепей, имеющих две точки для сочленений, не распространялись на рычаги, которые для обеспечения взаимодействия с другими элементами используют три точки. Работы последних лет показали, что рычажные механизмы органично вписываются в процессы формирования структур из упругих элементов (или компактов).

1. Рассмотрим ряд примеров взаимодействия упругих элементов и рычагов при формировании приведенной жесткости системы (рис. 8).

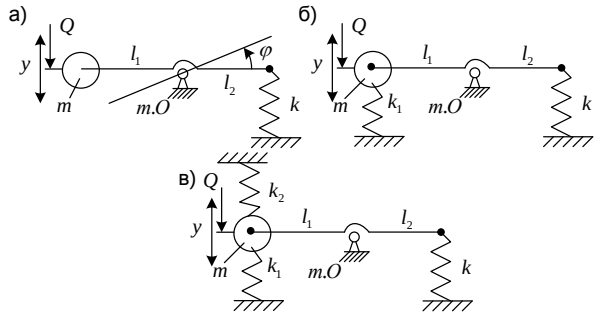


Рис. 8. Расчетные схемы систем с упруго-рычажными связями

Для построения математических моделей систем воспользуемся схемой на рис. 1, *в*, поскольку схемы на рис. 1, *а* и рис. 1, *б* можно рассматривать как упрощения схемы на рис. 1, *в*. Выражения для кинетической и потенциальной энергий имеют вид

$$T = \frac{1}{2} m\dot{y}^2, \tag{33}$$

$$\Pi = \frac{1}{2} k(yi)^2 + \frac{1}{2} k_1 y^2 + \frac{1}{2} k_2 y^2, \tag{34}$$

где $i = \frac{l_2}{l_1}$.

Запишем уравнение движения по координате *y*:

$$m_1 \ddot{y} + y(k_1 + k + ki^2) = Q, \tag{35}$$

Структурная схема системы приведена на рис. 9.

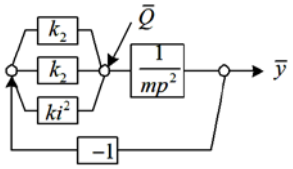


Рис. 9. Структурная схема механической колебательной системы

В соответствии со структурной схемой на рис. 1, *в* передаточная функция определится выражением

$$W(p) = \frac{\bar{y}}{\bar{Q}} = \frac{1}{mp^2 + k_1 + k_2 + ki^2}. \tag{36}$$

Сделаем инверсию (36) и найдем, что схема на рис. 8, *в* может быть трансформирована, как показано на рис. 10.

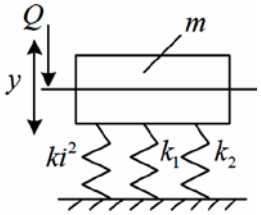


Рис. 10. Приведенная схема с рычажными связями

Приведенная жесткость системы имеет вид

$$k_{np} = ki^2 + k_1 + k_2. \tag{37}$$

Из выражения (37) могут быть получены приведенные жесткости для схемы на рис. 8, *а* – $k_{np} = ki^2$; для схемы на рис. 8, *б* – $k_{np} = k_1 + ki^2$. Таким образом, рычажный механизм второго рода (рис. 9) в упругой системе приведенной пружины (или упругого компакта) учитывается через передаточное отношение рычага $i = l_2/l_1$. В данном случае не учитывается свойство рычага менять

направление движения, поскольку в выражении (34) для потенциальной энергии координата *y* входит в квадрате. В общем случае для рычага второго рода передаточное отношение *i* берется с отрицательным знаком [14].

При использовании рычажного механизмы первого рода, как показано на рис. 11, можно получить аналогичные результаты.

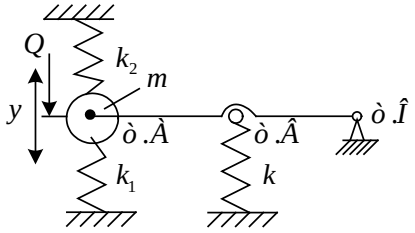


Рис. 11. Расчетная схема системы с рычагом первого рода (*OA* = l_1, *OB* = l_2)

В соответствии с рис. 3 имеем

$$T = \frac{1}{2} m\dot{y}^2, \qquad (38)$$

$$П = \frac{1}{2} k_1 y^2 + \frac{1}{2} k_2 y^2 + \frac{1}{2} k (iy)^2, \qquad (39)$$

где $i = \frac{l_2}{l_1} = \frac{OB}{OA}$.

Приведенная жесткость системы будет иметь такое же значение $k_{пр} = ki^2 + k_1 + k_2$, как и в случае рычага второго рода. Отметим, что передаточное отношение рычага первого рода имеет положительный знак, так как не изменяет направление движения. Упомянутые различия имеют значение в динамических взаимодействиях, так как вид рычажной связи может определять и вид обратной связи в структурной схеме (обратная связь может быть положительной или отрицательной, что влияет на параметры передаточной функции [14]).

Заключение

Механические колебательные системы, состоящие из массоинерционных элементов, соединенных упругими, а также любыми другими из расширенного набора типовых элементов, обладающих общим свойством иметь вход в виде смещения, а выходом – усилие, могут приводиться к упрощенному виду с использованием понятия квазиупругого компакта, или квазипружины. При рассмотрении систем с несколькими степенями свободы возможно построение ансамбля из нескольких систем с одной степенью свободы. При этом число таких систем будет соответствовать числу степеней свободы исходной системы. Параметры упругого компакта, или квазипружины, определяются из соответствующей передаточной функции системы при «занулении» промежуточных масс и принятии нулевого значения комплексной переменной в выражении передаточной функции. Такая ситуация отражает статические свойства системы с несколькими степенями свободы и открывает возможности строить модели связанных колебаний с использованием предположений о различной природе связности, в том числе стохастической. Если комплексная переменная не равна нулю, то во внимание принимается динамическая жесткость типовых элементов с соответствующим аналогичным подходом к определению параметров квазипружины или квазиупругого компакта.

Исследования выполнены по гранту в рамках федеральной целевой программы «Научные и педагогические кадры инновационной России» на 2012–2013 г.г. (XLVII очередь, мероприятие 1.3.2 – естественные науки) № 14.132.21.1362.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вибрации в технике : справочник : в 6 т. Т. 6. Защита от вибраций и ударов / под ред. К.В. Фролова. М. : Машиностроение. 1983. 586 с.
2. Harris'C. M., Allan G. Shock and Vibration Handbook. New-York, [USA] : Mc Graw-Hill, 2002. 877 p.
3. Фролов К. В. Прикладная теория виброзащитных систем. М. : Машиностроение, 1985. 286 с.
4. Елисеев С. В., Резник Ю. Н., Хоменко А. П. Мехатронные подходы в динамике механических колебательных систем. Новосибирск : Наука, 2011. 383 с.
5. Оценка предельных возможностей противоударной амортизации / П. М. Алабужев, В. Я. Мищенко, С. Ф. Яцун // Динамика управляемых механических систем. Иркутск : ИПИ, 1982. С. 82–91.
6. Блехман И. И. Вибрационная механика. М. : Наука. 1994. 394 с.
7. Стокер Дж. Нелинейные колебания в механических и электрических системах. М. : Изд-во иностр. лит. 1952. 264 с.
8. Коловский М. З. Нелинейная теория виброзащитных систем. М. : Наука, 1966. 317 с.
9. Ротенберг Р.В. Подвеска автомобиля. М. : Машиностроение, 1972. 372 с.
10. Дембаремдикер А. Д. Амортизаторы транспортных машин. М. : Машиностроение, 1985. 200 с.
11. Галиев И. И., Нехаев В. А., Николаев В. А. Методы и средства виброзащиты железнодорожных экипажей. М. : ГОУ УМЦ ЖДТ, 2010. 340 с.
12. Говердовский В. Н. Геометрический синтез механизмов с отрицательной жесткостью для виброзащиты пилотов вертолетов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2010. №2 (26). С. 29–36.

13. 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 Иркутск. гос. ун-та. 2008. 523 с.
14. Елисеев С. В., Хоменко А. П., Упырь Р. Ю. Мехатроника виброзащитных систем с рычажными связями // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. № 3(23). С. 104–119.
15. Дружинский И. А. Механические цепи. Л. : Машиностроение, 1977. 247 с.
16. Цзе Ф. С., Морзе И. Е., Хинкл Р. Т. Механические колебания / под ред. И. Ф. Образцова. М. : Машиностроение. 1966. 508 с.
17. Бакалов В. П., Дмитриков В. Ф., Крук Б. И. Основы теории цепей. М. : Радио и связь. 1998. 460 с.

УДК 621.3.019

Володарский Владислав Афанасьевич,
к. т. н., старший научный сотрудник, доцент
Иркутского государственного университета путей сообщения,
тел. 8391 221 60 72, e-mail: volodarsky.vladislav@yandex.ru

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗАМЕН И РЕМОНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

V.A. Volodarsky

TECHNICAL DEVICES REPLACENTS AND REPAIRS EFFECTIVENESS

Аннотация. *Изложены результаты исследований зависимости интенсивности отказов и наработки на отказ от глубины восстановления безотказности, числа и периодичности ремонтов до замены технических устройств.*

Ключевые слова: *интенсивность отказов, наработка на отказ, безотказность, глубина восстановления, ремонт, замена, периодичность.*

Abstract. *The results of research of dependence of the intensity of failures and achievements to the refusal from the depths of the recovery procedure, the number and frequency of repairs to replacement of technical devices are considered.*

Keyword: *failure rate, operating time between failures, reliability, restoration intensity, repair, replacement, intensity.*

1. Исходные положения

Оптимизация предупредительных замен (ПЗ) и предупредительных ремонтов (ПР) технических устройств (ТУ) на основе разработанных математических моделей [1] позволяет:

- повысить уровень надежности ТУ, ритмичность и безопасность работы железнодорожного транспорта;
- снизить эксплуатационные расходы за счет уменьшения затрат на предупредительные и аварийные замены или ремонты ТУ с учетом ущерба, например из-за простоя поездов.

Рассмотрим, каким образом проводится оценка эффективности предупредительных замен и ремонтов в части повышения уровня надежности ТУ. В принципе эффективность можно оценивать по изменению следующих показателей надежности: вероятность безотказной работы (или вероятность отказов); коэффициент готовности (или коэффициент простоя); интенсивность отказов; наработка на отказ и др. Представляется целесообразным эффективность предупредительных замен и ремонтов оценивать по улучшению наиболее наглядных показателей надежности, таких как интенсивность отказов и наработка на отказ.

Известно, что проведение предупредительных замен и ремонтов целесообразно только для устройств с постепенными отказами, вызванными процессами износа и старения ТУ. Интенсивность отказов (ИО) у таких устройств со временем эксплуатации монотонно возрастает. Для описания постепенных отказов, как правило, используются распределения с коэффициентом вариации $V < 1$: Вейбулла (с параметром формы $b > 1$) и гамма (с параметром формы $m > 1$) [2], а также распределение косинуса [3]. Предупредительные замены и ремонты предотвращают рост интенсивности отказов, обеспечивая необходимый уровень надежности устройств.

Цель статьи – предложить выражения для определения средней интенсивности отказов и наработки на отказ ремонтируемых устройств и провести исследования зависимости интенсивности отказов и наработки на отказ от глубины восстановления безотказности, числа и периодичности ремонтов до замены технических устройств.

2. Эффективность по интенсивности отказов

Сначала необходимо предложить выражения для определения средней интенсивности отказов

ремонтируемых ТУ с учетом степени восстановления безотказности. Затем исследовать зависимость ИО от количества и периодичности ремонтов, глубины восстановления безотказности и коэффициента вариации распределений, используемых для описания процессов старения и износа технических устройств.

Так как распределение наработки на отказ при постепенных отказах не подчиняется экспоненциальному закону, представляется целесообразным использовать среднюю ИО за некоторое заданное время, например за период ремонта или замены. Если принять полученное среднее значение ИО практически постоянным, то можно использовать допущение об экспоненциальном распределении наработки на отказ ремонтируемых технических устройств.

В [4] рассмотрен случай проведения идеального ремонта, при котором происходит полное восстановление первоначальной безотказности, которое возможно только при замене ТУ на новое. При проведении ПЗ с периодичностью τ интенсивность отказов $\lambda(t)$, связанных с износом и старением ТУ, снижается до нуля (рис. 1). При этом изменяется распределение наработки на отказ, поскольку зависимость ИО заменяется на пилообразную кривую, с размахом от нуля до $\lambda(\tau)$, а затем снова до нуля. Среднее значение интенсивности отказов $\overline{\lambda}$ (пунктир на рис. 1) при проведении ПЗ определяется из выражения [4]

$$\overline{\lambda} = \tau^{-1}\int_0^{\tau}\lambda(t)\,dt = -\ln P(\tau)\,\tau^{-1}, \qquad (2.1)$$

где $P(\tau)$ – вероятность безотказной работы при наработке τ.

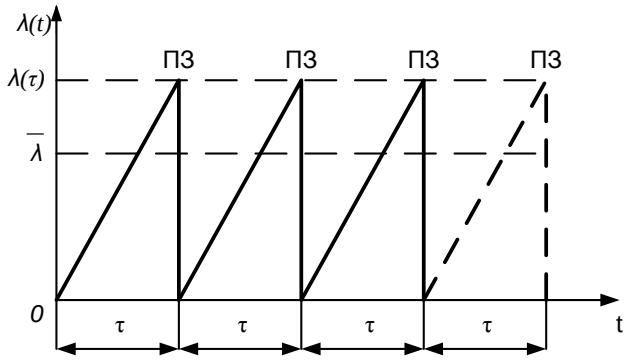


Рис. 1. Изменение интенсивности отказов при предупредительных заменах ТУ

На практике, как правило, ТУ не заменяются, а ремонтируются. При этом не происходит полного восстановления безотказности устройств. Для учета глубины восстановления безотказности предлагается использовать параметр $a > 0$, означающий «возраст» ТУ после проведения ремонта [5]. При этом значение параметра a определяется объёмом работ по замене или восстановлению составных частей ТУ при проведении ПР.

В общем случае для восстановления безотказности после проведения n ремонтов осуществляется замена ТУ на новое. Характер изменения интенсивности отказов при этом представлен на рис. 2. После проведения ПР с периодичностью τ ИО снижается до значения $\lambda(a)$, а после проведения ПЗ с периодичностью τ_p – до нуля. ИО в момент проведения ПР и ПЗ составляет $\lambda(\tau+a)$. Таким образом, кривая интенсивности отказов заменяется на пилообразную с размахом от $\lambda(a)$ до $\lambda(\tau+a)$ и затем до $\lambda(a)$ при проведении ПР и от $\lambda(\tau+a)$ до нуля при проведении ПЗ. С уменьшением периодичности ПР максимумы пилообразной кривой ИО приближаются к прямой $\lambda(a)$.

Средняя интенсивность отказов $\overline{\lambda}$, отмеченная на рис. 2 пунктирной линией, на интервале $0 - \tau_p$ определяется из выражения

$$\lambda = \tau_p^{-1}\int_0^{\tau_p}\lambda(t)dt, \qquad (2.2)$$

$$\int_0^{\tau_p}\lambda(t)dt = \int_0^{\alpha}\lambda(t)dt + (n+1)\int_{\alpha}^{\tau+\alpha}\lambda(t)dt =$$

$$= n\ln P(a) - (n+1)\ln P(\tau+a),$$

где $P(a)$ и $P(\tau+a)$ – вероятность безотказной работы соответственно при наработке a и $\tau + a$.

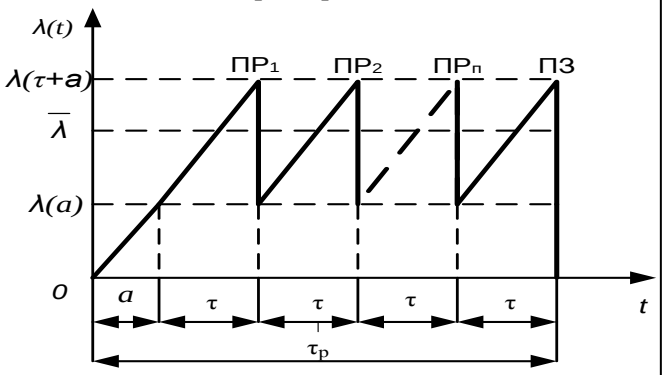


Рис. 2. Изменение интенсивности отказов при предупредительных ремонтах и замене ТУ

Подставив значение $\int_0^{\tau_p}\lambda(t)dt$ в выражение (2.2) и учитывая, что $\tau_p = a + (n+1)\tau$ (рис. 2), получим

$$\overline{\lambda} = [n\ln P(a) - (n+1)\ln P(\tau+a)]\times \times[a + (n+1)\tau]^{-1}. \qquad (2.3)$$

Рассмотрим два частных случая:

- при $n = 0$, когда проводят только замены, и $a = 0$ из (2.3) получим уравнение (2.1);

- при $n \to \infty$, когда проводят только ремонты, после раскрытия неопределенности получим

$$\bar{\lambda} = \left[\ln P(\alpha) - \ln P(\tau+\alpha)\right]\tau^{-1}. \quad (2.4)$$

В случае, когда отказы ТУ описываются распределением Вейбулла, выражение (2.3) с учетом результатов, полученных в [6], имеет вид

$$\bar{\lambda} = [(n+1)((\tau+a)\,k_b/T)^b - n(ak_b/T)^b]\times \times [a + (n+1)\,\tau]^{-1}, \quad (2.5)$$

где T – наработка на отказ;

b – параметр формы распределения Вейбулла;

$k_b = \Gamma(1 + 1/b)$, Γ – гамма-функция.

С помощью выражения (2.5) были проведены исследования зависимости средней интенсивности отказов от количества и периодичности ПР, глубины восстановления безотказности и коэффициента вариации распределения Вейбулла, используемого для описания процессов старения и износа ТУ.

1. Установлено, что с уменьшением количества ПР до замены ТУ значение $\bar{\lambda}$ снижается. Например, в случае распределения Вейбулла при $b = 4$, $T = 1000$ час, $a = 50$ час, $\tau = 200$ час имеем: при $n \to \infty$ – $\bar{\lambda} = 0{,}131\times10^{-4}$ 1/ час; при $n = 3$ – $\bar{\lambda} = 0{,}124\times10^{-4}$ 1/ час; при $n = 0$ – $\bar{\lambda} = 0{,}054\times10^{-4}$ 1/ час.

2. При уменьшении периодичности ПР значение $\bar{\lambda}$ снижается. Например, в случае распределения Вейбулла при $b = 4$, $T = 1000$ час, $a = 50$ час, $n = 3$, получаем: при $\tau = 200$ час $\bar{\lambda} = 0{,}124\times10^{-4}$ 1/ час, а при $\tau = 100$ час – $\bar{\lambda} = 0{,}030\times10^{-4}$ 1/ час.

3. При уменьшении параметра a (увеличении глубины восстановления безотказности) значение $\bar{\lambda}$ снижается, а при $a = 0$ значение $\bar{\lambda}$ определяется только периодичностью ПЗ. Например, в случае распределения Вейбулла при $b = 2$, $T = 1000$ час, $\tau = 200$ час, $n = 3$ имеем: при $a = 100$ час – $\bar{\lambda} = 0{,}288\times10^{-3}$ 1/ час, а при $a = 50$ час – $\bar{\lambda} = 0{,}224\times10^{-3}$ 1/ час.

Таким образом, уменьшая периодичность или количество ремонтов до замены ТУ или увеличивая глубину восстановления безотказности (путем расширения объема работ по замене или восстановлению составных частей ТУ при проведении ПР), можно обеспечить практически любое заданное значение средней интенсивности отказов технических устройств.

4. С уменьшением коэффициента вариации V (с ростом параметра b) значение $\bar{\lambda}$ снижается, и $\bar{\lambda} \to 0$ при $V \to 0$. Например, в случае распределения Вейбулла при $T = 1000$ час, $a = 50$ час, $\tau = 2\,00$ час, $n = 1$ имеем: при $b = 2$ ($V = 0{,}523$) – $\bar{\lambda}$ = ь $0{,}214\times10^{-3}$ 1/час, а при $b = 4$ ($V = 0{,}281$) – $\bar{\lambda} = 0{,}117\times10^{-3}$ 1/час. Это означает, что для технических устройств с явно выраженными процессами старения и износа повышается эффективность проведения предупредительного ремонта.

3. Эффективность по наработке на отказ

Сначала необходимо предложить выражения для определения средней наработки на отказ (ННО) ремонтируемых устройств с учетом глубины восстановления безотказности. Затем исследовать влияние периодичности ремонтов и глубины восстановления безотказности на значения ННО для разных распределений, используемых для описания процессов старения и износа технических устройств. Средняя наработка на отказ ТУ при проведении ПЗ определяется согласно [7] как

$$T(\tau) = \int_0^{\tau} P(t)dt \,/\left(1 - P(\tau)\right), \quad (3.1)$$

где τ – периодичность ПЗ;

$P(t)$ – вероятность безотказной работы за период времени t.

Выражение (3.1) справедливо для случая, когда полностью восстанавливается безотказность ТУ. Это означает, что «возраст» ТУ после ПЗ как бы «возвращается» в нуль. На практике ТУ, как правило, не заменяются, а ремонтируются. При этом не происходит полное восстановление их первоначальной безотказности.

Вероятность безотказной работы (ВБР) при проведении ПР с периодичностью τ и глубиной восстановления α определяется согласно [7] как условная ВБР $P(\tau/a)$ ТУ, имеющего возраст α, из выражения

$$P(\tau/\alpha) = P(\tau+\alpha)/P(\alpha). \quad (3.2)$$

Для стареющих устройств при $\tau > 0$ значение $P(\tau/\alpha)$ убывает по α. Это означает, что чем с меньшей глубиной выполняется ПР, тем ниже значение ВБР ТУ. Подставив в выражение (3.1) вместо $P(t)$ и $P(\tau)$ значения $P(t/\alpha)$ и $P(\tau/\alpha)$ из (3.2), получим уравнение для определения ННО ТУ при проведении ПР $T(\tau/\alpha)$ вида

$$T(\tau/\alpha) = \int_{\alpha}^{\tau+\alpha} P(t)dt/(P(\alpha) - -P(\tau+\alpha)). \quad (3.3)$$

Если проводятся ПЗ, то из выражения (3.3), как частный случай при $\alpha = 0$, получим уравнение (3.1). Для удобства проведения расчетов и анализа полученных результатов приведем выражение (3.3) к безразмерному виду

$$T_* = \frac{T\left(\frac{\tau}{\alpha}\right)}{T} = \int_{\tau}^{x+\tau} P(u)du/(P(\alpha) - P(x+\alpha)), \quad (3.4)$$

где T_* – относительное (нормализованное) значение ННО при проведении ПР; T – ННО ТУ, когда ПР не проводятся; $x = \tau/T$; $\alpha = a/T$; $u = t/T$ – соответственно, периодичность ПР, глубина восстановления безотказности и время в единицах ННО.

При $x = 0$ из выражения (3.4) после раскрытия неопределенности получим $T_* = 1/\lambda(\alpha)$ Это означает, что ННО при проведении ПР не может быть увеличена более чем на величину, обратную интенсивности отказов λ в точке α, оценивающей глубину восстановления безотказности ТУ. При проведении ПЗ, когда α = 0, получим $T_* = 1/\lambda(0)$. Если λ(0) = 0, то $T_* \to \infty$. Это означает, что в этом случае при $x \to 0$ может быть обеспечена практически безотказная работа ТУ.

Известно, что ПЗ или ПР повышают безотказность, если ТУ являются стареющими изделиями, то есть интенсивность отказов у которых возрастает во времени. Рассмотрим два предельных случая: 1) процессы старения в ТУ отсутствуют, что соответствует случаю экспоненциального распределения с $V = 1$; 2) ННО ТУ является детерминированной величиной, что соответствует случаю вырожденного распределения с $V = 0$.

В случае экспоненциального распределения, когда $P(u) = exp(–u)$, из выражения (3.4) получим $T_* = 1$. Это означает, что ННО не изменяется и проведение ПР нестареющих ТУ нецелесообразно. В случае вырожденного распределения, когда $P(u) = 1$ при $u \le 1$ и $P(u) = 0$ при $u > 0$, из выражения (3.4) получим $T_* \to \infty$. Это означает, что при проведении ПЗ с периодичностью $x \le 1$ обеспечивается абсолютно безотказная работа устройств.

В случае распределения косинуса, когда $P(u) = \cos u$, а $V = 0{,}376$ [3], выражение (3.4) имеет вид

$$T_* = \left(\sin(x+\alpha) - \sin\alpha\right)\left(\cos\alpha - \cos(x+\alpha)\right)^{-1}, \quad (3.5)$$

причем при $x = 0$ после раскрытия неопределенности получим $T_* = \mathrm{ctg}\alpha$.

При проведении ПЗ, когда α = 0, из выражения (3.5) получим

$$T_* = \sin x\left(1 - \cos x\right)^{-1}.$$

Зависимости T_* от x при различных значениях α, построенные с использованием уравнения (3.5), представлены на рис. 3, на котором горизонтальной пунктирной линией показано значение $T_* = 1$, когда ремонт не проводится. Из рисунка видно следующее. Во-первых, наработка на отказ ТУ существенно зависит от глубины восстановления безотказности. Например, при периодичности ПР $x = 0{,}2$ и уменьшении глубины восстановления безотказности, то есть при увеличении α от нуля до 0,4, относительная ННО ТУ снижается с 9,97 до 1,83, то есть в 5,5 раза. Во-вторых, при α > 0, начиная с некоторого значения периодичности ПР, которое назовем граничным $x_г$ (см. вертикальные пунктирные линии на рис. 3), значение T_* становится менее единицы. Это означает, что проведение ремонта ухудшает безотказность ТУ. Выражение для определения $x_г$ найдем из уравнения (3.5) при условии $T_* = 1$, $x_г = \pi/2 - 2\alpha$. Аналогично, при заданном значении x определяется граничное значение глубины восстановления безотказности $\alpha_г$ как

$$\alpha_г = \pi/4 - x/2. \quad (3.6)$$

Предельное значение глубины восстановления безотказности $\alpha_п$, когда при любом значении периодичности ПР $T_* \le 1$, найдем из условия $\lambda(\alpha_п) = 1$ как $\alpha_п = \mathrm{arctg}1 = \pi/4 \approx 0{,}786$.

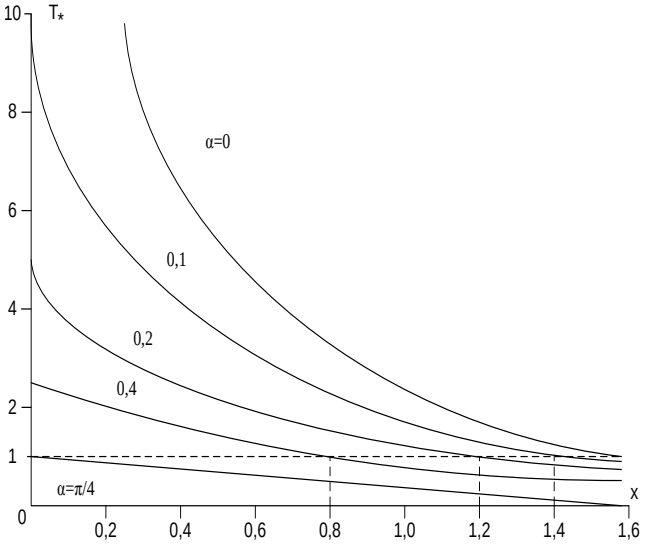


Рис. 3. Зависимости наработки на отказ при распределении косинуса от периодичности предупредительного ремонта и глубины восстановления безотказности

На рис. 4 представлена построенная с использованием уравнения (3.6) зависимость $\alpha_г$ от x (см. прямая линия 1). Причем, если точка пересечения значения $\alpha_г$ и x лежит выше прямой 1, то проведение ремонта при такой периодичности и глубине восстановления безотказности ТУ нецелесообразно. В этом случае необходимо или уменьшить периодичность ремонта, или увеличить глубину восстановления безотказности (путем расширения объема работ по замене или восстановлению составных частей ТУ) до таких значений, чтобы точка пересечения $\alpha_г$ и x лежала ниже прямой 1.

В случае гамма-распределения, когда $P(u) = \exp(-mu)\sum_0^{m-1}(mu)^i/i!$ [6], при $m = 2$ ($V = 707$) из выражения (3.4) получим

$$T_* = \frac{(1+\alpha)\exp(-2\alpha) - (1+x+\alpha)\exp(-2(x+\alpha))}{(1+2\alpha)\exp(-2\alpha) - (1+2x+2\alpha)\exp(-2(x+\alpha))}. \quad (3.7)$$

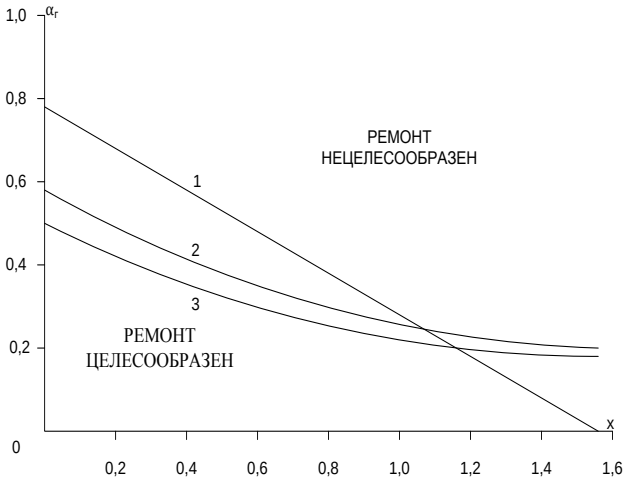


Рис. 4. Зависимости граничных значений глубины восстановления безотказности от периодичности предупредительного ремонта

Уравнение для определения $\alpha_г$ найдем из выражения (3.7) при условии $T_* = 1$ как

$$\alpha_г = x \exp(-2x)(1-\exp(-2x))^{-1}. \quad (3.8)$$

Учитывая, что при $\lambda(u) = 4u(1+2u)^{-1}$ $m = 2$, предельное значение глубины восстановления безотказности найдем из условия $\lambda(\alpha_п) = 1$ как $\alpha_п = 0{,}5$. Зависимость $\alpha_г$ от x, построенная с использованием уравнения (3.8), представлена на рис. 4 (кривая 3).

В случае гамма-распределения при $m = 4$ ($V = 0{,}5$) из выражения (3.4) численным методом получим приближенное решение $\alpha_п \approx 0{,}567$. Из полученных результатов видно, что с ростом параметра формы гамма-распределения, то есть с уменьшением коэффициента вариации, возрастает предельное значение глубины восстановления безотказности при проведении предупредительного ремонта.

Граничные значения глубины восстановления безотказности в случае гамма-распределения при $m = 4$ определены как абсциссы точек пересечения кривых $T_*(x)$, построенных с использованием выражения (3.4), с прямой $T_* = 1$. Зависимость $\alpha_г$ от x представлена на рис. 4 (кривая 2).

Из сравнения кривых 2 и 3, представленных на рис. 4, видно, что с уменьшением коэффициента вариации граничные значения глубины восстановления безотказности увеличиваются. Это означает, что для технических устройств, у которых процессы старения и износа выражены более четко, расширяется диапазон целесообразности проведения предупредительного ремонта.

Выводы

1. Для определения средней интенсивности отказов, связанных с износом и старением, целесообразно использовать предложенные выражения, учитывающие степень восстановления безотказности при проведении предупредительного ремонта технических устройств.

2. Значение средней интенсивности отказов с уменьшением периодичности и количества ремонтов до замены технических устройств снижается, а с уменьшением степени восстановления безотказности возрастает.

3. Варьируя степень восстановления безотказности или периодичность и количество предупредительных ремонтов за срок службы, можно обеспечить практически любое заданное значение средней интенсивности отказов технических устройств.

4. Наработка на отказ технических устройств существенно зависит от глубины восстановления безотказности при проведении их предупредительного ремонта. Существуют граничные значения периодичности и глубины восстановления безотказности, при которых проведение предупредительных ремонтов нецелесообразно, так как наработка на отказ устройств в этих случаях становится ниже, чем при отсутствии такого ремонта.

5. Существуют предельные значения глубины восстановления безотказности, при которых проведение предупредительных ремонтов с любой периодичностью снижает наработку на отказ технических устройств и проведение таких ремонтов нецелесообразно.

6. Полученные результаты показывают, что в условиях эксплуатации за счет изменения периодичности проведения предупредительных ремонтов и глубины восстановления безотказности можно обеспечить требуемое значение наработки на отказ технических устройств.

7. Из результатов исследований следует, что для технических устройств, у которых процессы старения выражены более четко, расширяется диапазон целесообразности проведения предупредительных замен и ремонтов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Володарский В. А. Математические модели оптимизации предупредительных замен и ремонтов технических устройств // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. № 2 (30). С. 170–173.
2. Барлоу Р., Прошан Ф. Статическая теория надежности и испытания на безотказность. М. : Наука, 1984. 328 с.
3. Володарский В. А. Аппроксимация распределения вероятности безотказной работы функцией косинуса // Надежность и контроль качества. 1988. № 8. С. 18–22.

4. Эндрени Дж. Моделирование при расчетах надежности в электроэнергетических системах. М. : Энергоатомиздат, 1983. 435 с.
5. Володарский В. А. Об оптимизации предупредительных замен и ремонтов технических устройств // Надежность и контроль качества. 1989. № 6. С. 21–24.
6. Володарский В. А. Определения показателей надежности электрооборудования при неопределенности исходной информации // Электричество. 1987. № 3. С.49–51.
7. Барлоу Р., Прошан Ф. Математическая теория надежности. М. : Советское радио, 1969. 488 с.

УДК 621.928.93

Аршинский Максим Иннокеньевич,
оператор ОАО «АНХК» (НПЗ), e-mail: arshmax@mail.ru
Асламов Александр Анатольевич,
к. т. н., профессор кафедры машин и аппаратов химических производств Ангарской государственной технической академии (АГТА), e-mail: aslamov@agta.ru,
Кулакова Ирина Михайловна,
к. т. н., доцент кафедры вычислительных машин и комплексов АГТА, e-mail: iyelkina@mail.ru,
Асламова Вера Сергеевна,
д. т. н., профессор каф. «Безопасность жизнедеятельности и экология» Иркутского государственного университета путей сообщения, e-mail: aslamavav@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕЙ СКОРОСТЕЙ И ДАВЛЕНИЙ ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ

M.I. Arshinsky, A.A. Aslamov, I.M. Kulakova, V.S. Aslamova

THE INVESTIGATION OF VELOCITIES AND PRESSURES FIELDS OF SWIRLING FLOW IN RING-SHAPED CHANNEL WITH VARIABLE CROSS-SECTION

Аннотация. *Исследованы поля скоростей и давлений закрученного потока воздуха в прямоточном циклоне с промежуточным отбором, кольцевая сепарационная камера которого имеет переменное сечение, сформированное за счет внутреннего вытеснителя центрального вихря.*

Ключевые слова: *прямоточный циклон, осевой направляющий аппарат, профилированный вытеснитель центрального вихря, квазипотенциальное течение, квазитвёрдое течение, поля скоростей и давлений.*

Abstract. *The velocities and pressures fields of swirling flow in direct-flow cyclone with intermediate dust extraction in the ring-shaped camera with variable cross-section formed by the inner central whirl displacer are investigated in the study.*

Keywords*: direct-flow cyclone, axial guiding device, profiled displacer of the central whirlwind, quasipotential current, quasisolid current, fields of speeds and pressure.*

Введение

Основными источниками антропогенных аэрозольных загрязнений воздуха являются теплоэлектростанции, потребляющие уголь. Сжигание каменного угля, производство цемента и выплавка чугуна дают суммарный выброс пыли в атмосферу, равный 170 млн т в год [1]. Для защиты атмосферы от техногенных выбросов промышленных предприятий широко применяются циклоны.

Для получения более полной информации о работе циклонов в различных условиях необходимо подробное изучение газодинамических процессов, происходящих внутри аппаратов. Многие вопросы можно решить путем экспериментального определения полей скоростей и давлений в закрученных потоках.

С этой целью была разработана лабораторная установка прозрачной модели прямоточного циклона с промежуточным отбором (ПЦПО) диаметром 114 мм (рис.1) [2]. Закручивание потока осуществлялось осевым направляющим аппаратом (ОНА) 3 с бицилиндрическими профилированными лопатками, установленными под углом 30° к радиальной плоскости. Центральное внутреннее тело 7 с максимальным диаметром 85 мм служит вытеснителем центрального вихря. Измерения проводились по общепринятым стандартам [3] по всему сечению ПЦПО с изменением положения зонда 2 относительно внутреннего радиуса (рис. 1). Скорость потока определялась откалиброванной трубкой Пито 1. Для измерений малых перепадов

давлений использовался микроманометр 6 серии ММН-240. Для измерения статического давления использовался зонд 2 диаметром 3 мм и U-образный манометр 5. При определении плотности воздуха его влажность не учитывали, так как допускаемая при этом ошибка не превышает 0,5 % [4].

Исследование проводилось в рамках НИОКР № 0121257743 «Исследование двухфазных закрученных потоков в кольцевом канале переменного сечения» 2012–2014 гг.

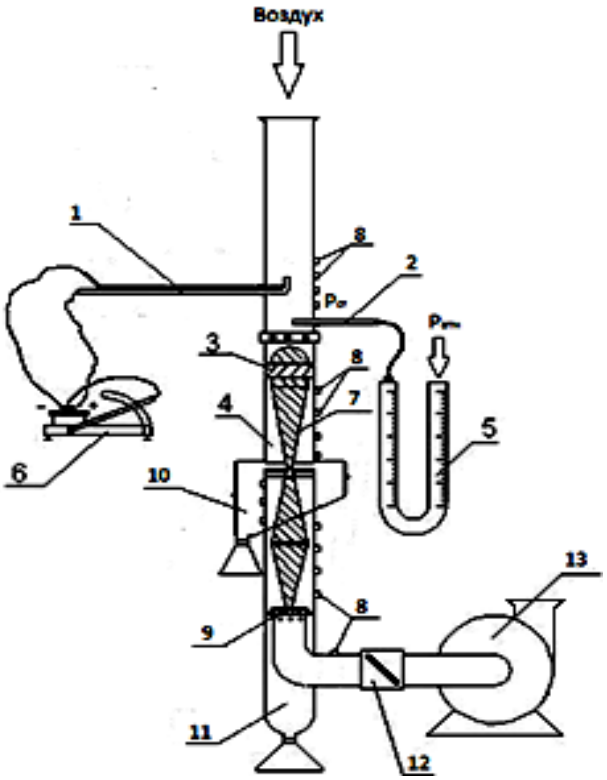


Рис. 1. Схема опытной установки: 1 – трубка Пито, 2 – трубка для измерения статического давления, 3 – ОНА, 4 – ПЦПО, 5 – U-образный манометр, 6 – микроманометр, 7 – вытеснитель центрального вихря, 8 – измерительные отверстия, 9 – раскручивающий лопастной аппарат (РЛА), 10 – бункер промежуточного отбора, 11 – бункер основного отбора, 12 – заслонка, 13 – вентилятор

Результаты исследования

Испытания проводились на чистом воздухе на циклоне двух конфигураций – с коническим вытеснителем (К1) и с профилированным вытеснителем (К2) впервые. На рис. 2 представлено расположение точек замера в ПЦПО конфигурации К1, на рис. 3 – соответствующее поле давлений, а на рис. 4 – поле полных скоростей.

Как видно, поток закрученного воздуха от ОНА до выхлопного патрубка теряет часть своей кинетической энергии в результате резкого снижения давления в центре вихря. Полная скорость на периферии несколько снижается, что очевидно объясняется трением о стенки аппарата, но в зоне ядра вихря она стабильно высокая.

Профили скоростей в пустотелой части циклона имеют экстремум на радиусе 18–24 мм.

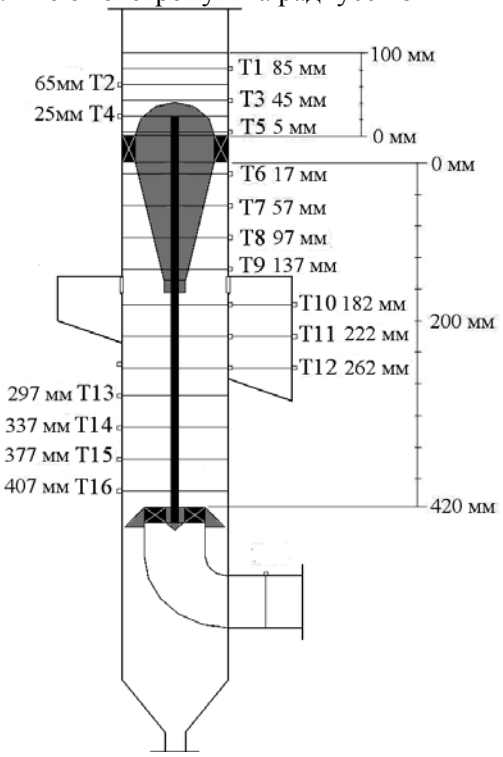


Рис. 2. Расположение точек замера в ПЦПО конфигурации К1

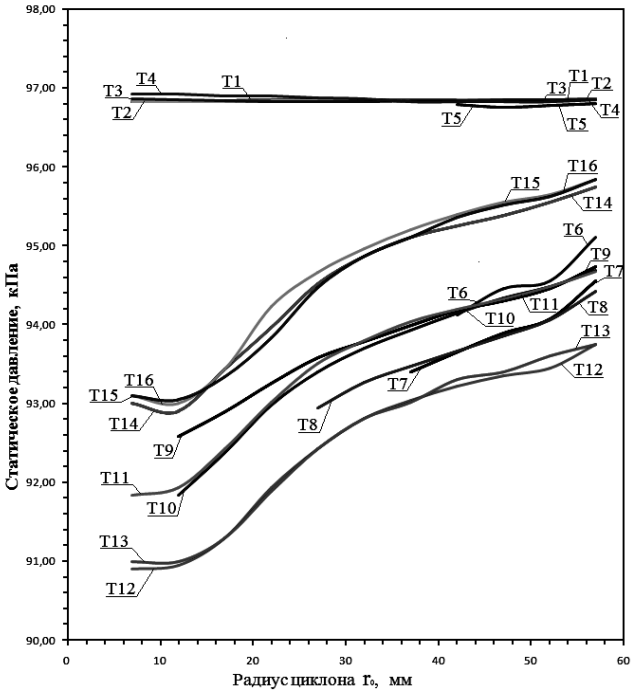


Рис. 3. Поле статического давления в ПЦПО конфигурации К1

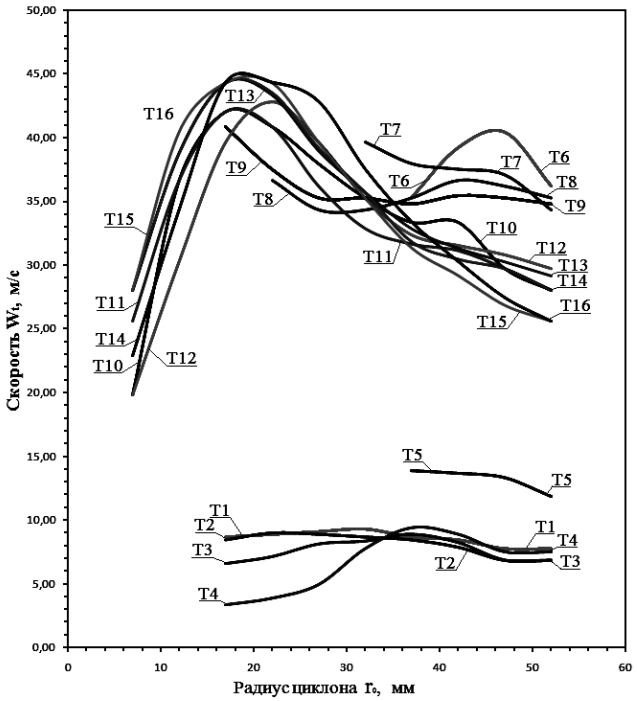


Рис. 4. Поле скоростей в ПЦПО конфигурации К1

С физической точки зрения это явление объясняется переходом вращательной скорости из области периферии – квазипотенциального течения в центральную – квазитвёрдого течения [5].

Для квазипотенциального движения соблюдается соотношение $W_\tau \cdot r^n$ = const, а для квазитвёрдого в пределе $-W_\tau / r^n$ = const. Таким образом, в объёме циклона выделяется некоторая цилиндрическая поверхность радиусом $r_я$, которой соответствует максимальное значение скорости. В центре вихря наблюдаются существенные пульсации давления, что отмечается и другими исследователями [6–7].

На рис. 5 представлено расположение точек замера в ПЦПО конфигурации К2 с профилированным вытеснителем, на рис. 6 – соответствующее поле давлений, а на рис. 7 – поле полных скоростей. Видно, что с присутствием профилированного тела в ПЦПО не происходит резкого изменения статического давления при движении вихря от ОНА к выхлопному патрубку. Профилированное тело служит вытеснителем квазитвёрдого движения, и, как следствие, наблюдается сохранение компоненты тангенциальной скорости.

Конструкция вытеснителя конфигурации К2 предназначена для увеличения эффективности сепарации за счет предотвращения уноса уловленных частиц пыли вследствие уменьшения скорости потока в области промежуточного отбора (ПО) [3]. Уменьшение скорости в зоне ПО приводит к повышению давления и снижению полной скорости и замедлению потока (рис. 7).

В области сужения диффузоров вытеснителя, в районе ПО, наблюдается течение обратного вихря, параллельное движению потока.

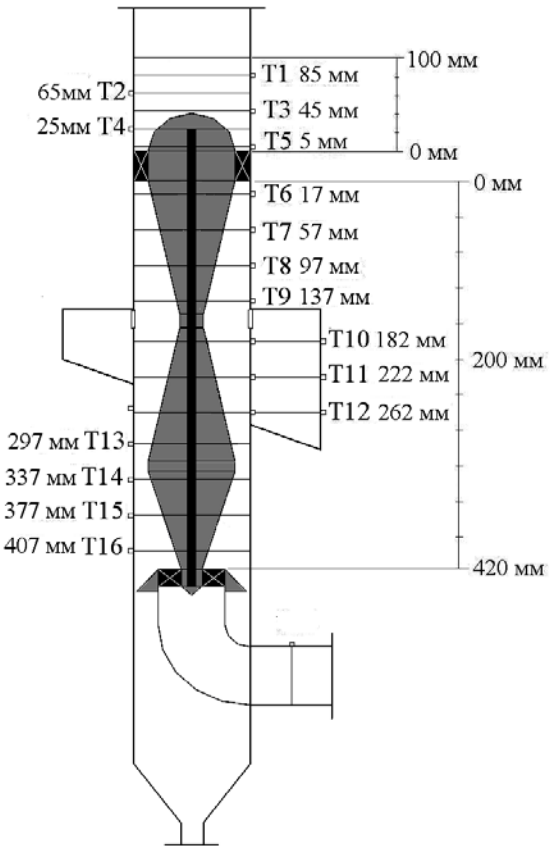


Рис. 5. Расположение точек замера в ПЦПО конфигурации К2

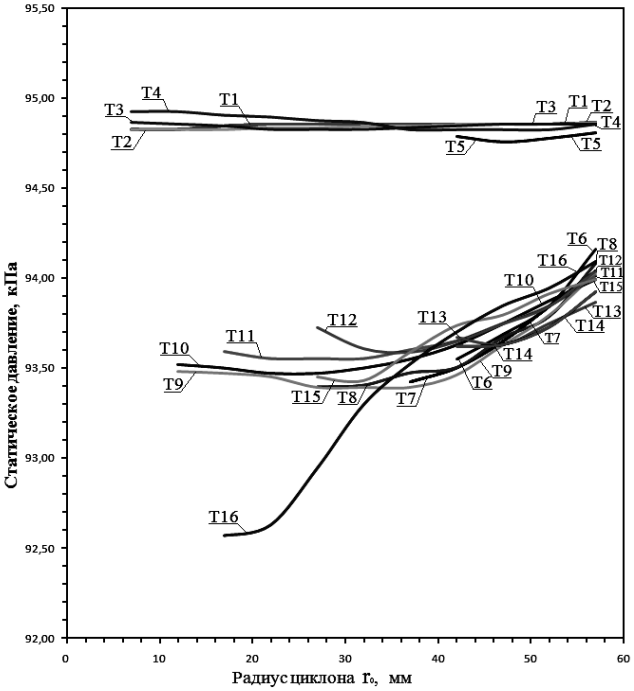


Рис. 6. Поле статического давления в ПЦПО конфигурации К2

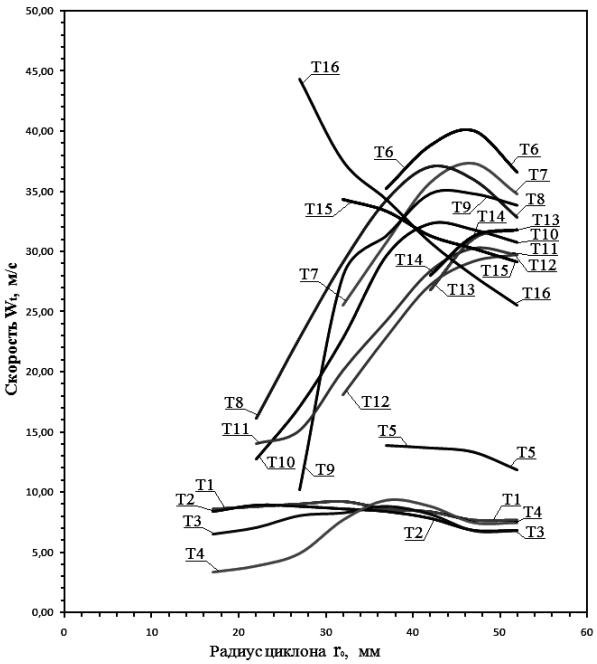


Рис. 7. Поле скоростей для конфигурации К2

Образование обратного вихря наблюдали визуально с помощью шелковой нити, закреплённой на конце спицы диаметром 2 мм (рис. 8).

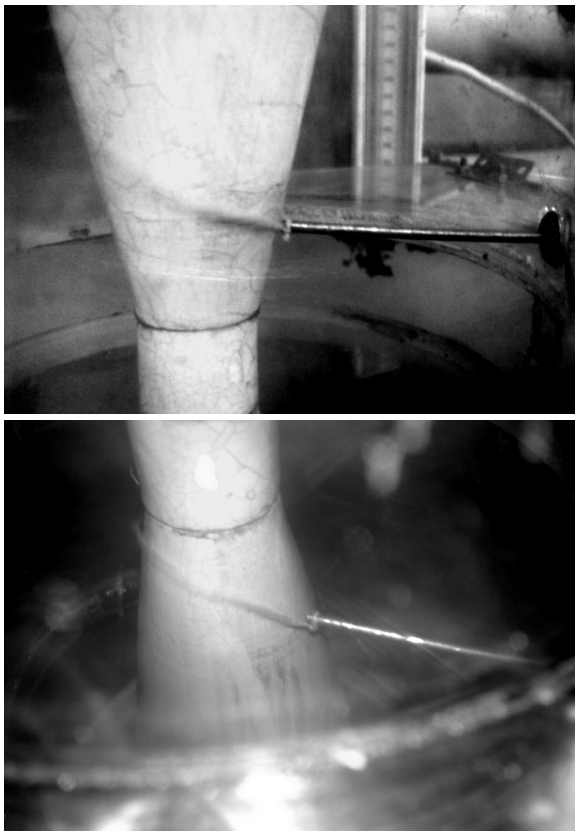


Рис. 8. Движение обратного вихря в области сужения диффузоров

Данное явление предположительно можно объяснить отрывом потока воздуха с поверхности диффузора при высокой скорости вследствие резкого угла его раскрытия.

Выводы

1. Получены поля скоростей и давлений в прямоточном циклоне ПЦПО, визуализировано направление движения закрученного потока, проанализирована аэродинамика движения потока в циклоне с разными конфигурациями вытеснителя.

2. Обнаружен эффект возникновения обратного центрального вихря в ПЦПО с профилированным вытеснителем. Для установления закономерностей необходимы дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Комплексная оценка качества атмосферы промышленных городов Оренбургской области / А.А. Цыцура и др. Оренбург: Изд-во ОГУ, 1999. 168 с.
2. Патент RU 61156 U1, МПК B04C 3/06. Прямоточный циклон / В.С. Асламова, А.А. Асламов, П.К. Ляпустин, Т.Н. Мусева, Н.А. Брагин. ; заявитель и патентообладатель Ангарская гос. техн. академия. Бюл. № 6. 2007.
3. ГОСТ 17.2.4.06-90. Охрана природы. Атмосфера. Методы определения скорости и расхода газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнений. М. : Госкомитет по охране природы СССР, 1990.
4. Асламова В. С. Прямоточные циклоны. Теория, расчет, практика. Ангарск : АГТА, 2008. 233 с.
5. Красовицкий Ю., В. Батищев В. В., Иванова В. Г. Новый подход к проблеме энергосберегающего сухого пылеулавливания при производстве строительных материалов // Строительные материалы. 2004. № 4. С. 2.
6. Алексеенко С. В. Куйбин П. А., Окулов В. Л. Введение в теорию концентрированных вихрей М. Ижевск : Ин-т компьютерных исследований, 2005. 504 с.
7. Алексеенко С. В. Окулов В. Л. Закрученные потоки в технических приложениях : обзор // Теплофизика и аэромеханика. 1996. Т. 3. № 2. С. 101–138.

УДК 504.4054:628.3

Обуздина Марина Владимировна,
к. т. н., ассистент кафедры «Безопасности жизнедеятельности и экологии»
Иркутского государственного университета путей сообщения,
тел.: 8-914-005-005-8, e-mail: angelika86@bk.ru

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ СТОЧНЫХ ВОД В ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫХ УСЛОВИЯХ

M.V. Obuzdina

IMPROVING TECHNOLOGY OF CLEARING OF OILY WASTE WATER IN EXPERIMENTAL-INDUSTRIAL CONDITIONS

Аннотация. *Усовершенствована технология очистки нефтесодержащих сточных вод от нефтепродуктов в опытно-промышленных условиях за счет частичной реконструкции существующей технологической схемы. Фильтр с загрузкой из цеолитов, модифицированных ТЭОС – тетраэтоксисиланом $(C_2H_5O)_4Si$, предлагается установить взамен фильтра с загрузкой из кварцевого песка и фильтра с загрузкой из активированного угля.*

Ключевые слова: *сорбция, органические загрязнители, цеолиты, нефтепродукты, адсорбер.*

Abstract. *Technology of clearing oily waste water in experimental-industrial conditions is improvement by partial reconstruction of the real technological scheme. The filter with the loading of zeolites modified by TEOS – tetraethoxysilane $(C_2H_5O)_4Si$ is installed instead of the filter with loading from quartz sand and the filter with loading from the activated coal.*

Keywords: *sorption, organic pollutants, oil products, zeolits, adsorber.*

Локомотивное депо ст. Иркутск-Сортировочный является подразделением Восточно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО «РЖД». Основными производственными показателями предприятия являются техническое обслуживание тепловозов по циклам ТО-2, ТО-3, а также текущие ремонты электровозов по циклам ТР-1, ТР-2.

Системой промышленной канализации ремонтных цехов ТР-1, ТО-2 преду–смотрен сбор промышленных стоков и отвод на локальные очистные сооружения локомотивного депо.

Локальные очистные сооружения (ЛОС) ТЧ-15 в составе: нефтеловушка, флотаторы, механические фильтры с загрузкой из кварцевого песка, фильтры доочистки с загрузкой из активированного угля – были запущены в эксплуатацию в 1978 г. Проектная мощность очистных сооружений составляет 300 м^3/сут. Фактическая нагрузка на очистные сооружения – 168,2–234 м^3/сут.

Основными загрязнителями сточных вод локомотивного депо являются нефтепродукты (дизельное топливо, мазут Н-20, отработанные моторные масла), железо общее, взвешенные вещества. Концентрация нефтепродуктов в поступающих на очистку стоках колеблется в значительных пределах – от 50 мг/г до 250 мг/л.

Анализ качества сточных вод, поступающих на очистку, и перед сбросом в систему ГК осуществляется аккредитованной дорожной экологической лабораторией химическими и инструментальными методами анализа.

На данном предприятии проектом была принята следующая схема очистки нефтесодержащих сточных вод. Промстоки непрерывно в автоматическом режиме перекачиваются из накопителя в две нефтеловушки объемом 50 м^3 каждая, время отстаивания стоков в которых составляет до 2 часов. Удаление всплывших нефтепродуктов производится 3 раза в неделю. Из нефтеловушек стоки поступают в накопитель очистной станции, откуда насосом равномерно в течение 20 часов перекачиваются на два многокамерных флотатора глубиной 2,0 м производительностью 12,5 м^3/ч каждый. Очистка на каждой флотационной установке осуществляется методом напорной флотации с рециркуляцией 50 % очищенной воды, которая насыщается воздухом через эжектор, установленном на байпасной линии насоса. Растворение воздуха осуществляется в сатураторе объемом 0,6 м^3 при давлении $(3,5–4)\times10^5$ Па.

Расход рециркуляционного потока распределяется следующим образом: 55 % водовоздушной смеси подается на гидроциклон, остальные

45 % распределяются равномерно по двум флотационным камерам. Приведенный к поверхности выделения расход воды во флотаторе составляет: $q_ж = 3,5$ м^3/ч·м^2/ч.

Подача коагулянта (полиоксихлорида алюминия) с дозами 38–45 мг/л производится насосом-дозатором во всасывающий трубопровод центробежного насоса, а подача флокулянта полиакриламида 5 (ПАА-5) с дозами 5 мг/л – насосом-дозатором в гидроциклонный смеситель. Очищенный на флотационной установке сток из лотка самотеком поступает на фильтр с зернистой загрузкой из кварцевого песка для удаления взвешенных веществ и собирается в резервуаре.

Далее осветленная воды насосом перекачивается на напорные фильтры с активированным углем, где осуществляется ее глубокая доочистка от нефтепродуктов. На очистной станции установлены сорбционные фильтры, каждый из которых имеет загрузку из активированного угля марки БАУ высотой 2 м. Общий объем загрузки составляет 9,8 м^3.

Регенерация загрузки производится 2 раза в месяц в два этапа. На первом этапе осуществляется пропаривание фильтрующей загрузки острым паром, на втором этапе – промывка горячей водой. На данные операции требуется объем пара, имеющий общую теплотворную способность 13,2 Гкал.

Очищенная вода после сорбционных фильтров под остаточным напором поступала в количестве 20 м^3/сут. в резервуар охлажденной воды для подпитки оборотной системы водоснабжения, остальные 280 м^3/сут. сбрасывались в городскую канализацию.

Подпиточная вода должна была содержать нефтепродуктов не более 0,2 мг/л, взвешенных веществ – не более 3 мг/л. Вода, сбрасываемая в городскую канализацию, имела ограничения по концентрациям нефтепродуктов согласно требованиям МУП «Водоканал» г. Иркутска – 0,6 мг/л.

При анализе режимов эксплуатации установок, входящих в технологическую схему очистки сточных вод, были выявлены следующие недостатки:

1. Эффект флотационной очистки стоков от нефтепродуктов был недостаточно высоким вследствие низкого газонасыщения (3–4 %) водовоздушной смесью, поступающей в камеры флотатора из гидропневмобака (сатуратора). Увеличение до 5 % относительного объема воздуха, поступающего в эжектор, приводило к срыву нормального режима работы рециркуляционного насоса.

2. Фильтр с загрузкой из кварцевого песка недостаточно эффективно удерживал взвешенные вещества, что приводило к их проскоку в фильтры с активированным углем и снижало их сорбционную емкость.

3. При регенерации сорбционных фильтров имел место вынос активированного угля вместе с отработанным паром и горячей водой (до 0,01–0,012 м^3 с одного фильтра при каждой регенерации). Характеристика степени очистки сточных вод после каждой стадии представлена в табл. 1.

Очищенные потоки сточных вод по существующей схеме направляются в системы городской канализации и частично в оборотную систему для использования воды на технические нужды. Как указывалось выше, основным загрязнителем сточных вод являются нефтепродукты. Приведенные данные табл. 1 свидетельствуют о недостаточной эффективности работы узла доочистки – сорбционных фильтров. Концентрация нефтепродуктов после процессов адсорбции на активированном угле составляет 6,6 мг/л, что значительно превышает нормативный показатель сброса в ГК – 0,6 мг/л.

Таким образом, действующая технологическая схема очистки не позволяет достичь требуемых нормативов качества очищенных вод, что и

Таблица 1

Характеристика степени очистки стоков

Показатели качества вод	Концентрация, мг/л				
	До очистки (исходящие потоки сточных вод)	После нефтеловушки	После флотатора	после фильтра с загрузкой из кварцевого песка	После сорбционных фильтров
ХПК	98	94	85	84	82
ВВ	120	82	68	5	4
pH	8,5–9,0	8,0–8,5	7,0–8,0	7,0–8,0	6,5–8,0
Железо	0,8	0,74	0,59	0,55	0,5
БПК полн.	70	64	59	57	55
Концентрация нефтепродуктов	168–250	90–100	15–57	12–50	6,6

предопределило необходимость реконструкции узла доочистки за счет использования адсорбера с новым типом загрузки.

В качестве новой загрузки нами предложено использовать цеолиты клиноптилолитового типа Холинского месторождения, модифицированные ТЭОС – тетраэтоксисиланом $(C_2H_5O)_4Si$. Цеолиты, модифицированные ТЭОС, обладают хорошей адсорбционной способностью и не уступают активированному углю. Однако модификация цеолита ТЭОС позволяет гидрофобизировать его поверхность, тем самым увеличивая его адсорбционную способность по отношению к нефтепродуктам [1].

На основании проведенных экспериментальных исследований был испытан в опытно-промышленных условиях локомотивного депо трехслойный фильтрующий материал, состоящий из природного цеолита; смеси природного цеолита, термически модифицированного и цеолита, химически модифицированного ТЭОС; а также химически модифицированного ТЭОС цеолита Холинского месторождения при соотношении 9:7,2:83,8 % соответственно. Особенностью такой многослойной загрузки фильтра является развитая поверхность зерен, что обеспечивает процесс регенерации фильтра. Схема фильтра с трехслойной загрузкой представлена на рис. 1.

Первый слой фильтрующего материала 2' по ходу движения сточной воды состоит из природного цеолита с размером частиц 2–3 мм и высотой слоя h = 0,1 м. Второй слой 2" высотой h = 0,08 м – из смеси (при соотношении 1:1) цеолита, термически модифицированного при 350° в течение 2 часов, с размером частиц 3 мм и цеолита, химически модифицированного ТЭОС с размером частиц 1–2 мм. Третий слой 2"' состоит из цеолита, химически модифицированного ТЭОС, с размером частиц 1 мм, высота слоя h = 1,5 м. Общая высота фильтра составляет 1,65 м [2].

Процесс доочистки сточных вод локомотивного депо в предлагаемом фильтре с трехслойной загрузкой из модифицированного цеолита происходит следующим образом: в первом слое из крупных частиц с развитой удельной поверхностью зерен задерживаются наиболее крупные частицы, примеси. При этом общее сопротивление фильтра не увеличивается, так как оно определяется нижними слоями, состоящими из более мелких частиц. Второй, смешанный слой, за счет развитой порозности слоя модифицированного цеолита образует каркасную структуру, в которой размещаются более мелкие частицы третьего слоя. Второй слой предотвращает заиливание зоны раздела между первым и третьими слоями. В третьем слое задерживаются наименьшие частицы, примеси, а также нефтепродукты.

В разработанном фильтрующем материале степень очистки жидкости от примесей определяется третьим слоем и зависит от размера частиц и высоты слоя цеолита, при этом величина загрузки определяет производительность слоя. Первые два слоя предназначены для интенсификации фильтрации жидкостей через слой: удлинения фильтроцикла, увеличения грязеемкости, повышения производительности, т. е. они влияют на экономические показатели работы фильтрующего материала. Общий объем загрузки сорбента со-

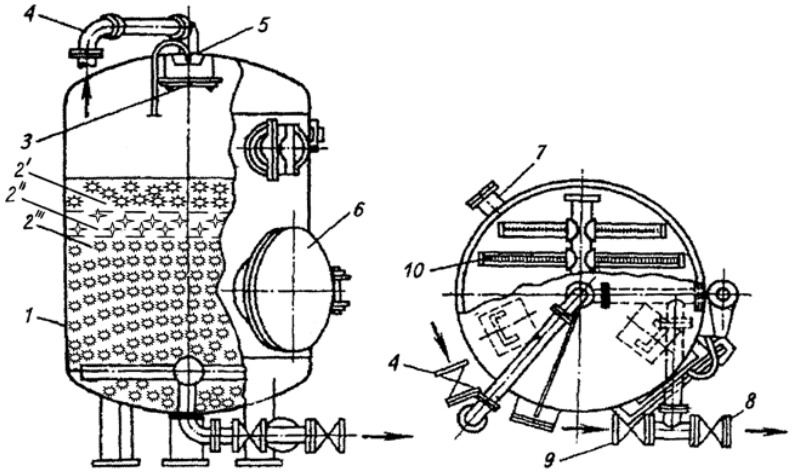


Рис. 1. Схема фильтра с трехслойной загрузкой цеолита: 1 – корпус; 2' – природный цеолит, h= 0,1 м; 2'' – смесь природного цеолита, термически модифицированного при 350°, и цеолита, химически модифицированного ТЭОС h = 0,08 м; 2''' – цеолит, химически модифицированный ТЭОС, h = 1,5 м; 3 – отбойник; 4 – трубопровод подачи очищаемой сточной воды; 5 – труба сброса воздуха; 6 – люк; 7 – трубопровод гидровыгрузки цеолита; 8 – трубопровод отвода очищенной воды; 9 – трубопровод подачи горячей воды; 10 – распределительная система труб

ставляет 520 кг.

Модификация цеолитов кремнеорганическими соединениями позволяет добиться увеличения сорбционной активности цеолитов по отношению к нефтепродуктам.

Для характеристики прочностных свойств фильтрующих материалов были исследованы их физико-технические показатели в сравнении с кварцевым песком. Как указывалось выше, в существующей технологической схеме на стадии доочистки применяется фильтр с загрузкой из кварцевого песка (после стадии фильтрации).

Данные табл. 2 свидетельствуют о том, что клиноптилолит (цеолит) Холинского месторождения обладает низкими показателями измельчаемости, высокими прочностными характеристиками и высокой пористостью, что имеет важное значение при использовании его в качестве фильтрующей загрузки.

Кроме того, перед проведением испытаний фильтрующей многослойной загрузки и в соответствии с требованиями по подготовке фильтрующих материалов [3, 4] проведено определение крупности и однородности фильтрующих материалов ситовым анализом на ряде калиброванных сит (установление гранулометрического состава фильтрующей загрузки).

Регенерацию фильтрующих слоев осуществляли двукратной промывкой горячей водой в течение 30 минут с последующей обработкой острым паром в пропарочной станции, имеющейся на предприятии. Фильтрующий материал расположен на поддерживающих сетках, которые (по принципу кассет) могут свободно выниматься из корпуса фильтра для целей регенерации. После температурной обработки цеолиты приобретают рыхлую структуру и полностью восстанавливают свои сорбционные свойства. Регенерацию загрузки предлагается проводить 1 раз в 10 дней, замену фильтрующей загрузки – 1 раз в 2 месяца, что требует годового расхода используемых цеолитов 3120 кг.

Таким образом, проведенные исследования показали, что природные и модифицированные термически (при температуре 350 °С) и химически ТЭОС $(C_2H_5O)_4Si$) клиноптилолиты Холинского месторождения Восточного Забайкалья могут быть использованы в качестве фильтрующего материала для глубокой очистки нефтесодержащих сточных вод предприятий железнодорожного транспорта.

Испытанная в опытно-промышленных условиях фильтрующая загрузка в системе доочистки промышленных сточных вод от нефтепродуктов показала высокую эффективность, что, соответственно, позволит получать на выходе очищенные потоки сточных вод, соответствующих по качеству требованиям, предъявляемым к сбросу в системы городской канализации, а также требованиям к качеству оборотной воды.

На основании всего выше изложенного нами предлагается частичная реконструкция существующей технологической схемы, которая с конструктивной точки зрения представляется наиболее целесообразной. Предлагаемый фильтр необходимо установить после стадии флотации взамен существующих: фильтра с загрузкой из кварцевого песка, фильтра с загрузкой из активированного угля (рис. 2).

Такое решение позволит интенсифицировать процесс очистки сточных вод от высоких содержаний нефтепродуктов и взвешенных веществ и получить необходимую степень очистки сточных вод, что, в конечном итоге, полностью исключит платежи предприятия за превышение установленных лимитов на сброс сточных вод и значительно улучшит показатели природоохранной деятельности локомотивного депо.

Следует особо отметить, что технологический процесс обезвреживания нефтесодержащих сточных вод является очень сложным и кроме рассмотрения задач оптимизации очистки загрязненных потоков требует рассмотрения технологических приемов, направленных на обезвреживание всех образующихся побочных продуктов и отходов.

Таблица 2

Физико-технические показатели фильтрующих материалов

Материал	Измельчаемость, %	Истираемость, %	Суммарный износ, %	Пористость, %	
				max	min
Кварцевый песок	2,3…2,6	0,2	3,6	44,0	38
Цеолит	0,5…1,8	0,8…5,3	3,9…7,1	62,0	50

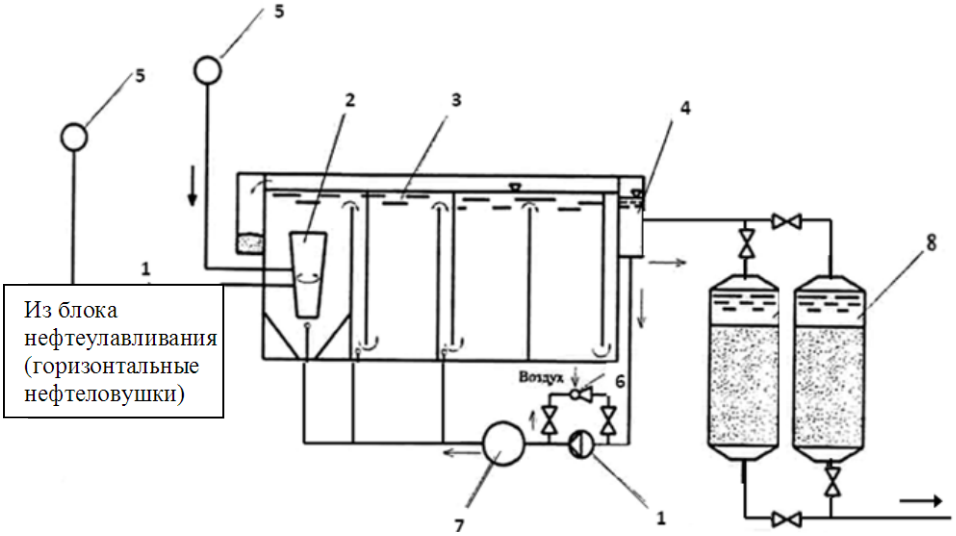


Рис. 2. Предлагаемая схема очистки производственных сточных вод локомотивного депо ТЧ-15 ст. Иркутск-Сортировочный: 1 – подающий насос; 2 – гидроциклонный смеситель; 3 – флотатор; 4 – водоприемный лоток; 5 – насосы-дозаторы коагулянта и флокулянта; 6 – эжектор; 7 – сатуратор; 8 – фильтр с трехслойной загрузкой цеолита

Таблица 3

Растворимость различных нефтепродуктов в воде

Вещество	Растворимость, мг/л
Нефть	10–15
Дизельное топливо	8–22
Керосин	2–5
Бензин	9–505
Мазут	0,01–2,00
Пентан	38,5
Бензол	1780,0
Толуол	515,0

При определении состава сточных вод учитывался тот факт, что концентрация растворенных нефтепродуктов в воде определяется химическим составом и структурой молекул загрязнения. В табл. 3 представлена растворимость различных нефтепродуктов в воде.

В целях получения достоверной информации о составе жидких нефтесодержащих отходов, получаемых в процессах очистки сточных вод, нами был проведен комплекс аналитических исследований на базе Института химии им. Фаворского СО РАН. В табл. 4 представлены физико-химические свойства композиционных смесей выборочных локомотивных депо ВСЖД [5].

По завершении процесса доочистки и стадий регенерации холостой (отмытый) адсорбент – цеолит может быть утилизирован в технологиях производства дорожных покрытий с учетом специфических свойств реагентов-модификаторов или в качестве добавки в битумные теплоизоляционные массы.

Все образующиеся жидкие нефтесодержащие отходы направляются на установку сжигания «Форсаж». Эти установки закуплены многими предприятиями ВСЖД и в настоящее время показывают достаточно высокую эффективность работы.

Используемые в установке простые конструктивные решения позволяют достичь высокой температуры горения (около 1000 °С) в камере дожигания, которая обеспечивается интенсивной подачей топлива через форсунку в камеру сгорания, в результате чего сводится к минимуму содержание загрязняющих веществ в отходящих из установки газах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Обуздина М. В. Цеолиты как сорбционный материал для очистки сточных вод от нефтепродуктов // Современность в творчестве вузовской молодежи. Актуальные вопросы права и безопасности на современном этапе : материалы науч.-практ. конф. молодых ученых / Вост.-Сиб. ин-т МВД РФ. Иркутск, 2010. Вып. 12. С. 240–243.

2. buzdina M., Rush E. Methods of intensification of purification processes of oil- containing wastewater of railway transport enterprises // Problems and Prospects of Survey, Design, Construction and Exploiting of Northeast Asia Transport Systems: students and post-graduate students' works presented : the Third International Scientific-Applied Conference, Irkutsk, May 30, 2011 / Irkutsk State Transport University (IrGUPS). Irkutsk : IrGUPS, 2011.
3. Аюкаев Р. И. Интенсификация методов водоочистных фильтров и совершенствование методов их расчета. Петрозаводск : ПГУ, 1985. 182 с.
4. Николадзе Г. И., Сомов М. А. Водоснабжение. М. : Стройиздат. 1995. 688 с.
5. Дытнерский Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии : учеб. для вузов : в 2 кн. 2-е изд. М. : Химия, 1995. Кн. 2. : Массообменные процессы и аппараты. 368 с.: ил.

Таблица 4

Физико-химические свойства сточных вод выборочных локомотивных депо

Показатель	Выборочные типовые предприятия			Показатель	Выборочные типовые предприятия		
	ТЧ-9	ТЧ-15	ТЧ-31		ТЧ-9	ТЧ-15	ТЧ-31
Плотность смеси, кг/м^3, при температуре:				Вязкость кинематическая, сСт, при °С:			
20 °С	928	934	937	20 °С	736	730	741
60 °С	917	920	927	40 °С	245	232	279
80 °С	898	905	909	60 °С	78	74	80
Фракционный состав по Богданову, С° н. к.				80 °С	56	52	57
5 %	266	305	309	100 °С	17	17	20
10 %	300	336	342	Групповой состав, % масс, углеводороды:			
20 %	331	380	387	парафино-нафтеновые	23,1	27,5	25,3
30 %	374	411	417	ароматические	60,1	58,1	59,2
Содержание воды, % масс.	12,5	13,8	13,2	смолы суммарные	15,4	13,2	14,3
Механических примесей, %, при температуре:				содержание: серы, %	0,6	0,7	1,0
20 °С	2,7	3,0	3,3	водорастворимых кислот и щелочей	отсут	отсут	отсут
60 °С	2,4	2,7	2,9	зольность, % масс.	0,3	0,2	0,4
80 °С	2,2	2,3	2,5	температура, °С:			
Фракционный состав механических примесей, %:				температура застывания	–12	–10	–11
свыше 500мкм	61,7	59,5	57,4	температура вспышки	180	175	195
от 50 до 500 мкм	38,0	40,0	42,0	теплота сгорания в пересчете на сухое топливо, ккал/кг	8580	8410	8470
менее 50 мкм	0,3	0,5	0,6				

УДК 661.183 + 662.929.7 + 678.684

Рединова Александра Владимировна,
аспирант кафедры «Химия» Иркутского государственного университета путей сообщения,
e-mail: chem2007@mail.ru
Грабельных Валентина Александровна,
к. х. н., научный сотрудник Иркутского института химии им. А.Е. Фаворского
e-mail: venk@irioch.irk.ru
Леванова Екатерина Петровна,
к. х. н., старший научный сотрудник Иркутского института химии им. А.Е. Фаворского
e-mail: venk@irioch.irk.ru
Гозбенко Валерий Ерофеевич,
д. т. н., профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения
тел. (395-2) 638-357, e-mail: vgozbenko@yandex.ru

НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ИОНОВ РТУТИ (II) ИЗ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ

A.V. Redinova, V.A. Grabelnyh, E.P. Levanova, V.E. Gozbenko

NEW EXTRACTION OF MERCURY (II) IONS FROM WATER SOLUTIONS

Аннотация. *Предлагается новая технология извлечения соединений ртути из водных растворов, основанная на использовании принципиально нового типа адсорбента. Адсорбент получен путем поликонденсации полисульфида натрия с 1,4-дихлорбутином-2. Проведение поликонденсации с участием частиц нефтекокса обеспечивает получение твердых гранул. Приводятся данные по статической емкости сорбента, определена теплота сорбции и исследована кинетика процесса. Полученные данные позволяют предложить принципиальную технологическую схему очистки сточных вод от соединений ртути с использованием нового сорбента.*

Ключевые слова: *адсорбция, серосодержащие сорбенты, ртуть (II), очистка сточных вод.*

Abstract. *New extraction technology of mercury compounds from water solutions is proposed. The technology is based on using of radically new type of adsorbent. The adsorbent was obtained by polycondensation of natrium polysulfide with 1,4-dichlorbutin-2. The performance of the polycondensation with involving of petrolic coke particles provides the production of solid granular adsorbent. The data on adsorption capacity of the adsorbent are presented. The heats of adsorption were defined, and the adsorption kinetics were investigated. The results permit to presume the principal technological scheme of waste waters cleaning of mercury compounds by using the new sorbent.*

Keywords: *adsorption, sulphurcontaining sorbents, mercury (II), waste water cleaning.*

Ртуть среди металлов-токсикантов занимает особое место. С одной стороны, этот элемент является наиболее токсичным среди тяжелых металлов [1], с другой стороны, сфера применения ртути и ее соединений, несмотря на снижение использования ртути в хлорной промышленности, непрерывно расширяется [2]. Кроме того, для соединений ртути ярко выражена способность участвовать в процессах вторичного долгосрочного загрязнения водных объектов [3]. По этим причинам сточные воды, содержащие ртуть и ее соединения, должны подвергаться тщательной очистке. Хорошо известно [4], что наиболее эффективными методами глубокой очистки сточных вод являются сорбционные методы. В настоящее время для очистки сточных вод от ртути разработано большое число сорбентов [5], которые различаются по сорбционной емкости, стоимости, технологии применения и другим характеристикам. Перспективными технологиями извлечения соединений ртути из водных растворов являются технологии, основанные на использовании полимерных синтетических сорбентов. Высокая сорбционная емкость по отношению к ртути отмечена у сополимеров 5-винилтетразола с дивинилсульфидом [6]. Однако высокая стоимость исходных мономеров позволяет использовать такого типа сорбенты только для аналитических целей. Более дешевые полимерные серосодержащие сорбенты были получены путем поликонденсации полисульфида натрия (Na_2S_n) с хлорорганическими отходами производства эпихлоргидрина на поверхности микрочастиц нефтяного кокса [7]. Сорбенты данного типа имеют достаточно высокую активность по отношению к ионам ртути (154 мг/г). Развивая эти исследования, мы разработали более эффективный сорбент, позволяющий извлекать ионы ртути с эффективностью более 400 мг ртути на 1 г сорбента.

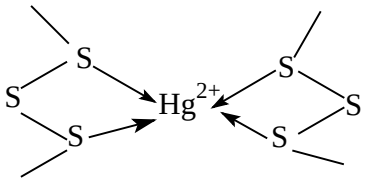
Предлагаемая новая технология извлечения

ртути из водных растворов основана на применении нового типа сорбентов – серосодержащих полимеров, в состав которых помимо полисульфидных цепочек входят фрагменты, содержащие тройную связь C≡C. Новый тип сорбентов получают путем поликонденсации полисульфида натрия на поверхности частиц нефтекокса с 1,4-дихлорбутином-2 ($ClCH_2C{\equiv}CCH_2Cl$). В ходе поликонденсации поверхность частиц нефтекокса покрывается слоем серосодержащего полимера. В состав молекул полимера входят полисульфидные фрагменты $–S_n–$ (n = 2–3) и тройные связи (–C≡C–).

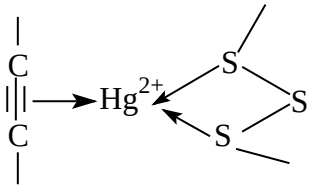
Сорбционная активность полученных сорбентов была оценена по поглощению ионов ртути (II) из водных растворов хлорида или нитрата ртути. Эффективность сорбции определяли по остаточной концентрации ионов Hg^{2+} в растворе. Концентрацию определяли фотокалориметрически [8] с использованием микрокалориметра МКМФ-02.

Было отмечено, что сорбция ртути получаемыми сорбентами является высокоэкзотермичным процессом, и с использованием метода калориметрии [9] была определена теплота сорбции. В табл. 1 приведены полученные значения теплоты сорбции для различных используемых сорбентов.

Высокие значения теплоты сорбции (табл. 1) указывают на образование прочных химических связей ионов ртути с сорбентом. При использовании сорбента, полученного в работе [7] с использованием хлорорганических отходов производства эпихлоргидрина, осуществляется наиболее прочная координация ионов ртути на поверхности сорбента. Для подобной координации была предложена комплексная структура I, в которой ион ртути связан с четырьмя атомами серы полимерного сорбента [7]:



При использовании сорбента, полученного на основе 1,4-дихлорбутина-2, в координации с ионом ртути участвуют не только атомы серы, но и фрагменты полимерной цепи, содержащие тройную –C≡C– связь, с образованием комплекса со структурой II:



Комплексы ацетиленовых соединений с ионами ртути хорошо известны и применяются в качестве катализаторов в химической промышленности [10]. Подтверждение участия тройной связи в координации с ионами ртути было получено с использованием данных ИК-спектроскопии, полученных по методу нарушенного полного внутреннего отражения [11] (прибор Varian 3100 FTIR). Для образцов сорбента до адсорбции была зафиксирована слабая полоса в области 2084–2087 $см^{-1}$, которая отвечает валентным колебаниям C≡C и которая полностью исчезает у образцов сорбента, насыщенных ртутью.

Нефтекокс, который обладает адсорбционными свойствами за счет кислородсодержащих функциональных групп на его поверхности [12], дает менее прочное связывание ионов ртути (Q_a = 211 кДж/моль) (табл. 1).

Таким образом, адсорбция ионов ртути на полученном сорбенте осуществляется по комплексно-координационному механизму. Для осуществления координации ионов ртути необходимо благоприятное геометрическое соответствие атомов серы и тройной связи, которое наблюдается не на всех участках поверхности сорбента. В начальные моменты контакта раствора соли ртути с сорбентом происходит достаточно быстрая сорбция как на центрах, которые отвечают образованию устойчивого комплекса (на этих центрах адсорбция практически необратима), так и на центрах, где наблюдается более слабая, обратимая сорбция. Скорость процесса в этом случае определяется скоростью диффузии ионов ртути к поверхности. При увеличении времени контакта раствора с сорбентом на энергетически невыгодных центрах сорбции устанавливается равновесие за счет частичной десорбции и далее сорбция протекает в порах сорбента на энергетически выгодных центрах. Изложенные кинетические закономерности сорбции отражаются на кинетических кривых (рис. 1), показывающих зависимость степени извлечения ионов ртути из растворов различной начальной концентрации. Степень извлечения (E)

Таблица 1

Теплота сорбции (Q_a) ионов Hg(II)

Используемый сорбент	Q_a, кДж/моль
Сорбент, полученный с использованием отходов производства эпихлоргидрина [7]	396
Сорбент, полученный с использованием 1,4-дихлорбутина-2	316
Нефтяной кокс	211

рассчитывали по снижению концентрации раствора: $E = \frac{(C_0 - C_к)}{C_0} \cdot 100\%$.

При повышении температуры процесса до 40 ºС характер кинетических кривых изменяется (рис. 2). Кривая приобретает классический вид [13] и не содержит точек экстремума.

Такой ход кинетической кривой объясняется тем, что при температуре 40 ºС для экзотермического обратимого процесса наблюдается увеличение скорости десорбции с малоактивных центров поверхности сорбента, так и внутри мезопор.

Наличие экстремума на кинетической кривой сохраняется и при низкой начальной концентрации ртути в растворе (рис. 3). Однако в этом случае при определенном времени контакта раствора с сорбентом может быть достигнута максимальная степень извлечения ртути – показатель, который является важнейшим при очистке сточных вод.

Сопоставление рис. 1 и 3 показывает, что при начальной концентрации ионов ртути в растворе ($C_0 \geq 0{,}5$ мг/мл) высокая степень извлечения ртути не достигается, а при низких концентрациях можно достигнуть практически полного извлечения токсичных ионов из раствора.

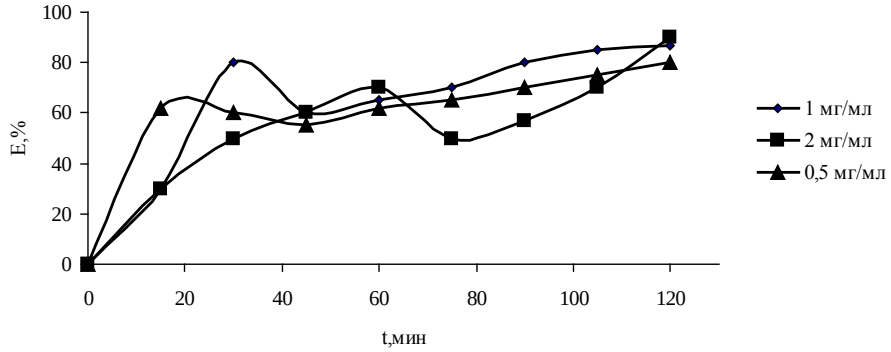


Рис. 1. Кинетические зависимости извлечения ионов ртути из раствора для разной начальной концентрации при температуре 20 ºС

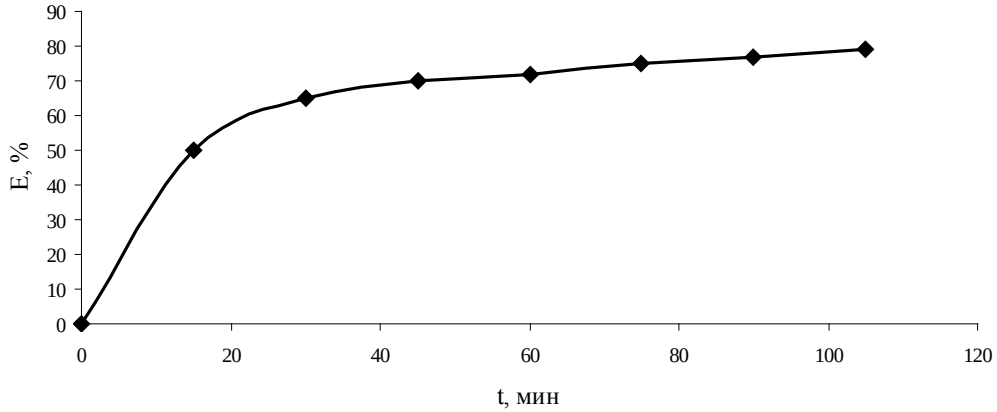


Рис. 2. Кинетическая кривая, полученная при температуре 40 ºС (C_0 = 2 мг/мл)

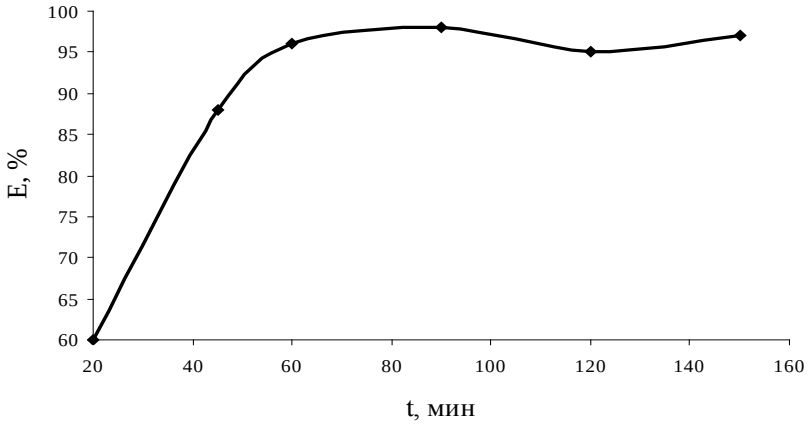


Рис. 3. Кинетическая кривая сорбции ионов ртути при C_0 = 0,05 мг/мл (20 ºС)

С учетом этих данных технологию очистки сточных вод с концентрацией, превышающей 0,5 г/л, от ртути целесообразно сорбцию проводить в две стадии. На первой стадии извлекается основное количество ртути с практически полным насыщением сорбента. На второй стадии в динамическом режиме осуществляется доочистка раствора. Принципиальная схема технологии очистки сточных вод от ртути с использованием сорбента, полученного на основе полисульфида натрия и 1,4-дихлорбутина-2, представлена на рис. 4.

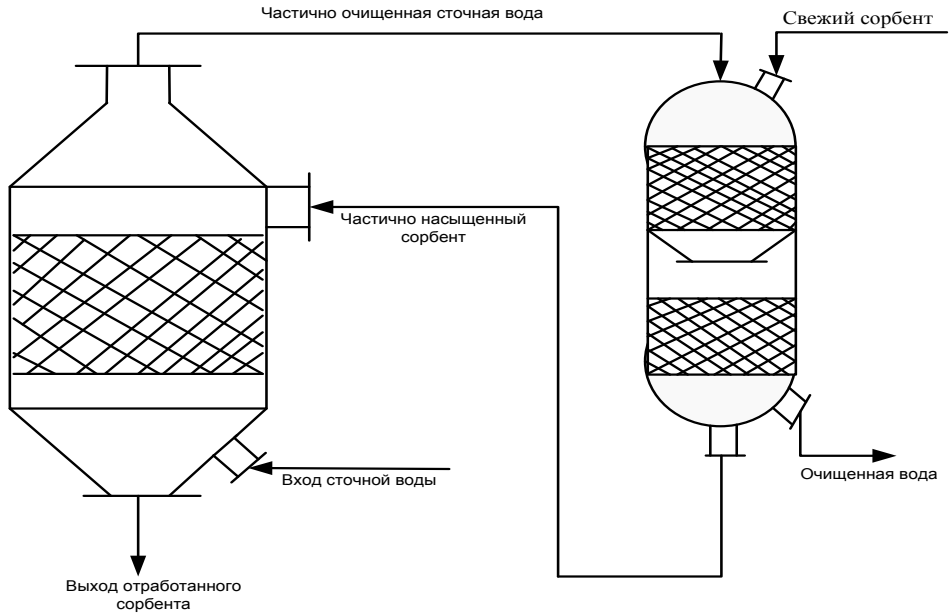


Рис. 4. Принципиальная технологическая схема очистки сточных вод от ртути

Таким образом, предложена новая технология очистки сточных вод от ионов ртути, основанная на использовании серосодержащего полимерного сорбента. Исследование закономерностей сорбции позволяет предложить схему, включающую два адсорбера. Один из них работает в режиме смешения с использованием псевдоожиженного слоя сорбента, другой – в динамическом режиме.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тарасов А. В., Смирнова Т. В. Основы токсикологии. М. : Маршрут, 2006. 160 с.
2. Янин Е. П. Ртуть в окружающей среде промышленного города. М. : Изд-во ИМГРЭ, 1992. 170 с.
3. Руш Е. А., Давыденко А. Ю. Комплексная геоэкологическая оценка воздействия импактного источника ртутного загрязнения на объекты окружающей среды. Иркутск : Из-во ИрГТУ, 2004. 111 с.
4. Родионов А. И., Клушин В. Н., Торочешников Н. С. Техника защиты окружающей среды. М. : Химия, 1989. 512 с.
5. Чичура Т. М. Выбор сорбента для ртутьсодержащих стоков // Изв. Тульского ГУ. Сер. «Экология и безопасность жизнедеятельности». 2006. Вып. 8. С. 239
6. Круглова В. А., Шаулина Л. П., Кижняев В. Н., Анненков В. В. Сорбционное извлечение ртути из растворов со(полимерами) винилтетразолов // Журнал прикладной химии. 2011. Т. 84. Вып. 3. С. 506.
7. Новый тип сорбентов на основе полисульфида натрия из отходов производства эпихлоргидрина для извлечения соединений тяжелых металлов / Грабельных В. А. и др. // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. Т. 20. №2. С. 199.
8. Гладышев В. П., Левицкая С. А., Филиппова Л. М. Аналитическая химия ртути. М. : Наука, 1974. 228 с.
9. Касепов Б. К., Алдабергенов М. К. Методы прикладной термодинамики в химии и металлургии. Караганда : Наука, 2008. 332 с.
10. Химия ацетиленовых соединений / под. ред. Г. Г. Вийе. М. : Химия, 1973. 416 с.
11. Смит А. Прикладная ИК-спектроскопия. М. : Мир 1982. 328 с.
12. Сюняев З. И. Нефтяной углерод. М. : Химия. 1979. 340 с.
13. Шумяцкий Ю. И. Промышленные адсорбционные процессы. М. : КолосС, 2009. 183 с.

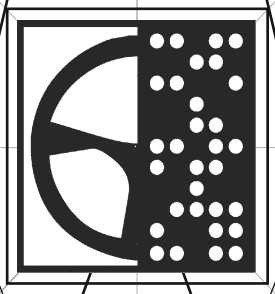
Министерство образования и науки Российской Федерации
Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта

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

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование



Раздел 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 536.24:519.632

Нечаев Валерий Владимирович,
к. т. н, доцент кафедры «Энергообеспечение и теплотехника»,
Иркутская государственная сельскохозяйственная академия,
e-mail: valery.nechaev@yandex.ru
Тупицын Алексей Альбертович,
д. х. н, доцент кафедры «Прикладная механика»,
Иркутский государственный университет путей сообщения,
e-mail: altfr@mail.ru

МОДЕРНИЗАЦИЯ МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ДЛЯ УЧЕТА ВОЗДЕЙСТВИЯ КРИВИЗНЫ ПОВЕРХНОСТИ И СЖИМАЕМОСТИ СРЕДЫ ПРИ ТЕЧЕНИИ ГАЗА В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

V.V. Nechaev, A.A. Tupitsyn

MODERNIZATION OF TURBULENCE MODEL FOR ACCOUNTTING THE SURFACE CURVATURE AFFECTING AND MEDIUM COMPRESSIBILITY AT GAS FLOW IN THE BOUNDARY LAYER

Аннотация. *Представлена постановка задачи исследования течения и теплообмена при турбулентном движении газа на криволинейной поверхности. Приводятся аналитические выражения для числа Ричардсона и константы Монина – Обухова, полученные с учетом сжимаемости и неизотермичности среды.*

Ключевые слова: *теплопередача, теплообмен, численное моделирование.*

Abstract. *The statement of flow and heat exchange research problem at a gas flow on a curvilinear surface is presented. Analytical forms for Richardson's number and the Monin – Obuhov constant, obtained by taking into account compressibility and nonisothermality of medium, are presented.*

Keywords: *heat transfer, heat exchange, numerical simulation.*

Введение

Большой класс современных технических и энергетических установок проектируется на основе расчета турбулентного пограничного слоя. При численном моделировании возникает проблема описания процесса переноса тепла и импульса в турбулентном пограничном слое на поверхности с переменной кривизной. Эти процессы необходимо учитывать при проектировании лопаток компрессоров и газовых турбин. Течение в турбомашинах характеризуется рядом осложняющих факторов: ускоряющимся характером распределения скорости около передней критической точки и замедляющимся вблизи задней кромки; наличием в пограничном слое области отрыва потока от стенки лопатки; неизотермичностью и сжимаемостью среды; высоким уровнем турбулентности набегающего потока. Решение задачи о теплообмене в таких условиях требует предварительного анализа и алгоритмизации [1, 2].

Для описания сжимаемого пограничного слоя газа на криволинейной поверхности необходимо воспользоваться дифференциальными уравнениями второго приближения, в которые включен радиус кривизны поверхности в явном виде.

Основные уравнения

Основные уравнения сжимаемого пограничного слоя, описывающие турбулентное движение сверхзвукового потока на криволинейной поверхности, имеют вид:

– уравнение движения (проекция на ось x):

$$\rho\left(\frac{u}{1+\kappa y}\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{uv}{R_w+y}\right)+$$

$$\frac{1}{1+\kappa y}\frac{\partial p}{\partial x}=\frac{1}{(1+\kappa y)^2}\frac{\partial}{\partial y}\times \qquad (1)$$

$$\times\left[\mu_{эфф}(1+\kappa y)^3\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{u}{1+\kappa y}\right)\right];$$

– уравнение движения (проекция на ось y):

$$\frac{u^2}{R_w(1+\kappa y)}=\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial p}{\partial y}\right); \qquad (2)$$

– уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u)+\frac{\partial}{\partial y}\left[\rho v(1+\kappa y)\right]=0; \qquad (3)$$

– уравнение энергии:

$$\rho\left(\frac{u}{1+y/R_w}\frac{\partial h}{\partial x}+v\frac{\partial h}{\partial y}\right)-\left(\frac{u}{1+y/R_w}\frac{\partial p}{\partial x}+v\frac{\partial p}{\partial y}\right)=$$

$$=\frac{u}{1+y/R_w}\frac{\partial}{\partial y}\left[\left(1+\frac{y}{R_w}\right)\lambda_{эфф}\frac{\partial T}{\partial y}+\mu_{эфф}\frac{\partial T}{\partial y}\right]+ \quad (4)$$

$$+\mu_{эфф}\left(\frac{\partial u}{\partial y}-\frac{u}{R_w+y}\right),$$

где $\mu_{эфф}=\frac{\mu}{\mathrm{Pr}}+\frac{\mu_t}{\mathrm{Pr}_t}$, $\lambda_{эфф}=\lambda+\lambda_t$, $\kappa=\frac{1}{R_w}$, $h=C_p\cdot T$ – удельная энтальпия, μ – коэффициент динамической вязкости, μ_t – турбулентный аналог коэффициента динамической вязкости, λ – коэффициент теплопроводности, λ_t – турбулентный аналог коэффициента теплопроводности, Pr и Pr_t – число Прандтля и его турбулентный аналог, R_w – радиус кривизны поверхности, u – продольная составляющая вектора средней скорости, v – поперечная составляющая вектора средней скорости, ρ – плотность; x, y, z – прямоугольные координаты [2].

Для замыкания системы уравнений сжимаемого пограничного слоя на криволинейной поверхности может быть использована алгебраическая модель турбулентной вязкости Себеси – Смита [3], основанная на пути смешения Прандтля. Достоинством этой модели является простота, надежность и возможность получать расчетные результаты с хорошей точностью.

В соответствии с подходом Себеси и Смита турбулентный пограничный слой считается состоящим из внутренней и внешней областей, коэффициенты турбулентной вязкости в которых описываются разными соотношениями. Эти соотношения являются эмпирическими и получены на основании экспериментальных данных:

$$\nu_t=l^2\left|\frac{\partial u}{\partial y}\right|\gamma\gamma_R+2lu_e\mathrm{Tu}_e\left(y/\delta\right), \quad (5)$$

где ν_t – турбулентный аналог кинематической вязкости; δ – толщина гидродинамического пограничного слоя.

Входящая в формулу (5) длина пути смешения l выражается соотношением

$$l=\kappa y\left[1-\exp\left(-\frac{y}{A}\right)\right], \quad (6)$$

где κ – постоянная Кармана, κ = 0,4; A – постоянная длина демпфирования, которая определяется следующим образом:

$$A=26\frac{\nu}{N\cdot u_\tau}\left(\frac{\rho}{\rho_w}\right)^{\frac{1}{2}};$$

$$N=\left[1-11{,}8\left(\frac{\mu_w}{\mu_e}\right)\left(\frac{\rho_e}{\rho_w}\right)^2 p^+\right]^{\frac{1}{2}}; \quad (7)$$

$$p^+=\frac{\nu\cdot u_e}{u_\tau^3}\frac{du_e}{dx};\qquad u_\tau=\left(\frac{\tau_w}{\rho_w}\right)^{\frac{1}{2}},$$

где τ_w – напряжения трения на твердой поверхности обтекаемого тела; u_τ – проекция вектора скорости потока газа на поверхность обтекаемого тела; ν – кинематическая вязкость; индексы «*e*» и «*w*» обозначают параметры на внешней границе пограничного слоя и на стенке.

Особенностью выражений (7) является то, что в них вводятся значения плотностей ρ_w, ρ_e и динамической вязкости μ_w, μ_e на стенке и внешней границе пограничного слоя, что позволяет использовать данную модель для расчета потоков газа.

Входящий в формулу (5) коэффициент перемежаемости γ необходим для описания характеристик пограничного слоя в области перехода от ламинарного режима течения к турбулентному. Он определяется соотношением

$$\gamma=1-\exp\left[-G\left(x-x_t\right)\int_{x_t}^{x}\frac{dx}{u_e}\right]; \quad (8)$$

$$G=8{,}35\cdot10^{-4}\left(\frac{u_e^3}{\nu^2}\right)\mathrm{Re}_x^{-1{,}34}. \quad (9)$$

Во внешней части пограничного слоя коэффициент турбулентной вязкости рассчитывается по формуле Клаузера:

$$\nu_t=0{,}0168\left|\int_0^\infty\left(u_e-u\right)dy\right|\gamma\gamma_R+ \quad (10)$$

$$+2lu_e\mathrm{Tu}_e\left(y/\delta\right).$$

При расчете течения в теплоэнергетических устройствах (лопатки компрессоров и газовых турбин) необходимо учитывать степень турбулентности набегающего потока Tu_e [4]. С этой целью на основе градиентной модели А.И. Белова [5, 6] в выражении (5) было введено дополнительное слагаемое $2lu_e\mathrm{Tu}_e\left(y/\delta\right)$, которое позволяет учитывать этот эффект.

Воздействие кривизны линий тока моделируется преобразованием моделей турбулентности, основанных на концепции турбулентной вязкости в модели Прандтля – Ван-Дриста – Клаузера, введением в (5) и (10) функционального выражения вида

$$\gamma_R=1-\beta_C\mathrm{Ri}_C, \quad (11)$$

где

$$\mathrm{Ri}_C=2\left(u/R_w\right)/\left(\partial u/\partial y\right); \quad (12)$$

Ri_C – число Ричардсона.

Учет воздействия кривизны на турбулентную структуру сжимаемого пограничного слоя проводился на основе критериального анализа уравнений переноса рейнольдсовых напряжений и уравнения для кинетической энергии турбулентности.

Уравнения переноса элементов тензора турбулентных напряжений в приближении пограничного слоя (в матричной форме) имеют следующий вид [7]:

$$\frac{D\overline{u_i'u_j'}}{dt} = \mathrm{P}_{ij} + \mathrm{G}_{ij} + \Phi_{ij} - \mathrm{D}_{ij} - \mathrm{E}_{ij}, \qquad (13)$$

где $\overline{u_i'u_j'}$ – компоненты тензора рейнольдсовых напряжений; P_{ij} и G_{ij} – вектора, характеризующие производство турбулентности за счет деформации средней скорости и кривизны линий тока, соответственно имеющие вид:

$$\mathrm{P}_{ij} \equiv \begin{pmatrix} -\overline{u'v'}\cdot\dfrac{\partial\overline{u}}{\partial y} - \overline{u'^2}\cdot\dfrac{\partial\overline{u}}{\partial x} \\ \overline{v'^2}\cdot\dfrac{\partial\overline{u}}{\partial x} \\ 0 \\ -\overline{v'^2}\cdot\dfrac{\partial\overline{u}}{\partial y} \end{pmatrix}; \qquad (14)$$

$$\mathrm{G}_{ij} \equiv \begin{pmatrix} -\overline{u'v'}\cdot\dfrac{\overline{u}}{R_w} \\ 2\cdot\overline{u'v'}\cdot\dfrac{\overline{u}}{R_w} + \dfrac{\overline{\rho'v'}}{\overline{\rho}}\cdot\dfrac{\overline{u'^2}}{R_w} \\ 0 \\ \overline{u'^2} - \overline{v'^2}\cdot\dfrac{\overline{u}}{R_w} \end{pmatrix}; \qquad (15)$$

$$\overline{u_i'u_j'} \equiv \begin{pmatrix} \dfrac{1}{2}\overline{u'^2} \\ \dfrac{1}{2}\overline{v'^2} \\ \dfrac{1}{2}\overline{w'^2} \\ \overline{u'v'} \end{pmatrix}. \qquad (16)$$

Для описания турбулентного движения О. Рейнольдс предложил следующий, получивший общее применение, прием. Регистрируя во времени скорость и давление в данной точке потока, можно положить:

$$u = \overline{u} + u';\ \ v = \overline{v} + v';\ \ w = \overline{w} + w';\ \ p = \overline{p} + p',$$

где u, v, w, p – действительно существующие в потоке мгновенные проекции скорости и давления; $\overline{u}$, $\overline{v}$, $\overline{w}$, $\overline{p}$ – осредненные во времени их значения; u', v', w', p' – пульсационные значения или пульсации, скорости и давления.

Выражения Φ_{ij}, D_{ij} и E_{ij} характеризуют перераспределение энергии турбулентности пульсаций за счет действия пульсаций давления, диффузию за счет турбулентного обмена и вязкую диссипацию соответственно.

Посредством почленного сложения уравнения (13) и учитывая выражения (14)–(16), получим уравнение переноса кинетической энергии пульсаций $k = \frac{1}{2}\left(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}\right)$ в сжимаемом турбулентном пограничном слое на криволинейной поверхности. Это уравнение в тензорной форме имеет вид [8]

$$\frac{Dk}{dt} = \mathrm{D}_k + \mathrm{P}_k + \mathrm{G}_k - \mathrm{E}_k, \qquad (17)$$

где

$$\mathrm{P}_k = -\overline{u'v'}\cdot\frac{\partial\overline{u}}{\partial y} - \left(\overline{u'^2} - \overline{v'^2}\right)\cdot\frac{\partial\overline{u}}{\partial x}; \qquad (18)$$

$$\mathrm{G}_k = \overline{u'v'}\cdot\frac{\overline{u}}{R_w} + \frac{\overline{\rho'v'}}{\rho}\cdot\frac{\overline{u}^2}{R_w}; \qquad (19)$$

$$\mathrm{D}_k = -\frac{\partial}{\partial y}\cdot\left(\overline{v'k'} + \frac{1}{\rho}\cdot\overline{p'v'}\right), \qquad (20)$$

здесь P_k – выражение, характеризующее порождение кинетической энергии вследствие деформации поля средней скорости и отвечающее за генерирование турбулентности вследствие поперечного и продольного ускорения $\partial\overline{u}/\partial x$; G_k – связано с эффектами кривизны линий тока.

В выражении (18) вторым слагаемым можно пренебречь, т. к. генерирование турбулентности за счет продольного ускорения намного меньше, чем за счет кривизны линий тока [9].

Рассматривая в уравнениях (13)–(17) соотношение между составляющими P_{ij} и G_{ij}, P_k и G_k, характеризующими производство турбулентности за счет различных источников возмущения, можно получить обобщенное значение числа Ричардсона Ri*, характеризующее действие центробежных сил в сжимаемой среде:

$$\mathrm{Ri}^* = \mathrm{Ri}_C\cdot\left[1 + \frac{1}{2}\cdot\frac{\overline{\rho'v'}\cdot\overline{u}}{\overline{\rho}\cdot\overline{u'v'}}\right] = \mathrm{Ri}_C + \mathrm{Ri}_M, \qquad (21)$$

где

$$\mathrm{Ri}_M = \frac{\overline{\rho'v'}\cdot\overline{u}}{\overline{\rho}\cdot\overline{u'v'}}\cdot\frac{\left(\overline{u}/R_w\right)}{\left(\partial\overline{u}/\partial y\right)}. \qquad (22)$$

Определение корреляций плотности и скорости как корреляций двух проекций скорости возможно на основе моделей турбулентности градиентного типа [6]:

$$\frac{\overline{\rho'v'}\cdot\overline{u}}{\overline{\rho}\cdot\overline{u'v'}} \cong \left(\frac{1}{\overline{\rho}}\cdot\frac{\partial\overline{\rho}}{\partial y}\right)\Big/\left(\frac{1}{\overline{u}}\cdot\frac{\partial\overline{u}}{\partial y}\right). \qquad (23)$$

Обобщенное значение числа Ri* можно записать:

$$\mathrm{Ri}^* = \mathrm{Ri}_C \cdot \left[1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\frac{1}{\overline{\rho}} \cdot \frac{\partial \overline{\rho}}{\partial y}}{\frac{1}{\overline{u}} \cdot \frac{\partial \overline{u}}{\partial y}} \right]. \quad (24)$$

Оно может быть представлено по-разному для различных термодинамических процессов и рабочих сред. Для совершенного газа выражение (24) перепишется в виде

$$\mathrm{Ri}^* = \mathrm{Ri}_C \cdot \left[1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\frac{1}{\overline{\rho}} \cdot \frac{\partial \overline{\rho}}{\partial y} - \frac{1}{\overline{T}} \cdot \frac{\partial \overline{T}}{\partial y}}{\frac{1}{\overline{u}} \cdot \frac{\partial \overline{u}}{\partial y}} \right]. \quad (25)$$

При течении несжимаемой жидкости (24) запишется в виде $\mathrm{Ri}^* = \mathrm{Ri}_C$. При изобарном или изотермическом условиях течения в пограничном слое, соответственно, имеем:

$$\mathrm{Ri}^* = \mathrm{Ri}_C \cdot \left[1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\frac{1}{\overline{T}} \cdot \frac{\partial \overline{T}}{\partial y}}{\frac{1}{\overline{u}} \cdot \frac{\partial \overline{u}}{\partial y}} \right]; \quad (26)$$

$$\mathrm{Ri}^* = \mathrm{Ri}_C \cdot \left[1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\frac{1}{\overline{p}} \cdot \frac{\partial \overline{p}}{\partial y}}{\frac{1}{\overline{u}} \cdot \frac{\partial \overline{u}}{\partial y}} \right]. \quad (27)$$

Для совершенного газа при выполнении условия постоянства температур торможения поперек пограничного слоя:

$$\mathrm{Ri}^* = \mathrm{Ri}_C \cdot \left[1 + \frac{\kappa - 1}{2} \cdot \mathrm{M}_e^2 + \frac{1}{2} \cdot \mathrm{M}_e^2 \cdot \mathrm{Ri}_c \right]. \quad (28)$$

Алгебраические выражения для компонент рейнольдсовых напряжений и коэффициента Монина – Обухова

Решение системы уравнений (13) – (16) в настоящее время связано с многочисленными трудностями, поэтому используются допущения, основанные на предположении ориентации скорости только вдоль оси *x* и ее независимости от координат *y* (рассматривается течение типа Куэтта) [7]. В этом случае решение дифференциальных уравнений сводится к соответствующей системе алгебраических уравнений для нахождения компонент тензора турбулентных напряжений.

Уравнение для компонент проанализируем для условий, близких к равновесным, когда конвективный и диффузионный перенос уравновешиваются между собой. Область непосредственной близости от стенки исключаем, т. е. пренебрегаем молекулярным переносом. Принципиальна роль слагаемого Φ_{ij}, характеризующего перераспределение пульсаций между различными компонентами посредством пульсаций давления.

Модельное представление Лаундера, Роди и Риса для слагаемого Φ_{ij}, учитывающего взаимодействие пульсаций давления с полем скорости, при анизотропии эффектами молекулярной вязкости предполагает использование выражений вида [10]

$$\Phi_{ij} = -c_1 \frac{\varepsilon}{k} \left(\overline{u_i' u_j'} - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right) - c_2 \left(P_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} p \right); \quad (29)$$

$$E_{ij} = \frac{2}{3} \delta_{ij} \varepsilon, \quad (30)$$

где C_1 и C_2 – константы Лаундера, $C_1 = 1{,}5$; $C_2 = 0{,}6$; δ_{ij} – единичный символ Кронекера; ε – скорость диссипации турбулентной энергии; p – коэффициент, учитывающий величину производства кинетической энергии пульсации.

Применительно к модели Лаундера – Роди – Риса [10] уравнения (13) можно представить в виде:

– для $\overline{u'^2}$ при $(i = j = 1)$:

$$-2\overline{u'v'} \frac{\partial \overline{u}}{\partial y} - 2\overline{u'v'} \frac{\overline{u}}{R_w} - C_1 \frac{\varepsilon}{k} \left(\overline{u'^2} - \frac{2}{3} k \right) - C_2 \left[-2\overline{u'v'} \left(\frac{\partial \overline{u}}{\partial y} + \frac{\overline{u}}{R_w} \right) - \frac{2}{3} \left(-\overline{u'v'} \frac{\partial \overline{u}}{\partial y} + \overline{u'v'} \frac{\overline{u}}{R_w} + \frac{\overline{\rho'v'}}{\overline{\rho}} \frac{\overline{u}^2}{R_w} \right) \right] - \frac{2}{3} \varepsilon = 0; \quad (31)$$

– для $\overline{v'^2}$ при $(i = j = 2)$:

$$\overline{u} \cdot \overline{u'v'} \frac{\overline{u}}{R_w} + 2 \frac{\overline{u'v'}}{\overline{\rho}} \frac{\overline{u}^2}{R_w} - C_1 \frac{\varepsilon}{k} \times \left(\overline{v'^2} - \frac{2}{3} k \right) - C_2 \left[4\overline{u'v'} \frac{\overline{u}}{R_w} + 2 \frac{\overline{\rho'v'}}{\overline{\rho}} \frac{\overline{u}^2}{R_w} - \frac{2}{3} \left(-\overline{u'v'} \frac{\partial \overline{u}}{\partial y} + \overline{u'v'} \frac{\overline{u}}{R_w} + \frac{\overline{\rho'v'}}{\overline{\rho}} \frac{\overline{u}^2}{R_w} \right) \right] - \frac{2}{3} \varepsilon = 0; \quad (32)$$

– для $\overline{u'v'}$ при $(i = 1;\ j = 2)$:

$$-\overline{v'^2}\frac{\partial \overline{u}}{\partial y}+\left[2\overline{u'^2}-\overline{v'^2}\right]\frac{\overline{u}}{R_w}-C_1\frac{\varepsilon}{k}\overline{u'v'}-$$
$$-C_2\left[-\overline{v'^2}\frac{\partial \overline{u}}{\partial y}++\left(2\overline{u'^2}-\overline{v'^2}\right)\frac{\overline{u}}{R_w}\right]=0; \quad (33)$$

– для кинетической энергии турбулентности k:

$$-\overline{u'v'}\left(\frac{\partial \overline{u}}{\partial y}-\frac{\overline{u}}{R_w}\right)+\frac{\overline{\rho'v'}}{\overline{\rho}}\frac{\overline{u}^2}{R_w}-\varepsilon=0. \quad (34)$$

Система четырех уравнений (31)–(34) содержит пять неизвестных: $\overline{u'^2}$, $\overline{v'^2}$, $\overline{u'v'}$, k и ε. Корреляция $\overline{\rho'v'}$ определяется с помощью выражения (23). Отсюда все искомые величины могут быть выражены через какую-либо одну, например через кинетическую турбулентность k.

Для дальнейшего решения системы уравнений (31)–(34) необходимо ввести безразмерные комплексы Ri_C и Ri_M, а также с помощью уравнения (34) заменить скорость диссипации ε в уравнении (32). Вследствие данных преобразований систему уравнений (31)–(34) можно представить в виде

$$\frac{\overline{v'^2}}{k}=-\frac{\frac{2}{3}(1-C_1)\left(1-\frac{1}{2}\mathrm{Ri}_C+\mathrm{Ri}_M\right)}{C_1\left(1-\frac{1}{2}\mathrm{Ri}_C-\mathrm{Ri}_M\right)}-$$
$$-\frac{-\frac{2}{3}C_2+\mathrm{Ri}_C\left(2-\frac{5}{2}C_2\right)+\left(2-\frac{4}{3}C_2\right)\mathrm{Ri}_M}{C_1\left(1-\frac{1}{2}\mathrm{Ri}_C-\mathrm{Ri}_M\right)}; \quad (35)$$

$$\frac{\overline{u'^2}}{k}=-\frac{\frac{2}{3}(1-C_1)\left(1-\frac{1}{2}\mathrm{Ri}_C-\mathrm{Ri}_M\right)}{C_1\left(1-\frac{1}{2}\mathrm{Ri}_C-\mathrm{Ri}_M\right)}-$$
$$-\frac{\left(-2+\frac{4}{3}C_2\right)+\mathrm{Ri}_C\left(-1+\frac{4}{3}C_2\right)+\frac{2}{3}C_2\mathrm{Ri}_M}{C_1\left(1-\frac{1}{2}\mathrm{Ri}_C-\mathrm{Ri}_M\right)}. \quad (36)$$

Для малых значений критериев Ричардсона Ri_C и Ri_M выражения (35) и (36) упрощаются, если оставить лишь линейное приближение. При этом эти выражения могут быть выражены через один критерий Ричардсона Ri^*. Таким образом, все три безразмерные компоненты пульсаций скорости могут быть представлены в виде

$$\frac{\overline{u'^2}}{k}=-\frac{4-4C_2+2C_1}{3C_1}+\frac{2(1-C_2)}{C_1}\mathrm{Ri}^*; \quad (37)$$

$$\frac{\overline{v'^2}}{k}=\frac{2}{3}\frac{(C_2+C_1-1)}{C_1}-\frac{2(1-C_2)}{C_1}\mathrm{Ri}^*; \quad (38)$$

$$\frac{\overline{\omega'^2}}{k}=\frac{2}{3}\frac{(C_2+C_1-1)}{C_1}. \quad (39)$$

Выражения (37) и (38) переходят в соответствующие выражения для случая прямолинейных линий тока [10], а также выполняется предельный переход для случая криволинейного течения несжимаемой жидкости. Одновременно с этим выражения (37) и (38) показывают, что кривизна линий тока (как для случая несжимаемой жидкости, так и для случая сжимаемого газа) оказывает разнонаправленное действие на поперечную и продольную пульсации сжимаемой среды.

Важно отметить, что в выражениях (37)–(39) сохраняется тождественность в записи для безразмерных пульсаций скорости, если в качестве критерия выбирается обобщенный критерий Ричардсона Ri^*.

Для определения константы Монина – Обухова β_C первоначально необходимо найти значение $\overline{u'v'}/k$. Для этого можно воспользоваться уравнением (33), которое можно представить в виде:

$$\frac{\overline{u'v'}}{k}=-\frac{\overline{v'^2}}{C_1\cdot\varepsilon}(1-C_2)\frac{\partial \overline{u}}{\partial y}\times$$
$$\times\left[1-\frac{1}{2}\left(2\frac{\overline{u'^2}}{\overline{v'^2}}-1\right)\mathrm{Ri}_C\right]. \quad (40)$$

Если воспользоваться записью для турбулентного напряжения трения $\tau=-\overline{\rho}\cdot\overline{u'v'}$ в виде

$$\tau=c_\mu\frac{k^2}{\varepsilon}\frac{\partial \overline{u}}{\partial y},$$

то константа Колмогорова c_μ запишется в виде

$$c_\mu=\frac{1-C_2}{C_1}\frac{\overline{v'^2}}{k}\left[1-\frac{1}{2}\mathrm{Ri}_C\left(2\frac{\overline{u'^2}}{\overline{v'^2}}-1\right)\right]. \quad (41)$$

Для конкретных постоянных величин $C_1 = 1{,}5$ и $C_2 = 0{,}6$ выражения (37) и (38) запишутся в виде

$$\frac{\overline{u'^2}}{k}=\frac{46}{45}+\frac{8}{15}\cdot\mathrm{Ri}^*;\ \frac{\overline{v'^2}}{k}=\frac{22}{45}-\frac{8}{15}\mathrm{Ri}^*. \quad (42)$$

При этом константа β_C будет иметь значение

$$\beta_C=\left(\frac{2\overline{u'^2}}{\overline{v'^2}}-1\right)=\frac{5(1-C_2)+C_1}{C_2+C_1-1}. \quad (43)$$

$$F_C^*=\left[1-\frac{1}{2}\beta_C^*\mathrm{Ri}_C\right]=1-\frac{35}{22}\mathrm{Ri}_C, \quad (44)$$

откуда

$$\frac{\overline{u'v'}}{k}=-\frac{\overline{v'^2}}{k}\frac{k}{\varepsilon}\frac{1-C_2}{C_1}\frac{\partial \overline{u}}{\partial y}F_C^*. \quad (45)$$

Из уравнения (34) следует, что

$$\varepsilon = -\overline{u'v'}\frac{\partial \overline{u}}{\partial y}\left(1-\frac{1}{2}\mathrm{Ri}_C - \mathrm{Ri}_M\right). \qquad (46)$$

При малых значениях чисел Ri^* (Ri_C и Ri_M) выражение (45) упрощается и имеет вид

$$\frac{\overline{u'v'}}{k} = \left[\frac{2}{3}\frac{(1-C_2)}{C_1}\frac{(C_2+C_1-1)}{C_1}\right]^{1/2} \times$$
$$\times\left[1-\frac{3}{2}\frac{1-C_2}{(C_2+C_1-1)}\mathrm{Ri}^*\right]\times \qquad (47)$$
$$\times\left[1-\frac{3}{2}\frac{1-C_2}{(C_2+C_1-1)}\mathrm{Ri}_C+\frac{1}{2}\mathrm{Ri}_M\right].$$

Для конкретных постоянных величин $C_1 = 1{,}5$ и $C_2 = 0{,}6$:

$$\frac{\overline{u'v'}}{k} = 0{,}361\left[1-0{,}545\mathrm{Ri}^*\right]\left[1-0{,}545\mathrm{Ri}_C+\frac{1}{2}\mathrm{Ri}_M\right]. \qquad (48)$$

При течении газа с малыми скоростями ($\mathrm{Ri}_M = 0$):

$$\frac{\overline{u'v'}}{k} = 0{,}361\left[1-1{,}09\mathrm{Ri}_C\right], \qquad (49)$$

что практически совпадает с соответствующим выражением в работе [10].

Для равновесного течения:

$$-\overline{u'v'}\frac{\partial \overline{u}}{\partial y}\left(1-\frac{1}{2}\mathrm{Ri}_C - \mathrm{Ri}_M\right) = \frac{k^{3/2}}{L_\varepsilon}, \qquad (50)$$

где L_ε – длина диссипации вихрей, пропорциональная длине пути смешения [87].

Предполагая, как сделано в работе [9], что градиент скорости $\partial\overline{u}/\partial y$ и L_ε слабо зависят от кривизны линий тока, используя выражения (48) и (50) и возводя в квадрат, получим:

$$\overline{u'v'} = 0{,}047L_\varepsilon^2\left(\frac{\partial \overline{u}}{\partial y}\right)^2\left(1-0{,}545\mathrm{Ri}^*\right)^3 \times$$
$$\times\left(1-0{,}545\mathrm{Ri}_C+0{,}5\mathrm{Ri}_M\right)^3\times \qquad (51)$$
$$\times\left(1-\frac{1}{2}\mathrm{Ri}_C-\mathrm{Ri}_M\right)^2.$$

Отсюда поправочная функция на кривизну линий тока в сжимаемой среде имеет вид

$$\frac{\overline{u'v'}}{\left(\overline{u'v'}\right)_0} = \left(1-0{,}545\mathrm{Ri}^*\right)^3 \times$$
$$\times\left(1-0{,}545\cdot\mathrm{Ri}_C+0{,}5\mathrm{Ri}_M\right)^3\times \qquad (52)$$
$$\times\left(1-\frac{1}{2}\mathrm{Ri}_C-\mathrm{Ri}_M\right)^2,$$

где $\left(\overline{u'v'}\right)_0 = 0{,}047L_\varepsilon^2\left(\frac{\partial \overline{u}}{\partial y}\right)^2$; здесь L_ε – условная длина диссипации вихрей, пропорциональная длине пути перемешивания; индекс «0» относится к течению газа на плоской стенке.

Для малых значений чисел Ричардсона (Ri^*, Ri_C и Ri_M) можно записать:

– для несжимаемой среды:

$$\frac{\overline{u'v'}}{\left(\overline{u'v'}\right)_0} = 1-4{,}27\mathrm{Ri}_C; \qquad (53)$$

– для сжимаемого газа:

$$\frac{\overline{u'v'}}{\left(\overline{u'v'}\right)_0} = 1-4{,}27\mathrm{Ri}_C-1{,}135\mathrm{Ri}_M. \qquad (54)$$

Для учета воздействия центробежных сил вводится число Монина – Обухова β_C из соотношения:

$$\frac{\overline{u'v'}}{\left(\overline{u'v'}\right)_0} = 1-\beta_C\mathrm{Ri}_C. \qquad (55)$$

Выражение (55) использовалось при течении несжимаемой жидкости, аналогично для больших скоростей имеют место замены Ri_C на Ri^* и β_C на β_C^*.

Как следует из выражения (53), для несжимаемой жидкости в рамках линейного приближения имеем $\beta_C = 4{,}27$; в свою очередь, для сжимаемого газа получим:

$$\beta_C^* = 4{,}27+1{,}135\frac{\mathrm{Ri}_M}{\mathrm{Ri}_C} = \qquad (56)$$
$$= 4{,}27+0{,}567\frac{d\left(\ln\rho\right)}{d\left(\ln u\right)}.$$

Поправочный множитель $\gamma_R = 1-\beta_C^*\mathrm{Ri}^*$ в модели турбулентной вязкости Себеси – Смита вводится аналогично записи, широко применяемой в практике расчетов теплообмена в пограничном слое несжимаемой жидкости. Из выражения (54) коэффициент Монина – Обухова можно представить в виде

$$\beta_C^* = 4,27 - 3,135\frac{\frac{k-1}{2}\mathrm{M}_e^2}{1+\frac{k-1}{2}\mathrm{M}_e^2}, \qquad (57)$$

что соответствует введению поправочного множителя на сжимаемость среды в виде

$$\beta_C^* = \beta_C\beta_M;\ \beta_M = 1 - \frac{3,135}{4,27}\frac{\frac{k-1}{2}\mathrm{M}_e^2}{1+\frac{k-1}{2}\mathrm{M}_e^2}. \qquad (58)$$

Выражения (57) и (58) показывают, что с увеличением числа Маха абсолютная величина коэффициента Монина – Обухова уменьшается приближенно к асимптотическому значению (рис. 1).

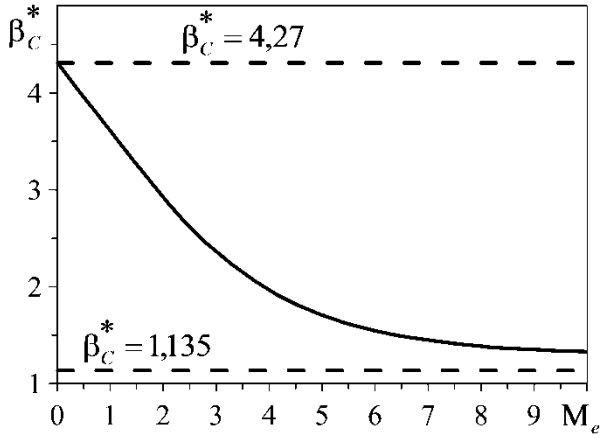


Рис. 1. Зависимость константы Монина – Обухова от числа Маха с учетом эффектов сжимаемости и неизотермичности потока газа

Можно отметить, что падение значения β_C наблюдается и при увеличении δ^{**}/R_w.

Заключение

Модернизирована алгебраическая модель турбулентности путем ввода дополнительного слагаемого, учитывающего степень турбулентности набегающего потока.

Получены выражения для числа Ричардсона на основе анализа уравнения переноса элементов тензора турбулентных напряжений в приближении пограничного слоя с учетом неизотермичности и сжимаемости среды для различных термодинамических процессов и рабочих сред.

На основе анализа компонент рейнольдсовых напряжений с использованием модельного представления Лаундера – Роди – Риса, учитывающего взаимодействие пульсаций давления с полем скорости, выведено аналитическое выражение для константы Монина – Обухова при течении сжимаемого газа на криволинейной поверхности в пограничном слое.

Получено функциональное выражение для алгебраической модели турбулентности Прандтля – Ван-Дриста – Клаузера, которое позволяет учесть влияние кривизны поверхности на течение газа в сжимаемом турбулентном пограничном слое.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кортиков Н. Н., Кузнецов Н. Б., Садовникова Т. Ю. Совершенствование подходов к моделированию теплового состояния перфорированных лопаток высокотемпературных газовых турбин // Теплоэнергетика. 2012. № 1. С. 15–21.
2. Kortikov N. N., Nechaev V.V. Heat and Mass Transfer and Friction on Urvilinear Surface of Nozzies and Diffusors // Thermal Eng. 1993. Vol. 40. № 3. P. 481–496.
3. Себеси Т., Брэдшоу П. Конвективный теплообмен: Физические основы и вычислительные методы : пер. с англ. М. : Мир, 1987. 592 с.
4. Ван Т., Симон Т. Измерения тепловых и гидродинамических характеристик в переходных пограничных слоях на выпуклой поверхности // Энергетические машины. 1988. № 3. С. 109–121.
5. Белов И. А., Исаев С. А., Коробков В. А. Задачи и методы расчета отрывных течений несжимаемой жидкости. Л. : Судостроение, 1989. 256 с.
6. Белов И. А. Модели турбулентности. Л. : ЛМИ, 1982. 88 с.
7. Рис. В. В. Смирнов Е. М., Смирнов С. А. Структура турбулентного течения по прямоугольным каналам, вращающимся вокруг поперечной оси // ПМТФ. 1985. № 2. С. 64–70.
8. Rotta I. C. Effect of streamline wall curvature on compressible turbulent boundary layers // Phys. Fluids. 1967. Vol. 10. № 9. P. 174–180.
9. Irwin H.P.A.H., Smith P.A. Prediction of the Effect of Streamline Curvature on Turbulence // Phys. Fluids. 1975. Vol. 18. № 6. P. 624–630.
10. Launder B. E. Recce R. J., Rodi W. Progress in the Development of a Reynolds Stress Turbulence Dosure // J. Fluid Mech. 1975. Vol. 68. № 3. P. 537–566.

УДК 004.912

Макаров Владимир Александрович,
аспирант, Иркутский государственный университет путей сообщения,
тел. 89500625747, shtrasser@gmail.com
Молчанова Елена Ивановна,
д. т. н., профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения,
тел. 89148788778, moleli59@gmail.com

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА СЕМАНТИЧЕСКОГО ПОИСКА В ВЕБ-ПРОСТРАНСТВЕ

V.A. Makarov, E.I. Molchanova

MODEL OF THE PROCESS OF SEMANTIC SEARCH IN THE WEB

Аннотация. *Статья рассматривает проблемы современных поисковых систем. Предлагаются поисковая система и система построения запросов, основанные на семантической модели веб-страницы.*

Ключевые слова: *поисковая система, интеллектуальный анализ данных.*

Abstract. *This report consides the problems of modern web search engines. We propose a web search engine and query building system based on semantic web page model.*

Keywords: *web search, data mining.*

Введение

Поиск информации в Интернете является не только самой распространенной, но и вместе с тем одной из самых сложных задач, с которыми приходится сталкиваться в Сети любому пользователю. Огромные объемы информации в сети Интернет зачастую приводят к тому, что количество объектов, выдаваемых по запросу пользователя, очень велико. Это затрудняет процесс обзора результатов и выбора наиболее подходящих материалов из множества найденных.

Основной проблемой современных поисковых систем является то, что из-за фактически устаревшей модели поиска они не могут обеспечить качественный поиск информации. Дело в том, что большинство поисковых систем рассматривают веб-страницу как элементарную составляющую структуры веб-пространства. Однако большинство веб-страниц состоят из нескольких слабо связанных между собой (или не связанных вовсе) частей. Например, на странице может быть размещена основная статья, последние новости и реклама. Каждый из этих информационных блоков имеет свою собственную смысловую составляющую и, как следствие, может рассматриваться как отдельный документ.

Постановка задачи информационного поиска

Пусть нам даны два множества, M и N. Множество N является множеством объектов поиска. Из элементов этого множества составляются информационные массивы, среди которых производится поиск нужных объектов. Элементы множества N будем называть записями. Множество X будем называть множеством запросов, а его элементы – запросами. Пусть на декартовом произведении $M \times N$ задано бинарное отношение ρ, то есть задано некое подмножество $R \subseteq M \times N$. Отношение ρ будем называть отношением поиска.

Тройку $S = \langle M, N, \rho \rangle$ будем называть типом задач информационного поиска.

Тройку $I = \langle M, V, \rho \rangle$, где V – некоторое конечное подмножество множества Y, в дальнейшем называемое библиотекой, будем называть задачей информационного поиска. Задача $I = \langle M, V, \rho \rangle$ состоит в перечислении для произвольно взятого запроса $m \in M$ всех тех и только тех записей из V, которые состоят в отношении ρ с запросом m.

Для решения поставленной задачи предложено в качестве объектов информационного поиска (V) использовать не сами веб-страницы, а семантические блоки, из которых состоят веб-страницы.

Семантическая модель веб-страницы

Анализ существующих веб-страниц показывает, что l-я веб-страница (P^l) может состоять из следующих типов семантических блоков:

$$TSB = \{Info, News, Catalog, Forum, Ad\}, \quad (1)$$

где *Info* – информационный блок;
News – новостной блок;
Catalog – каталог;
Forum – форум;
Ad – реклама.

Введем следующую семантическую модель веб-страницы:

$$P = \{(V_i, R_p) : V_i \in TSB\}, \quad (2)$$

где R_p – степень корреляции между отдельным семантическим блоком и исходным веб-документом, представленная в виде весовой функции.

Модель информационного поиска

Для создания модели поиска рассмотрим поиск как многостадийный процесс (рис. 1), в котором x_i представляет собой входной параметр, а u_i – управляющее воздействие.

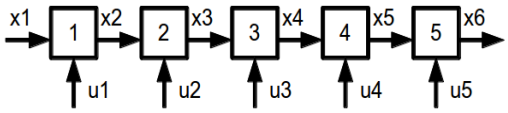


Рис. 1. Модель информационного поиска

На рис. 1 в работе поисковой системы выделены следующие процессы:

1. Составление поискового образа запроса.
2. Получение результатов поисковой системы.
3. Разбиение страницы на семантические блоки.
4. Кластеризация полученных семантических блоков.
5. Построение аннотаций для полученных кластеров.
6. Выдача результатов пользователю.

Для оценки эффективности информационного поиска введено понятие пертинентности. Пертинентность – это соответствие полученной информации информационной потребности пользователя. В работе [1] предприняты попытки количественной оценки этой величины. Для того чтобы предложенная нами модель была эффективной, необходимо достичь максимума величины пертинентности. С этой целью воспользуемся методами динамического программирования.

Оптимальная стратегия управления многостадийным процессом обладает тем свойством, что каковы бы ни были начальное состояние процесса и управление на первой стадии, последующие управления на всех стадиях должны составлять оптимальную стратегию относительно состояния первой стадии, определяемого начальным состоянием процесса и управлением на первой стадии [2].

В приведенной формулировке принципа оптимальности под оптимальной стратегией u_{n-1} понимается стратегия управления многостадийным процессом, включающим N 1 последних стадий исходного процесса, придающая критерию оптимальности экстремальное значение.

Опишем стадии предложенной модели информационного поиска с точки зрения динамического программирования и выделим управляющие воздействия, увеличивающие значение пертинентности.

Составление поискового образа запроса

Система построения запросов генерирует запрос в виде последовательности ключевых слов, соединенных элементами языка построения запросов выбранной поисковой системы.

Обозначим за F_1 функцию, которая осуществляет преобразование пользовательского запроса на язык запросов выбранной поисковой системы:

$$F_1 : q \to Q, \quad (3)$$

где q – запрос пользователя;
Q – сформированный запрос.

Получение результатов поисковой системы

На этом этапе воспользуемся функциями, которые предоставляют существующие поисковые системы (Google, Bing). На вход поисковой системе подается сформированный поисковый запрос, на выходе – получаем список результатов поиска.

Введем F_2 – функцию, преобразующую сформированный запрос в последовательность найденных поисковой машиной веб-страниц:

$$F_2 : Q \to = \{P^I\}, \quad (4)$$

где P^I – страница, еще не разбитая на семантические блоки.

Разбиение страницы на семантические блоки

На этом этапе мы используем объектную модель документа (Document Object Model – DOM). Объектная модель документа является стандартом, предложенным веб-консорциумом, и регламентирует способ представления содержимого документа (в частности веб-страницы) в виде набора объектов, то есть html-узлов документа и связей между ними.

Таким образом, мы можем представить документ в виде блоков:

$$P^{II} = \{h : h \in H\}, \quad (5)$$

где H – множество html-объектов.

Для каждого блока вычисляется множество признаков данного блока. Выделены следующие характерные признаки блоков:

1. Общее количество символов.
2. Общее количество слов.
3. Общее количество абзацев.
4. Общее количество изображений.
5. Наличие блоков со сходной структурой.
6. Наличие ключевых слов.

Для каждого типа блока определяем свою функцию принадлежности, которая определяет, к какому типу относится рассматриваемый блок.

Затем введем F_3 – функцию, которая выполняет отображение объектной модели веб-страницы в семантическую модель. Отображение может

быть частичным или полным. Полное отображение предполагает, что каждому элементу из объектной модели веб-страницы соответствует отдельный семантический блок. В нашем случае, например, элементы, не содержащие текстовой информации, не могут быть отнесены к какому-либо семантическому блоку, поэтому отображение является частичным.

$$F_3 : \{P^I\} \to \{P\}. \qquad (6)$$

Кластеризация полученных семантических блоков

Целью этого этапа является автоматическое выявление групп семантически похожих блоков среди найденного множества семантических блоков (множество $\{P\}$). В нашей задаче в качестве множества документов выступают страницы, найденные поисковой машиной.

Каждый из блоков представляется набором слов (или словосочетаний, или других единиц языка). В этом наборе могу встречаться конструкции, которые не должны влиять на результаты поиска: некоторые слова общей лексики, предлоги и другие строки. Имеются также слова, которые непосредственно влияют на отнесение документа в какую-либо категорию, – это термины. Каждый термин является элементарным признаком, множество терминов составляет пространство.

Множество терминов – это множество точек или векторов этого пространства. Координатами точки являются величины значимости каждого термина для данного документа. Величина значимости может оцениваться различными моделями. Часто используются следующие модели оценки значимости [3]:

- Хэммингово расстояние. 0 означает, что термин в данном документе не встречается, 1 – встречается.
- Частота встречаемости слова.
- Модель TF-IDF.

При кластеризации документов следует стремиться к тому, чтобы схожесть документов, попадающих в кластер, была смысловой. При этом численно схожесть задается следующими способами:

1. Множество документов, значения близости между любыми двумя элементами которого не меньше определенного порога: $d^2\left(X_i, X_j\right) \geq D_{\min}$, где $X_i, X_j \in X$ – множество всех векторных признаков, d^2 – эвклидово расстояние.

2. Значение близости между любым документом множества и центром масс кластера не меньше определенного порога, центр масс кластера рассчитывается как среднее арифметическое между всеми документами кластера:

$$\mu_s = \frac{1}{|S_i|} \sum_{x_i \in S_i} X_i,$$

где $S_i \in S$ – множество всех кластеров.

Для разбиения с заранее неизвестным числом классов критерий качества задают в виде комбинации двух критериев. Одним из них является убывающая (невозрастающая) функция числа классов k и характеризует, как правило, внутриклассовый разброс наблюдений. Второй критерий – это возрастающая (или неубывающая) функция числа классов k. Например, критерий качества можно представить в виде формулы:

$$D(S) = \left(\sum_{j=1}^{k} \sum_{X_i \in S_i} d^2(X_i, X_j) \right) \left(ck(S) \right), \qquad (7)$$

где c – некоторая положительная константа,
$k(s)$ – число кластеров при разбиении S.

В нашей работе для кластеризации текстов мы используем метод K-means (K-средних) [4].
В основе этого метода лежит итеративный процесс стабилизации центров масс кластеров. Этот метод был выбран по двум причинам. Во-первых, это низкая вычислительная сложность, а во-вторых, этот метод не нуждается в обучении.

Основная идея метода заключается в том, что на каждой итерации заново вычисляется центр масс для каждого кластера, полученного на предыдущем шаге. Затем векторы разбиваются на кластеры вновь в соответствии с тем, какой из новых центров оказался ближе. Другими словами, алгоритм стремится минимизировать суммарное квадратичное уклонение точек кластеров от центров этих кластеров:

$$D(S) = \left(\sum_{j=1}^{k} \sum_{X_i \in S_i} d^2(X_i, \mu_j) \right), \qquad (8)$$

где k – число кластеров,
S_i – полученные кластеры,
μ_j – центры масс векторов $X_i \in S_i$.

Алгоритм завершается, когда на какой-то итерации не происходит изменения кластеров. Это происходит за конечное число итераций, так как количество возможных разбиений конечного множества конечно, а на каждом шаге суммарное квадратичное уклонение уменьшается.

Наиболее широко применяемыми оценками качества классификации являются полнота и точность. Полнотой классификации документов по кластеру называют отношение количества доку-

ментов, правильно приписанных к кластеру, к общему количеству документов в кластере:

$$r(S^i) = \frac{|S^i \cap C^i|}{|C^i|}, \quad (9)$$

где $C^i \in S$ – верное разбиение множества документов S на кластеры C^i.

Точность классификации документов по кластеру вычисляется как отношение количества документов, правильно приписанных к кластеру, к общему количеству документов, приписанных к данному кластеру:

$$r(S^i) = \frac{|S^i \cap C^i|}{|S^i|}. \quad (10)$$

При проверке качества работы нашего классификатора за верное разбиение $C^i \in S$ принималось разбиение, полученное классификатором SVN-light [7]. При этом точность классификации составила 72,6 %, а полнота 83,5 %.

F_4 – функция преобразует множество разбитых на семантические блоки страниц в группы кластеризованных блоков:

$$F_4 : P^I \to \{S_{info}, S_{forum}, S_{catalog}, S_{ad}, S_{news}\}, \quad (11)$$

где S_{info} – множество кластеров по информационным блокам; S_{forum} – множество кластеров по форумам; $S_{catalog}$ – множество полученных кластеров по каталогам; S_{Ad} – множество полученных кластеров по рекламным блокам; S_{news} – множество полученных кластеров по новостным блокам.

Построение аннотаций для полученных кластеров

После того как мы разбили информационные блоки на кластеры, необходимо для каждого кластера построить аннотацию. Исходя из соображений практической применимости, к формируемым аннотациям предъявляется два дополнительных требования:

1. Фрагменты текста, включаемые в аннотацию, должны быть короткими фразами, содержащими 2 3 слова. В противном случае при употреблении в аннотациях развернутых предложений восприятие результата кластеризации будет затруднено.

2. Форма, в которой записан фрагмент, включаемый в аннотацию, не должна предполагать наличия контекста.

Для каждого кластера необходимо сформировать списки ключевых многословных терминов, имеющих наибольшую информационную значимость для кластера. Каждое слово термина представлено канонической формой. Под канонической формой подразумевается неизменяемая часть слова, которая выражает его лексическое значение. Для выделения основы слова используется алгоритм Портера [9].

Для генерации аннотаций мы используем подход, в соответствии с которым в качестве аннотаций выбираются фрагменты текстов из заданного кластера. Таким образом, реальный синтез связанного текста не выполняется, а задача сводится к поиску текстового фрагмента, наиболее релевантного для всего кластера. В таком случае синтаксическая связанность аннотации гарантируется, поскольку полагается, что обрабатываемые тексты содержат связанные фрагменты [10].

Задача данного этапа – из всех встречающихся в тексте терминов выбрать наиболее предпочтительный. Поскольку желательно избегать употребления терминов из одних кластеров в аннотациях к другим, необходимо применять более строгие санкции к терминам, которые встречаются более чем в одном кластере. Более того, предпочтение следует отдавать терминам, имеющим равномерное распределение в текстах кластера, т. е. следует избегать включения в аннотацию терминов, встречающихся часто в одном документе кластера и редко – в другом. Также важно поощрять термины, покрывающие наибольшее число документов кластера.

Для этого мы рассматриваем весь кластер как один большой текст и к этому тексту применяем критерий TF-IDF. Предложена следующая модификация функции TF-IDF [3,4], оценивающая предпочтительность термина для включения его в аннотацию:

$$p_t^i = \frac{f_t^i}{\sum_j f_j^i} \cdot \frac{N}{N_t} \cdot \frac{D_t^i}{D^i}, \quad (12)$$

где f_t^i – частота употребления термина t в текстах кластера S_i, f_j^i – частота употребления j-го термина в текстах кластера S_i, N – количество кластеров, N_t – количество кластеров, в которых встречается термин t, D_t^i – количество документов в кластере S_i, в которых встречается термин t, D^i – количество документов в кластере S_i.

Таким образом, из всех терминов кластера отбирается единственный, с максимальным значением предпочтительности p_t^i. Аннотацией кластера объявляется фрагмент текста, связанный с данным термином.

Выдача результатов пользователю

На этом этапе полученные кластеры, аннотации к кластерам и список результатов поиска

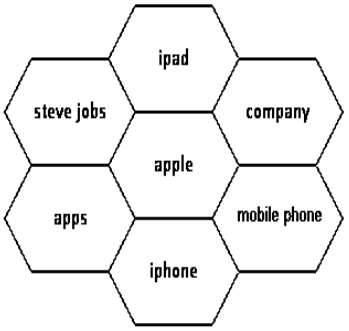
выводится пользователю. Пользователь может выбрать интересующий его кластер либо, используя построенные аннотации для кластеров, уточнить свой запрос.

Реализация

Разработка выполнена на языке программирования C#, с использованием фреймворка .NET 3.5. Рассмотрим пример работы системы построения запросов, представленный на рис. 2.

В данном случае первые 200 страниц, найденные поисковой системой по запросу «apple» разбивались на 6 категорий. Для каждой из этих категорий была построена аннотация. Пользователь может мышкой выбрать интересующую его категорию, при этом поиск будет осуществлен заново.

В центральной ячейке пользователь может изменить запрос, при этом найденные поисковой машиной веб-страницы будут заново разбиты на смысловые блоки, полученные блоки кластеризованы, и для каждого кластера будет построена аннотация.



Apple

Apple designs and creates iPod and iTunes, Mac laptop and desktop computers, the OS X operating system, and the revolutionary iPhone and iPad.

Official Apple Store - Buy the new iPad. Apple TV. iPhone. Mac ...

Рис. 2. Система построения запросов

Результаты

В результате проведенных исследований предложены, реализованы и имеют научную новизну следующие положения:

- Модель веб-страницы, основанная на выделении основных семантических блоков.
- Модель информационного поиска, представленная в виде многостадийного процесса.
- Методы, реализующие по предложенной модели поэтапный анализ текста произвольных веб-страниц: извлечение словарных объектов, формирование контента документа в виде семантической сети объектов, кластеризация документов по смысловому признаку, автоматическое построение аннотации для построенных кластеров документов.
- Программное обеспечение, предназначенное для кластеризации и ранжирования веб-страниц, автоматического построения аннотаций, а так же интерфейс системы построения запросов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гасанов Э. Э. Функционально-сетевые базы данных и сверхбыстрые алгоритмы поиска // М. 1997, 60 с.
2. Терехов А. А. Разработка методов и инструментальных средств повышения пертинентности поиска в современных информационных средах : дис. … к-та техн. наук. М., 2010. 126 с.
3. Agarwal P. K. and Procopiuc C. M. Exact and Approximation Algorithms for Clustering // Proc. Ninth Ann. ACM-SIAM Symp. Discrete Algorithms. 1998. С. 658–667.
4. Jain A., Murty M., Flynn P. Data Clustering: A Review // ACM Computing Surveys. 1999. Т. 31. С. 264–323.
5. Kamvar S. D., Haveliwala T. H., Golub G. H. Adaptive Methods for the Computation of PageRank // Lin. Alg. Appl. 2004. Т.386. С. 51–65.
6. Amit S. Modern Information Retrieval: A Brief Overview // IEEE Data Engineering Bulletin. 2001. Т. 24. С. 35–43.
7. Joachims T. Training Linear SVMs in Linear Time // ACM SIGKDD International Conference On Knowledge Discovery and Data Mining (KDD). 2006. С. 217–226.
8. Андреев А. М. , Березкин Д. В., Симаков К. В. Обучение морфологического анализатора на большой электронной коллекции текстовых документов // Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции: труды Седьмой всерос. науч. конф. Ярославль : Ярослав. гос. ун-т, 2005. С. 173–181.
9. Porter M. F.: An Algorithm for Stripping // Programm. 1980. Т. 14. № 3 P. 130–137.
10. Erdmann M., Maedche A., Schnurr H., Staab S.: From Manual to Semi-automatic Semantic Annotation: About Ontology-based Text Annotation Tools // Proceedings of the COLING 2000 Workshop on Semantic Annotation and Intelligent Content. 2000. P. 94–112.

УДК 621.33

Худоногов Анатолий Михайлович,
д. т. н., профессор кафедры «Электроподвижной состав»
Иркутский государственный университет путей сообщения,
тел. 8-914-88-14-675
Лыткина Екатерина Михайловна,
к. т. н., ст. преподаватель кафедры «Электроподвижной состав»,
Иркутский государственный университет путей сообщения,
тел. 8(3952)63-83-66
Дульский Евгений Юрьевич,
аспирант, ассистент кафедры «Электроподвижной состав»,
Иркутский государственный университет,
тел. 8-983-403-46-43

ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И ПРОДЛЕНИЯ РЕСУРСА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ТЯГОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

A.M. Hudonogov, E.M. Lytkina, E.Yu. Dulskiy

INNOVATIVE TECHNOLOGY OF IMPROVING RELIABILITY AND ELECTRIC MACHINES TRACTION VEHICLES LIFE EXTENSION

Аннотация. *На основании проведенного анализа надежности электрических машин предложена инновационная технология повышения надежности и продления ресурса якорей и остовов тяговых двигателей электровозов и статоров асинхронных вспомогательных машин МВПС путем капсулирования и сушки изоляции обмоток энергией ИК-излучения.*

Ключевые слова: *тяговый электрический двигатель, изоляция, ИК-излучатель, нагрев, сушка, ресурс, надежность.*

Abstract. *An innovative technology to improve the reliability and extending the life of the anchors and the cores of electric traction motors and stators asynchronous auxiliary machines electric train by encapsulating and drying the winding insulation energy infrared radiation based on the analysis of the reliability of electrical machines is offered.*

Keywords: *drive electric motor, insulation, IR-emitter, heating, drying, resource, reliability.*

Проблема повышения надежности и продления ресурса электрических машин и аппаратов тягового подвижного состава приобрела в последние годы большое социально-экономическое значение для железнодорожного транспорта. Необходимым условием безубыточной работы и эффективного функционирования в рыночных условиях железнодорожного транспорта является минимизация всех производственных издержек, которой можно достичь путем анализа бизнес-процессов, процессов обеспечения и менеджмента с последующим применением инновационных технологий. Системный анализ данных процессов позволил из комплекса существующих проблем выделить проблему обеспечения безопасности и надежности электрических машин тягового подвижного состава. Решение этой проблемы определяется надлежащей организацией управления качеством производства, эксплуатации и ремонта электрических машин.

Электрические машины тягового подвижного состава относятся к наиболее нагруженному оборудованию, и поэтому с позиций комплексного воздействия на них тепловых, электромагнитных, механических и климатических факторов, несмотря на постоянно проводимые мероприятия конструктивно-технологического характера при изготовлении и ремонте, уровень повреждаемости их в эксплуатации хотя и снижается, но остается довольно высоким. Очень велика доля отказов и по тяговым электрическим аппаратам.

Теория надежности электрических машин и аппаратов тягового подвижного состава в ее современном виде стала развиваться сравнительно недавно. На протяжении нескольких предшествующих десятилетий тяговое электромашиностроение развивалось в направлении повышения использования машин, увеличения нагрузок активных материалов и снижения массы на единицу мощности. Параллельно с этим разрабатывались и внедрялись новые виды активных, конструкцион-

ных и изоляционных материалов, совершенствовалась вентиляция. Однако запас прочности,
а вместе с тем и устойчивости к перегрузкам постепенно снижались. В результате наметилась тенденция общего снижения надежности электрических машин тягового подвижного состава. Наиболее высокие показатели по снижению надежности у тяговых электрических машин грузовых электровозов особенно у грузовых электровозов эксплуатируемых на железных дорогах Восточного региона. В настоящее время на Восточно-Сибирской железной дороге эксплуатируются мощные грузовые электровозы переменного тока. Они работают на крутых и протяженных подъемах, общая длина которых только на ВСЖД превышает 100 км. На этих подъемах электровозы нередко реализуют мощность, превосходящую номинальную.

Пониженная надежность электровозов Восточного региона приводит к задержкам поездов, срывам передач вагонов на соседние железные дороги и снижению безопасности движения поездов.

По данным Желдорреммаш, на электрические машины электровозов приходится 53 % от общего количества отказов, по электрическому оборудованию 25 %, по механическому оборудованию 20 %, по тормозному и пневматическому оборудованию 2 %. На электрические машины электропоездов приходится 28 % от общего количества отказов, на механическое оборудование – 33,6 %, по электроаппаратуре – 39,2 %. На электрические машины тепловозов приходится 42 % от общего количества отказов, на электрическое оборудование 28 %, на механическое оборудование 16 %, на дизель 12 % и на тормозное и пневматическое оборудование 2 %.

Решение этой проблемы лежит в плоскости создания теории для системы технического содержания изоляции ТД электровозов на основе комплексной диагностики и эффективной технологии восстановления изоляции ТД в зависимости от зональных особенностей эксплуатации. Такие основы были заложены в трудах советских и российских ученых. Исследованию надежности тягового подвижного состава железных дорог, системам технического диагностирования и ремонта уделяли значительное внимание различные научные коллективы. Однако вопросам надежности предельно нагруженного оборудования электровозов с учетом особенностей климатических условий внешней среды начали заниматься лишь в последние годы ушедшего столетия. И, тем не менее, некоторые вопросы в области повышения надежности и продления ресурса электрических машин и аппаратов тягового подвижного состава требуют к себе дальнейшего внимания. Поэтому проблема повышения надежности и продления ресурса электрических машин и аппаратов остается актуальной по настоящее время и представляет научный и практический интерес.

С целью повышения надежности и продления ресурса электрических машин кафедрой «Электроподвижной состав» Иркутского государственного университета путей сообщения совместно со специалистами ВСЖД – филиала ОАО «РЖД» была предложена теория, технология и техника капсулирования изоляции лобовых частей обмоток якорей с открытыми головками секций, лобовых частей обмоток статоров асинхронных электродвигателей и обмоток магнитной системы остовов ТД.

Особое значение вопрос повышения надежности и продления ресурса электрических машин, аппаратов приобретает в связи с реформированием железнодорожного транспорта. В соответствии со стратегическими задачами холдинга ОАО «РЖД» до 2030 года предусмотрен переход на полигонные (зональные) технологии эксплуатации и ремонта локомотивов. Практика эксплуатации электрических машин и аппаратов тягового подвижного состава на железных дорогах Восточного региона показывает, что порчи и неисправности электровозов ВСЖД в 1,6 раза превышают среднесетевые. В экстремально холодный зимний период 2000–2001 годов это превышение составило 2–2,5 раза. Причем для одних и тех же серий тягового подвижного состава степень повреждаемости изоляции обмоток электрических машин значительно отличается в зависимости от зональных особенностей эксплуатации. Например, применительно ВСЖД степень повреждаемости изоляции тяговых двигателей (ТД) на электровозах при эксплуатации их в зонах «север» – «центр» – «юг» различается в 2–4 раза. Этот количественный показатель указывает на отсутствие системы организации управления качеством эксплуатации и ремонта электровозов с учетом зональных особенностей. К таким особенностям, прежде всего, необходимо отнести высокую грузонапряженность, сложный план и профиль пути, а также особенности климатических условий внешней среды (большие перепады температур в течение суток, низкие температуры по «северному» ходу, высокая относительная влажность воздуха, пониженное абсолютное давление, снег, пыль и другие).

Необходимость применения принудительной вентиляции и защиты коллекторных ТД от внешних агрессивных воздействий обусловливает практически полную герметизацию их узлов от внешней среды и в еще большей мере усложняет

внутреннюю аэродинамику машины, так как приходится входной и выходной патрубки для вентилирующего воздуха располагать в верхней части. Это приводит к значительной неравномерности нагрева обмоток якоря: со стороны входа воздуха они охлаждаются более интенсивно, чем с противоположной стороны. Разница превышений температур отдельных обмоток составляет 12–32 %. Теоретическими исследованиями и расчетами установлено, что по длине машины обмотки нагреваются неравномерно, имея максимальную температуру на выходе воздуха.

На рис. 1 приведены кривые превышений температур обмоток якорей, полученные на ЭВМ, для ТД НБ-418К6 мощностью 740 кВт с закрытыми головками и ТД НБ-514 мощностью 780 кВт с открытыми головками секций. Здесь же показаны кривые превышений температур якорей этих двигателей при условии взаимного изменения их токов нагрузки [1].

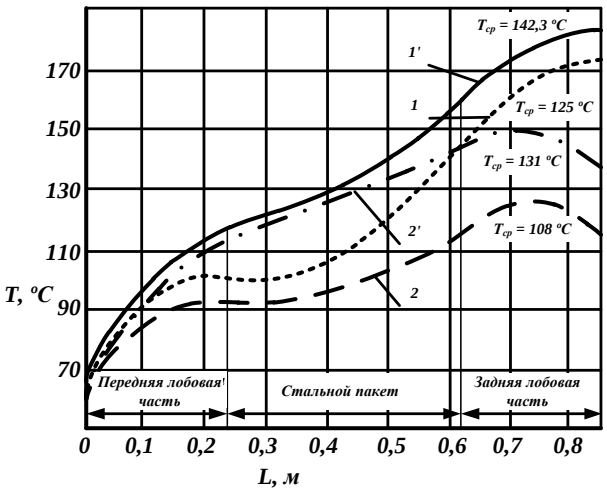


Рис. 1. Зависимости превышений температуры обмоток якорей ТД НБ-418К6 с закрытыми (1 – при Рч = 790 кВт и 1' – при Рч = 835 кВт) и НБ-514 с открытыми головками катушек (2 и 2' – при тех же мощностях)

Из анализа этих кривых очевидно, что, во-первых, закрытие головок секций керамикой у двигателей НБ418К6 приводит к недопустимым нагревам изоляции лобовой части обмотки со стороны, противоположной коллектору, во-вторых, раскрытие головок секций позволяет при прочих равных условиях не только снизить нагрев обмотки в районе головок секций, но и существенно повысить мощность машины либо снизить общий нагрев обмотки, повысив срок службы изоляции. Тенденция изготовления ТД с открытыми головками секций наблюдается во всем мире. Однако расположение входного и выходного патрубков в одной плоскости оказывает значительное влияние на неравномерность не только теплообмена, но и массообмена.

На рис. 2 приведена вентиляционная система тягового двигателя, из которой следует, что наибольшая концентрация влаги будет иметь место на задней лобовой части обмотки якоря. Эта концентрация выше у тяговых двигателей с подшипниковыми щитами без выходных вентиляционных отверстий, то есть проблема локального перегрева и переувлажнения изоляции по лобовой части обмотки якоря, расположенной со стороны, противоположной коллектору, остается.

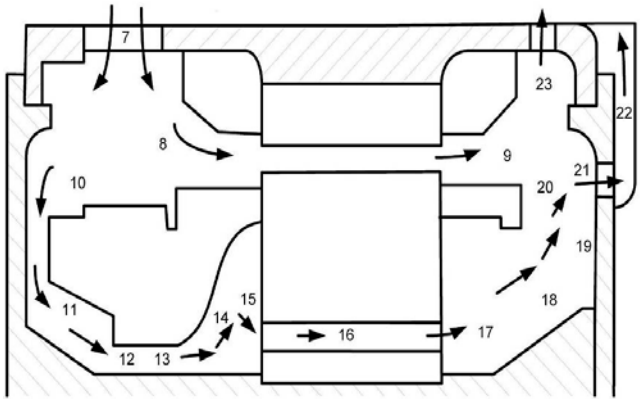


Рис. 2. Вентиляционная система тягового двигателя

Это было выявлено в ходе анализа частости отказов якорей двигателей по ремонтному локомотивному депо Нижнеудинск (ТЧР-22), который показал, что более высокую надежность изоляционных конструкций имеет якорь двигателя НБ-418К6 с закрытыми головками секций в сравнении с якорем двигателя НБ-514 с открытыми головками секций. Если на ТД первого типа пробои изоляции и разбандажировки составляют 35,8 %, то на аналогичные повреждения ТД второго типа приходится 92,5 %. На основании экспертных оценок высококвалифицированных специалистов депо ТЧР-22 и Улан-Удэнского ЛВРЗ (У-У ЛВРЗ) по выявлению характера и причин отказов изоляционных конструкций якоря двигателя НБ-514 было установлено, что наиболее часто наблюдаются пробои изоляции якоря по задней лобовой части в месте касания задней прижимной шайбы с обмоткой.

Так, например, при отбраковке якорей двигателя НБ-514 на У-У ЛВРЗ в 2005 году из 123 машин 15 машин были забракованы по пробою изоляции якоря по задней лобовой части. В 2006 году из 120 машин по этой причине было забраковано 56 машин (46,6 %), в 2007 году из 144 машин забраковано 19 машин, в 2008 году (за десять месяцев) из 122 машин забракована 21 машина. Это указывает на то, что влагостойкость изоляции

обмотки якоря двигателя НБ-514 при таком конструктивном исполнении оказалась ниже, чем у двигателя НБ-418К6. В настоящее время при создании коллекторных ТД для электровозов серии «Ермак» предпринят ряд конструкционных решений по повышению надежности изоляции лобовых частей якоря. Но проблема надежности тяговых и вспомогательных электрических машин тягового подвижного состава будет обостряться из-за более низкой надежности изоляции лобовых частей асинхронных тяговых и вспомогательных электродвигателей по сравнению с пазовой изоляцией. Более низкая надежность изоляции лобовых частей обмоток электрических машин обусловлена комплексом факторов механической, электромагнитной и тепломассообменной природы. Недостаточно надежное крепление лобовых частей обмотки, например, создает условия для повреждения изоляции преимущественно у выхода стержней из пазов. Лобовые части обмоток крупных ТД наибольшей опасности подвергаются при переходных процессах. Большие ударные токи могут вызвать разрывы бандажей, деформацию частей обмотки, появление трещин и вмятин в изоляции. В процессе эксплуатации отмечаются также пробои изоляции вследствие попадания на лобовые части смазки, влаги и других агрессивных материалов.

На рис. 3 приведен фрагмент локального повреждения изоляции на лобовой части обмотки якоря ТД НБ-514 со стороны, противоположной коллектору, а на рис. 4 – фрагмент магнитной системы остова ТД после случая возгорания изоляции по причине ее пробоя.

Рис. 3. Фрагмент поврежденной изоляции на лобовой части обмотки якоря ТД НБ-514

В таких случаях наиболее целесообразным и эффективным будет метод продления ресурса изоляции путем капсулирования локального повреждения с использованием пропиточных материалов и теплового излучения.

Рис. 4. Фрагмент поврежденной изоляции магнитной системы остова ТД

На рис. 5 приведен фрагмент по выгоранию лобовой части обмоток статоров асинхронных вспомогательных машин (АВМ) электровозов переменного тока эксплуатируемых на железных дорогах Восточных регионов.

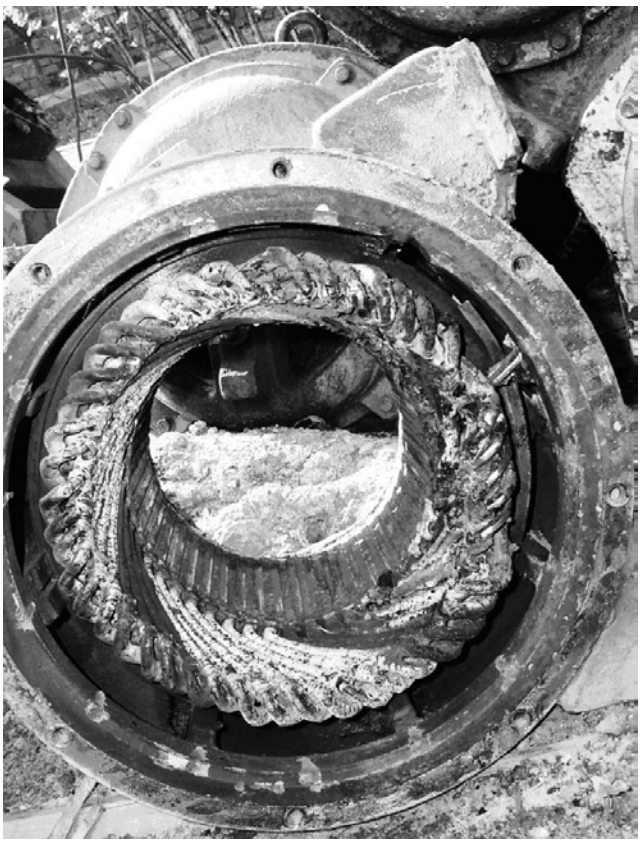


Рис. 5. Фрагмент поврежденной изоляции на лобовой части обмотки статора асинхронной вспомогательной машины

Статистика и экспертная оценка показывают, что доля отказов по изоляции лобовой части обмоток статора АВМ составляет в разные годы от 50 до 60 %. Такая статистика может быть получена и при эксплуатации тяговых асинхронных

электродвигателей типа НТА 1200 с открытыми головками лобовых частей обмотки статора, если не принимать более современных методов и средств по повышению ресурса изоляции лобовых частей обмоток тяговых электрических машин. Повышение ресурса изоляции обмоток путем капсулирования с использованием теплового излучения наиболее эффективно при производстве и крупных ремонтах тяговых электрических машин и аппаратов.

Причины резкого увеличения параметра потока пробоев изоляции якорей двигателей НБ-514 были отражены в работах А.М. Худоногова и В.П. Смирнова. В этих работах отмечалось, что из-за низкой влагостойкости изоляции лобовой части обмотки якоря со стороны, противоположной коллектору, конструкционных и эксплуатационных факторов, отсутствия систем по нормализации изоляционных конструкций в период с 1999 по 2002 годы произошел резкий рост отказов якорей ТД, в основном по пробою изоляции в лобовой части со стороны, противоположной коллектору. Скачок был обусловлен условиями эксплуатации электровозов ВЛ85 на участке Тайшет Таксимо (северный ход) и низкой влагостойкостью изоляции якоря двигателя НБ-514. В летний период 2001 года руководством локомотивного депо было принято решение о дополнительной пропитке и последующей сушке изоляции лобовых частей обмоток якоря со стороны противоположной коллектору. Эти операции осуществлялись по стандартной методике. Она заключается в периодической пропитке и сушке задней лобовой части якорной обмотки. Операции по пропитке лобовой части якорной обмотки осуществляются методом окунания ее в емкость с пропиточным составом. Операции по сушке лобовой части якорной обмотки осуществляются в стандартных конвекционных печах путем нагрева всей части якоря… Также в условиях депо и заводских условиях для ликвидации локального отказа была предложена следующая технология. С помощью испытательных станций определялась точка локального пробоя на лобовой части якоря. Слесарь по ремонту с помощью эпоксидных материалов ликвидировал этот отказ, и якорь поступал в эксплуатацию без перемотки обмотки. В результате введения этих технологий количество отказов по ТД типа НБ-514 было снижено более чем в 1,7 раза. Факт уменьшения отказов в результате дополнительной пропитки и сушки якорей был подтвержден актами и отчетами.

Такие технологии повышения ресурса изоляции ТД при изготовлении, средних и капитальных ремонтах не только энергозатратны, но и ресурсозатратны.

В настоящее время при деповском ремонте для сушки пропитанной или увлажненной изоляции ТД используют конвективные электрические печи мощностью 80 кВт.

По технологии в депо при ремонте сушку изоляции проводят в два этапа. Первый этап – перед пропиткой лаком, при этом время сушки занимает десять часов, второй – после пропитки, когда время сушки составляет уже пятнадцать часов. Если же изоляция ТД не нуждается в пропитке, единожды производят десятичасовую сушку. Такая технология сушки является малоэффективной, ресурсоемкой, длительной и энергозатратной.

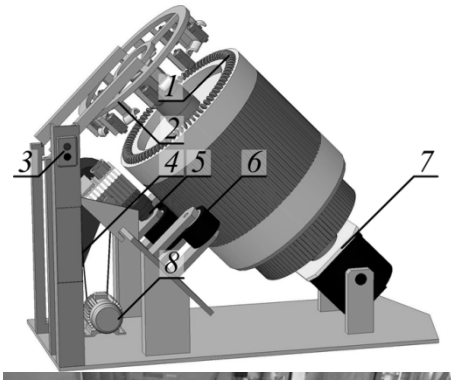
Для обеспечения высокой термо- и влагостойкости, стабильной теплопроводности и повышения срока службы изоляции электрических машин с открытыми головками секций предлагаются новый ресурсосберегающий локальный метод и средства капсулирования пропиточными материалами изоляции лобовых частей обмоток с использованием управляемого электромагнитного излучения инфракрасного (ИК) диапазона [2]. Рациональный режим термообработки при максимальном значении критерия количественной и качественной оценки эффективности работы облучателя может быть осуществлен только в случае применения спектрально-осциллирующего режима энергоподвода с чередованием средневолнового и коротковолнового ИК-излучения.

Конструктивная схема установки для капсулирования изоляции обмоток якорей ТД типа НБ-514 при осциллирующем ИК-энергоподводе показана на рис. 6, *а*.

По предложенной схеме установка состоит из двух основных узлов. Первым узлом является станина с пристроенным частотно-регулируемым асинхронным электродвигателем с редуктором. Она предназначена для размещения, фиксации и обеспечения плавного вращательного движения якоря 1 в широком диапазоне скоростей с установленной мощностью 2,2 кВт. Второй узел – это передвижной сменный распылитель-облучатель 2. Он состоит из девяти импульсных керамических преобразователей излучения с установленной мощностью 4,5 кВт и девяти автоматических пневматических распылителей высокого давления. Размещение и фиксация якоря на станине осуществляются при помощи приводно-опорного и опорных резиновых роликов 6 и задней буксы 7.

Частотно-регулируемый привод предназначен для придания якорю ТД плавного вращательного движения в широком диапазоне скоростей. Он состоит: из магнитного пускателя и преобразователя частоты (они расположены в шкафу управления 3); асинхронного трехфазного короткозамкнутого двигателя 8; клиноременной передачи 4. Резиновые ролики соединены с асинхронным двигателем с помощью муфты 5.

а)



б)

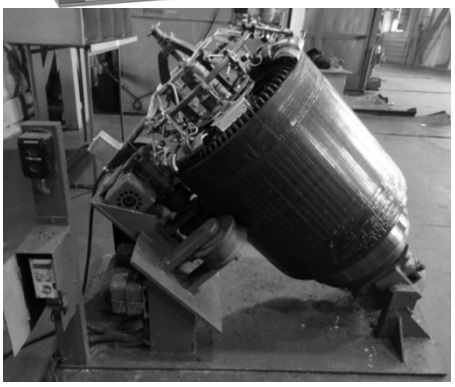


Рис. 6. Конструктивная схема (а) и опытно-промышленная установка (б) для реализации эффективной технологии капсулирования изоляции лобовой части обмотки якоря при осциллирующем ИК-энергоподводе: 1 – якорь; 2 – передвижной сменный распылитель-облучатель; 3 – шкаф управления; 4 – клиноременная передача; 5 – муфта; 6 – опорные резиновые ролики; 7 – задняя букса; 8 – асинхронный трехфазный двигатель

В результате применения локального нагрева ИК-излучением в пропитанной электроизоляционным лаком изоляции лобовой части обмотки якоря происходит капсулирование, значительно повышаются надежность и защита ТД от действия внешних факторов.

Локальный нагрев ИК-излучением позволяет сократить в 7–10 раз расход электроэнергии и в 10–12 раз – время на технологические операции пропитки и сушки якорей ТД.

В настоящее время ведутся работы по автоматизации данной технологии посредством не только регулирования скорости вращения якоря в зависимости от частоты питающего напряжения, но и изменения спектрального состава ИК-излучателей, тем самым получая систему, автоматизированную по двум параметрам.

На базе депо Нижнеудинск была реализована опытно-промышленная установка по капсулированию изоляции лобовой части обмотки якоря ТД, изготовленная по патенту РФ (рис. 6, *б*). Эксперименты на данной установке проводились на якорях, успешно эксплуатирующихся в дальнейшем на Восточно-Сибирской дороге без дальнейших повреждений, связанных с их изоляцией.

По аналогии с данной установкой на основе этой же технологии на базе моторвагонного депо ст. Иркутск-Сортировочный была спроектирована и реализована опытно-промышленная установка по капсулированию изоляции лобовых частей обмоток статоров асинхронных вспомогательных машин (АВМ), приведенной на рис. 7.

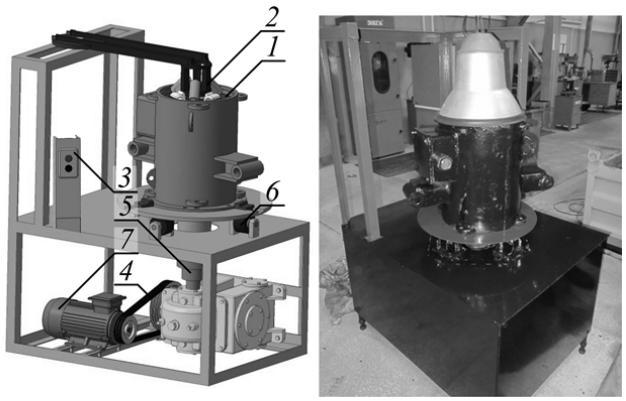


Рис. 7. Конструктивная схема и опытно-промышленная установка для реализации эффективной технологии капсулирования изоляции лобовой части обмотки статора АВМ: 1 – лобовая часть статора; 2 – распылитель-облучатель с ИК-излучателями; 3 – пульт управления; 4 – клиноременная передача; 5 – муфта; 6 – опорные резиновые ролики; 7 – асинхронный трехфазный двигатель

Также с целью повышения надежности и продления ресурса ТД была спроектирована установка для сушки увлажненной или пропитанной изоляции обмоток магнитной системы остовов комбинированным ИК-конвективно-вакуумным способом (рис. 8).

По схеме остов ТД 1 помещается на основание 3, в которое монтируется стойка 2 с ИК-излучателями. Далее основание приводится во вращение частотно-регулируемым асинхронным двигателем 6 через редуктор 5 и ведущий опорный ролик 4.

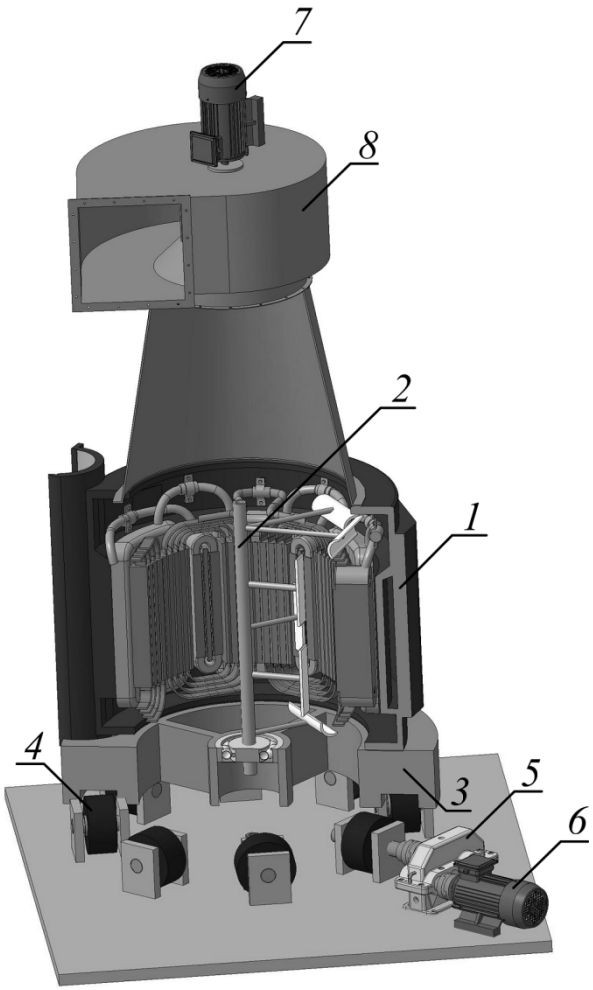


Рис. 8. Конструктивная схема установки для сушки изоляции обмоток магнитной системы остова ТД комбинированным способом: 1 – остов ТД; 2 – стойка с ИК-излучателями; 3 – основание; 4 – приводно-опорный и опорные резиновые ролики; 5 – редуктор; 6 – привод основания; 7 – привод вентилятора; 8 – вентилятор

ИК-излучатели обеспечивают интенсивность теплопередачи. Воздушный поток, создаваемый вентилятором 8 и асинхронным двигателем 9, равномерно распределяет температуру по всей толщине слоя изоляции. Ударное действие потока воздуха обусловливает интенсивный отрыв частиц влаги от твердой фазы и вынос их за пределы зоны сушки.

Это, в свою очередь, является источником непрерывных возмущений в ламинарном слое, то есть турбулизации, а также уменьшает поглощение потока излучения слоем водяных паров у поверхности изоляции и в промежуточной зоне. И, наконец, при такой схеме работы элемента вентиляции в зоне обработки изоляции создается отрицательное давление (вакуумная сушка), сопутствующее понижению температуры и скорости нагрева изоляции без снижения интенсивности ИК-энергоподвода и влагоотдачи.

Данные технологии применимы и к пропитанной (увлажненной) изоляции электрических аппаратов тягового подвижного состава.

Внедрение данной инновационной технологии повышения надежности и продления ресурса электрических машин и аппаратов тягового подвижного состава позволит существенно уменьшить материальные затраты, необходимые для их ремонта в связи со значительным сокращением времени и снижением потребления электроэнергии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лыткина Е. М. Повышение эффективности капсулирования изоляции лобовых частей обмоток тяговых двигателей электровозов инфракрасным излучением : дис. … канд. техн. наук. Иркутск, 2011. 205с.
2. Пат. 2396669 Российской Федерации. МПК H02K 15/12. Локальный способ герметизации компаундом изоляции лобовых частей обмоток тяговых электрических машин / А. М. Худоногов, И. А. Худоногов, В. Н. Иванов, Н. Г. Ильичев, Д. А. Оленцевич, В. В. Сидоров, Е. М. Лыткина; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Иркутский государственный университет путей сообщения». № 2009117049/28; заявл. 04.05.2009; опубл. 10.08.2010, Бюл. № 22.

УДК 621.311

Спирин Евгений Анатольевич,
ассистент кафедры «Проектирование и экспериментальная механика машин»
политехнического института Сибирского федерального университета,
тел. 8-908-010-48-95, e-mail: Spirin-Evgeniy@yandex.ru
Никитин Александр Анатольевич,
к. т. н., доцент, профессор кафедры «Технологические машины
и оборудование» политехнического института Сибирского федерального университета,
тел. (391) 249-73-60, e-mail: aannikitin@yandex.ru
Головин Михаил Петрович,
к. т. н., доцент, заведующий кафедрой «Проектирование
и экспериментальная механика машин» политехнического института
Сибирского федерального университета.
тел. (391) 240–12-52, e-mail: mpgolovin@gmail.com
Встовский Алексей Львович,
к. т. н., доцент, профессор кафедры «Электротехнические комплексы
и системы» политехнического института Сибирского федерального университета,
тел. (391) 227 57 12, e-mail: val_1942@mail.ru

О ВЫБОРЕ ТИПА МИКРОГЭС И ЕЕ ОПТИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

E.A. Spirin, A.A. Nikitin, M.P. Golovin, A.L. Vstovsky

ON SELECTION HYDROELECTRIC MICRO PLANTS TYPE AND ITS OPTIMAL POWER IN CONNECTION WITH HYDROLOGICAL PARAMETERS

Аннотация. *В статье изложен метод выбора типа микроГЭС, основанный на оценке ее эффективности. Выполнен сравнительный анализ применения различных типов микроГЭС в возможных гидрологических условиях.*

Ключевые слова: *микроГЭС, гидроэнергетика, торцевой генератор, ортогональная турбина.*

Abstract. *The article describes the method of selecting the type of micro hydropower plants based on an assessment of its effectiveness. A comparative analysis of different types of micro hydro potential in hydrological conditions is made.*

Keywords: *frontal generator, orthogonal turbine, micro hydro.*

Предметом статьи является анализ возможности и эффективности использования микроГЭС (до 100 кВт) и миниГЭС (до 5 МВт), реализуемых в виде тех или иных инженерных решений. С их помощью можно обеспечить электроэнергией население отдаленных и горных районов, а также фермерские хозяйства. Это значительно дешевле и выгоднее, чем строительство линий электропередач или эксплуатация дизельных установок [1]. Эти гидроэлектростанции в зависимости от способа использования водной энергии разделяют на плотинные, деривационные и свободнопоточные.

В плотинных ГЭС концентрация напора воды создается посредством установки плотины, полностью перегораживающей реку и поднимающей уровень воды в ней на необходимую отметку. Основными достоинствами плотинных ГЭС являются: возможность регулирования объемов выработки электроэнергии и высокая стабильность работы, достигаемая за счет накопления воды в водохранилище. К недостаткам такого типа ГЭС можно отнести: высокую стоимость гидротехнических сооружений, затопление и выведение из хозяйственной деятельности больших площадей, значительный экологический ущерб.

Деривационная безнапорная ГЭС использует часть расхода реки, источник ее потенциальной энергии – только перепад высот в рукаве [2]. Этот тип ГЭС применяют при больших уклонах реки и сравнительно малых используемых расходах, главным образом в горных условиях. Они рассчитаны на небольшие мощности энергоустановок. Этот тип микроГЭС широко используется во многих странах мира, имеющих отмеченные выше условия, обеспечивая лучшие экологические условия.

В ГЭС с напорной деривацией используют как перепад высот в деривационном рукаве, так и

небольшой подпор, создаваемый плотиной, в которую забирают значительную долю расхода реки.

Оба типа деривационных ГЭС, как правило, дешевле плотинных, но имеют все недостатки, присущие последним, хотя и в меньшей степени.

Свободнопоточные ГЭС используют кинетическую энергию потока реки. Погружные микроГЭС круглогодичного действия удобны для небольших поселков, геологических партий и фермерских хозяйств. Они с успехом могли бы работать параллельно с дизельными электростанциями, существенно сокращая расход дизельного топлива или заменяя последние в случае аварии. Турбина свободнопоточных микроГЭС, в зависимости от скорости реки и мощности установки, вращается со скоростью 80200 об./мин. Свободнопоточные погружные микроГЭС наиболее экономичны и мобильны, не требуют земляных работ.

Рассмотрим влияние основных характеристик ГЭС различных типов на их эффективность. Исходными данными для проектирования микроГЭС являются: характеристика потребителя (график изменения потребляемой мощности в течение года, по месяцам, в течение суток; перспективный рост потребляемой мощности) и характеристика реки (изменение расхода по годам, в течение года, по месяцам, в течение суток; уклон реки). При обработке данных, описывающих динамику потребления, рассчитывается максимальное потребное значение мощности электростанции.

Мощность гидроэлектростанции зависит от параметров водного потока реки, характеристик станции и ее энергоустановок [3]:

$$N_{ГЭС} = n_{эу} \cdot \rho \cdot g \cdot Q_p \cdot K_Q \cdot H \cdot \eta_{эу}, \qquad (1)$$

где $N_{ГЭС}$ – установленная мощность гидроэлектростанции; $n_{эу}$ – количество энергоустановок; ρ – плотность воды; g – ускорение свободного падения; Q_p – расчетный расход реки; K_Q – коэффициент расхода (отношение расхода воды Q, проходящего через ГЭС, к расчетному расходу реки Q_p), для плотинной ГЭС коэффициент расхода равен единице, а для деривационной значительно меньше единицы; H – полезный напор (напор нетто); $\eta_{эу}$ – КПД энергоустановки.

Если значение установленной мощности ГЭС и расчетный расход реки определены, то следующим этапом будет выбор энергоагрегата.

В зависимости от требуемой мощности и расхода реки возможны множества решений, реализующих выработку требуемого объема электроэнергии, что достигается за счет вариации типов и количества устанавливаемых энергоагрегатов. Выбор оптимального количества энергоагрегатов и их типов можно свести к решению задачи оптимизации. Общепринятым показателем, характеризующим экономическую целесообразность того или иного решения при проектировании микроГЭС, является стоимость одного киловатта устанавливаемой мощности, и наиболее эффективное решение соответствует минимальному значению этого показателя:

$$C_{кВт} = \frac{C_\Sigma}{N_{ГЭС}} \to min, \qquad (2)$$

где $C_{кВт}$ – стоимость 1 кВт устанавливаемой мощности; C_Σ – суммарные капиталовложения, затраченные на изготовление, доставку и установку микроГЭС; $N_{ГЭС}$ – суммарная мощность микроГЭС.

Суммарные капиталовложения C_Σ можно описать в виде конечной суммы произведений стоимостных показателей на весовые коэффициенты:

$$C_\Sigma = \sum_{p=1}^{n} \left(c_p \cdot q_p \right), \qquad (3)$$

где p – номер соответствующего показателя; n – количество показателей, характеризующих стоимость микроГЭС; c_p – удельная стоимость p-го показателя; q_p – весовой коэффициент p-го показателя.

Модель эффективного применения деривационной ГЭС

Стоимость деривационной микроГЭС в основном определяется стоимостью ее гидроагрегатов и деривации. В этом случае, согласно формуле (3), стоимость деривационной микроГЭС можно описать следующим образом:

$$C_{Д\_ГЭС} = c_1(q_1) \cdot q_1 \cdot n_{эу} + c_2(D,M) \cdot q_2,$$

или

$$C_{Д\_ГЭС} = CN(N_{ga}, N_g) + c_L(N_g, i), \qquad (4)$$

где $c_1(q_1)$ – стоимость 1 кВт мощности энергоблока; q_1 – номинальная мощность энергоблока (кВт); $n_{эу}$ – количество энергоблоков; $c_2(D,M)$ – стоимость 1 метра трубопровода (зависит от диаметра и материала); q_2 – длина трубопровода в метрах; $c_L(N_g,\mathrm{i})$ – суммарная стоимость деривации (зависит от установленной мощности ГЭС и уклона местности).

Выбор параметров трубопровода является задачей оптимизацией. В качестве целевой функции можно использовать зависимость стоимости деривационного трубопровода от длины, диаметра и материала трубопровода, а также от затрат на доставку, монтаж, эксплуатацию и др. Задачу оптимизации можно сформулировать следующим образом: найти оптимальные значения диаметра и длины деривационного трубопровода, при которых выполняется уравнение (2) и целевая функция достигает минимума:

$$C_{TP} = f(d, L, материал) \to min, \qquad (5)$$

где d – диаметр трубопровода; L – длина трубопровода; $C_{тр}$ – стоимость трубопровода длиной L и диаметром d, изготовленного из данного материала, с учетом доставки, монтажа и эксплуатации.

Связь между длиной, диаметром трубопровода и полезным напором H можно найти из уравнения Бернулли, записанного для сечений 00 и 22 и сечений 33 и 44 (рис. 1):

$$H = Li + \Delta z_{0-1} + \Delta z_{2-4} - (\xi_{вз} + \lambda\frac{L}{d} + \xi_{з} + \xi_{отв})\frac{8Q^2}{g\pi^2 d^4}, \qquad (6)$$

где H – полезный напор:

$$H = \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 \upsilon_2^2}{2g}\right) - \left(z_3 + \frac{p_3}{\rho g} + \frac{\alpha_3 \upsilon_3^2}{2g}\right). \qquad (7)$$

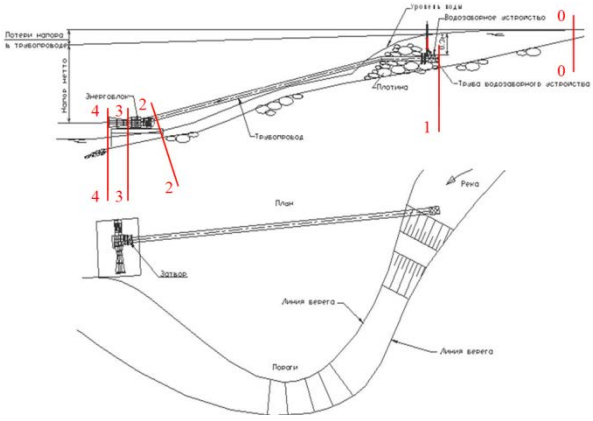


Рис. 1. Установка микроГЭС по плотинно-деривационной схеме

При выбранной мощности энергоагрегата напор и расход будут постоянными величинами, в этом случае уравнение (6) будет иметь бесконечное множество решений (d_i и L_i). Из этого множества можно найти оптимальные значения диаметра и длины деривационного трубопровода, обеспечивающие минимум целевой функции (5).

Выполнив задачу оптимизации по целевой функции (5) при разных значениях напора, расхода и коэффициента расхода и выбрав среди полученных результатов вариант с наименьшей стоимостью, получим решение задачи оптимизации для всей микроГЭС, а варьируя значение среднего уклона, можно выбрать участок реки для расположения микроГЭС.

Задачу оптимизации для всей деривационной микроГЭС можно записать в следующем виде:

$$\begin{cases} C_{Д\_ГЭС} = f(d, L, C_i^m, H, K_Q, i, n_{эу}) \to min; \\ N_{ГЭС} = n_{эу} \cdot \rho \cdot g \cdot Q_p \cdot K_Q \cdot H \cdot \eta_{эу}; \\ H = Li + \Delta z_{0-1} + \Delta z_{2-4} - \\ -(\xi_{вз} + \lambda\frac{L}{d} + \xi_{з} + \xi_{отв})\frac{8Q^2}{g\pi^2 d^4}. \end{cases} \qquad (8)$$

Для решения задачи, описанной системой уравнений (8), разработан алгоритм и его программная реализация.

Стоимость 1 кВт установленной мощности деривационной микроГЭС от суммарной мощности рассчитана для рек энергодефицитных районов Красноярского края по данным Среднесибирского регионального управления гидрометслужбы РФ и приведена на рис. 2.

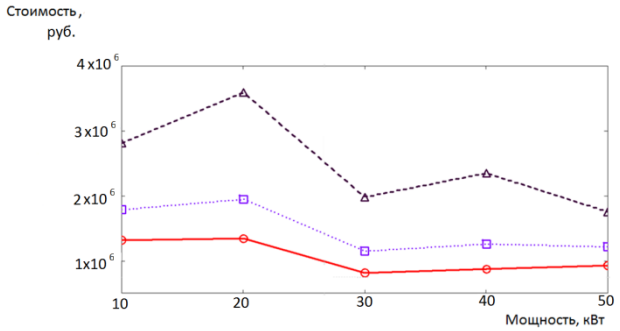


Рис. 2. Стоимость 1 кВт установленной мощности деривационной микроГЭС при: – уклоне 0,5 %; – уклоне 0,4 %; – уклоне 0,3 %

Основную долю стоимости деривационных микроГЭС составляет цена деривационного рукава, требующего для обеспечения напора большой длины из-за малого уклона. Из графиков видно, что существенное влияние на стоимость 1 кВт установленной мощности оказывает уклон местности. С увеличением мощности микроГЭС стоимость ее 1 кВт снижается, что обеспечивает широкий поиск наиболее эффективного варианта.

Модель эффективного применения плотинной ГЭС

Основная часть стоимости плотинной ГЭС состоит из стоимостей гидроагрегатов, плотины, экологического ущерба от затопления земель. Тогда согласно формуле (3), стоимость плотинной ГЭС можно описать следующим образом:

$$C_{П\_ГЭС} = c_1 \cdot q_1 + c_2 \cdot q_1 + c_3 \cdot q_3, \qquad (9)$$

где c_1 – стоимость 1 кВт мощности энергоблока; q_1 – количество киловатт устанавливаемой мощ-

ности; c_2 – стоимость строительства плотины, отнесенная к 1 кВт; c_3 – стоимость одного квадратного метра затопленных земель; q_3 – площадь затопления.

Стоимость 1 кВт мощности энергоблока c_1 описана с помощью полиномиальной зависимости. Стоимость плотины на один киловатт мощности также можно описать в виде функции:

$$c_2 = f\left(q_1\right) \cdot k_{рельефа}, \qquad (10)$$

где $k_{рельефа}$ – коэффициент, учитывающий рельеф местности и ее геологические особенности.

Стоимость одного квадратного метра затопленных земель так же является функцией множества параметров:

$$c_3 = f\left(M\right), \qquad (11)$$

где M – вектор множества параметров, зависящих от местности, на которой возводится плотина, суммарной мощности установленных агрегатов и т.п.

Площадь затопления q_3 зависит от рельефа местности, напора, расхода реки и т. д.:

$$q_3 = f\left(M\right). \qquad (12)$$

Мы видим, что величины, влияющие на стоимость плотинной ГЭС, описаны функционалами, зависящими от множества параметров M, и для решения задачи оптимизации могут быть применены одни из методов вариационного исчисления или динамического программирования.

Так как плотинные ГЭС обычно применяют для больших мощностей и стоимость каждой плотины зависит от местных условий, то для эффективного применения данной методики необходим целый ряд сведений и материалов, характеризующих условия строительства. Эти данные получают в результате изысканий и сбора необходимых материалов и сведений, освещающих следующие вопросы:

а) рельеф, растительность, существующие сооружения, населенные пункты и прочие объекты на водосборе и вблизи строительства будущей станции; эти сведения получают топографическими изысканиями;

б) режим русла и водный режим реки; эти сведения получают гидрологическими изысканиями;

в) характер грунтов и подземных вод в основании будущих сооружений, наличие местных строительных материалов; эти сведения дают геологические изыскания;

г) экономика района (наличие рабочей силы, механизмов, энергии, возможности сбыта электроэнергии, дорожной сети и т. д.); экономические сведения собирают при экономическом обследовании района строительства.

Модель эффективного применения свободнопоточных ГЭС

Основными компонентами свободнопоточной ГЭС являются: генератор, турбина, передаточный механизм, несущая конструкция, система автоматического регулирования, защитное устройство [4]. Следовательно, стоимость свободнопоточной ГЭС можно записать в виде формулы:

$$C_{C\_ГЭС} = c_1 \cdot q_1 + c_2 \cdot q_2 + c_3 \cdot q_1 + c_4 \cdot q_2, \qquad (13)$$

где c_1 – стоимость 1 кВт мощности генератора; q_1 – количество киловатт устанавливаемой мощности; c_2 – стоимость 1 квадратного метра площади сечения турбины в плоскости, нормальной к набегающему потоку (площадь сечения турбины); q_2 – площадь сечения турбины; c_3 – стоимость передаточного механизма в расчете на 1 кВт; c_4 – стоимость несущей конструкции в расчете на единицу площади сечения турбины.

Оптимизация решений, связанных с использованием свободнопоточной микроГЭС, является комплексной задачей, сочетающей в себе оптимизацию как отдельных микроГЭС, так и применения каскада таких установок.

Стоимость свободнопоточной микроГЭС или их каскада можно описать формулой

$$\begin{aligned} C_{C_{ГЭС}}\left(n_{турб}, U, P_{ГЭС}, \vartheta\right) &= C^{1кВт}_{Генер}\left(P_{ГЭС}, n_{турб}U\right) \times \\ \times P_{ГЭС} \cdot k &+ C_{ПМ}\left(P_{ГЭС}, n_{турб}\right) \cdot k + \\ + C_{турб}\left(P_{ГЭС}, \vartheta\right) \cdot k &+ C_{осн}\left(P_{ГЭС}, \vartheta\right) \cdot k, \end{aligned} \qquad (14)$$

где $n_{турб}$ – частота вращения ротора турбины; U – передаточное число редуктора; ϑ – скорость реки; $P_{ГЭС}$ – суммарная мощность электростанции; $C^{1кВт}_{Генер}$ – функция стоимости генератора в расчете на 1 кВт; $C_{ПМ}$ – функция стоимости редуктора; $C_{турб}$ – функция стоимости турбины; $C_{осн}$ – функция стоимости несущей конструкции; k – количество микроГЭС.

Результатом вычисления значений функции (14) будет облако точек, соответствующих решениям, обеспечивающим заданную мощность различными вариантами микроГЭС. Параметры генераторов с пониженной частотой вращения, производимых фирмой ВИНДЭК [5], приведены в табл. 1.

Заданная мощность микроГЭС может быть реализована использованием нескольких установок с выбором из дискретных значений параметров генераторов и турбин, что позволяет найти оптимальное решение.

Таблица 1

Параметры генераторов

	ВГБЖ-0,15/200	ВГБЖ-02/200	ВГ-0,5/650	ВГБЖ-0,8/600	ВГ-1/450	ВГБЖ-1,5/600	ВГ-5/150	ВГ-10/300	ГП-15/140
Мощность, Вт	150	200	500	800	1000	1500	5000	10000	15000
Частота вращения, об./мин	200	200	650	600	450	600	150	300	140
КПД	0,75	0,9	0,7	0,8	0,9	0,85	0,85	0,85	0,85
Масса, кг	13	10	11	14	19	16	120	200	495
Стоимость, тыс. руб.	25,2	25,2	12,6	30	14,4	36	156	168	360

Так, мощность 10 кВт можно реализовать одним генератором, либо двумя мощностью по 5 кВт, либо одним генератором мощностью 12 кВт с загрузкой его на 84 %. Для решения такой задачи функцию (14) необходимо дополнить функцией-фильтром, зависящей от коэффициента загрузки генератора.

На рисунке 3 изображен результат работы такой функции-фильтра для задачи, в которой необходимо определить возможные решения при обеспечении требуемой мощности 10 кВт, используя генераторы, приведенные в табл. 1, при условии, что каждый генератор должен работать с нагрузкой не ниже 80 % номинальной.

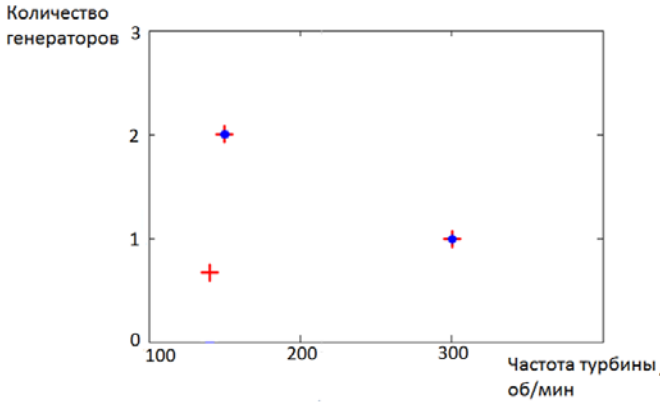


Рис. 3. Коллекция решений, как результат применения функции-фильтра:

– удовлетворяет условию по загрузке;

– не удовлетворяет условию по загрузке

Из рис. 3 следует, что 10 кВт можно обеспечить двумя генераторами, мощностью по 5 кВт с частотой вращения 150 об./мин, либо одним генератором мощностью 10 кВт с частотой вращения 300 об/мин. Генератор мощностью 15 кВт с частотой вращения 140 об./мин загружен на 66 %, что неэффективно и не соответствует сформулированным ранее требованиям.

Рассмотрим результаты решения уравнения (14), приведенные на рис. 4, с позиций стоимости свободнопоточных микроГЭС мощностью 10 кВт, работающих при скорости реки 1,6 м/с и не имеющих в своей конструкции редуктора.

Поиск оптимального решения сводится к выбору микроГЭС с минимальной стоимостью и номинальной частотой вращения генератора, максимально близкой к частоте вращения турбины [6].

В данном случае минимальная стоимость решения соответствует микроГЭС, имеющей генератор с частотой вращения 300 об/мин (мощность 10 кВт), но применение такого генератора может быть ограничено оптимальной частотой вращения турбины.

Следующим возможным решением является применение двух микроГЭС с генераторами мощностью 5 кВт и частотой вращения 150 об/мин.

Вариант решения, выделенный меньшим знаком, не подходит по критерию 80 % минимальной загрузки генератора (140 об/мин, 15 кВт).

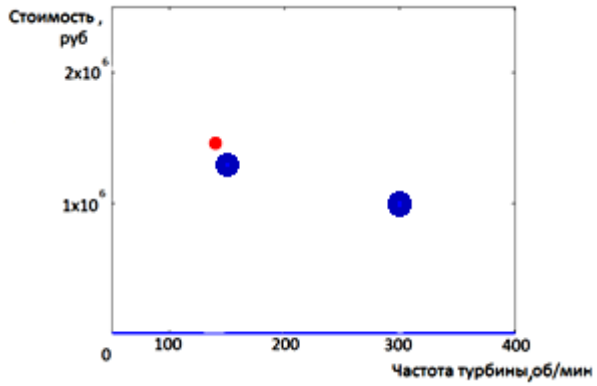


Рис. 4. Стоимость различных вариантов микроГЭС:

– недогруженный генератор,

– удовлетворяющий условию по загрузке

Использование передаточного механизма (с передаточным числом 2) позволит сдвинуть оптимальное решение ближе к номинальной частоте вращения турбины (150 об./мин, рис. 5), при этом стоимость редуктора составит не более 10 % от стоимости микроГЭС.

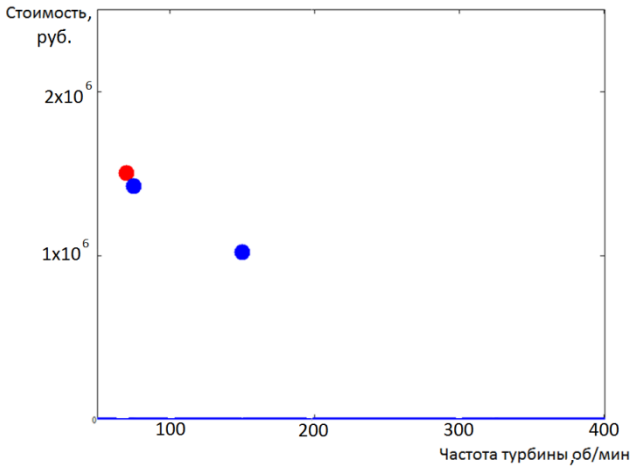


Рис. 5. Стоимость различных вариантов микроГЭС при включении редуктора в конструкцию

Рассмотрев все возможные решения в диапазоне до 50 кВт при заданной матрице параметров генераторов (табл. 1) и выделив оптимальные из них, построим график зависимости стоимости свободнопоточной микроГЭС от установленной мощности (рис. 6).

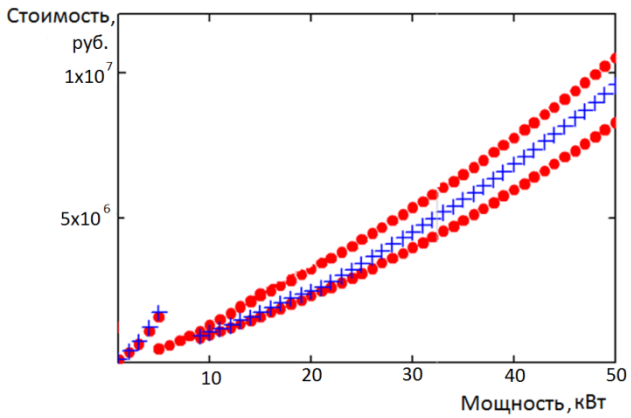


Рис. 6. Стоимость оптимальных вариантов микроГЭС в зависимости от мощности:
● – без применения редуктора;
+ – с применением редуктора

Как показали исследования модели, стоимость микроГЭС зависит от параметров генераторов, а также целесообразности применения в ряде случаев редукторов.

Если требуется обеспечить мощность 50 кВт (рис. 7) то, согласно модели, наиболее выгодный вариант будет стоить 8 млн руб. (с учетом вышеприведенных параметров компонентов МГЭС), а соответствующий этому решению генератор мощностью 10 кВт имеет номинальную частоту вращения 300 об/мин (табл. 1).

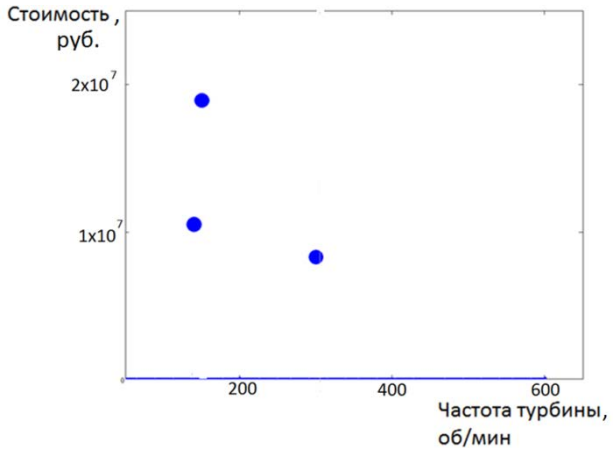


Рис. 7. Стоимость наилучших вариантов микроГЭС суммарной мощностью 50 кВт

Возможно применение варианта с использованием редукторов и генераторов мощностью 15 кВт. Недогрузка в этом случае составит 83 %, а стоимость МГЭС – 10,5 млн руб. Лучшие сочетания компонентов каскада для обеспечения 50 кВт приведены на рис. 8.

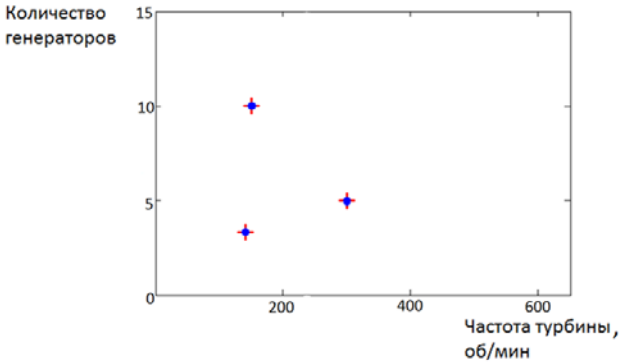


Рис. 8. Лучшие сочетания МГЭС для обеспечения 50 кВт

Стоимость 1 кВт установленной мощности в зависимости от суммарной мощности МГЭС изображена на рис. 9.

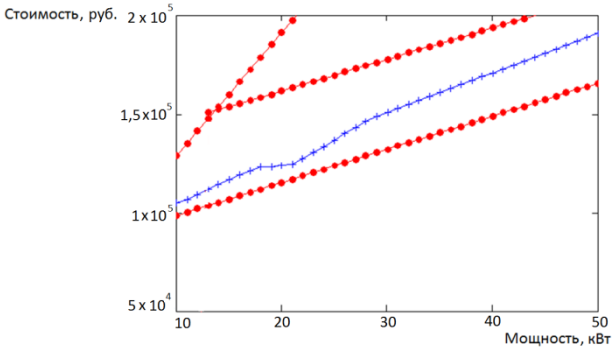


Рис. 9. Стоимость 1 кВт установленной мощности в зависимости от суммарной мощности:
● – без применения редуктора;
+ – с применением редуктора

Рост стоимости 1 кВт установленной мощности объясняется отсутствием генераторов большой единичной мощности, и применение нескольких МГЭС становится экономически менее целесообразным решением.

Сравнение различных вариантов

Рассмотрим модель использования микроГЭС в типичном удаленном населенном пункте Красноярского края, состоящем из 8 домов. Мощность, необходимая для его электрификации, составляет 5,4 кВт.

Результаты расчета полной стоимости деривационной микроГЭС мощностью 5,4 кВт приведены в табл. 2.

Таблица 2

Стоимость деривационной микроГЭС мощностью 5,4 кВт

Река	Уклон	Стоимость ГЭС с трубопроводом (сталь/полиэтилен)	Стоимость 1 кВт мощности (сталь/полиэтилен)
	%	млн руб.	млн руб./кВт
Сисим п. Березовая	0,26	12,76/14,89	2,36/2,75
Агул с. Петропаловка	0,33	9,38/10,93	1,73/2,02
Абакан п. Райков	0,133	31,23/40,86	5,78/7,56
Абакан г. Абаза	0,19	19,55/23,59	3,62/4,36
Кизир с. Имисское	0,16	24,32/31,60	4,50/5,85
Кан п. Кан-Оклаер	0,47	6,12/6,76	1,13/1,125
Малый Абакан	0,575	4,745/5,23	0,87/0,96

Из табл. 2 видно, что стоимость микроГЭС определяется величиной уклона, и с его увеличением стоимость деривационной микроГЭС уменьшается. Так увеличение уклона с 0,16 % на р. Кизир до 0,575 % на р. Малый Абакан приводит более чем к пятикратному снижению стоимости микроГЭС: 4,745 млн руб./24,32 млн руб.

Результаты расчета стоимости свободнопоточной микроГЭС приведены в табл. 3.

Таблица 3

Стоимость свободнопоточной микроГЭС мощностью 5,4 кВт

Река	Скорость реки	Стоимость ГЭС	Стоимость 1 кВт мощности	Количество агрегатов
	м/с	млн руб.	млн руб./кВт	штук
Сисим п. Березовая	2	0,336	0,062	1
Агул с. Петропавловка	2	0,336	0,062	1
Абакан п. Райков	2	0,336	0,062	1
Абакан г. Абаза	2	0,336	0,062	1
Кизир с. Имисское	2,5	0,276	0,051	1
Кан п. Кан-Оклаер	2,5	0,276	0,051	1
Малый Абакан	3,0	0,251	0,046	1

Мощность микроГЭС, необходимая для электрификации населенного пункта Красноярского края, состоящего из 70 домов, составляет 50 кВт.

Результаты расчета стоимости деривационной микроГЭС с учетом стоимости деривационного трубопровода приведены в табл. 4.

Таблица 4

Стоимость деривационной микроГЭС 50 кВт

Река	Уклон	Стоимость ГЭС с трубопроводом (сталь/полиэтилен)	Стоимость 1 кВт мощности
	%	млн руб.	млн руб./кВт
Сисим п. Березовая	0,26	46/106	0,9/2,13
Агул с. Петропавловка	0,33	34/77	0,68/1,54
Абакан п. Райков	0,133	157/365	3,14/7,3
Абакан г. Абаза	0,19	75/174	1,5/3,5
Кизир с. Имисское	0,16	104/240	2/4,8
Кан п. Кан-Оклаер	0,47	22/50	0,45/1
Малый Абакан	0,575	18/37	0,36/0,75

Результаты расчетов стоимости свободнопоточной микроГЭС 50 кВт приведены в табл. 5.

Таблица 5

Стоимости свободнопоточной микроГЭС 50 кВт

Река	Скорость реки	Стоимость ГЭС	Стоимость 1 кВт мощности	Количество агрегатов
	м/с	млн руб.	млн руб./ кВт	штук
Сисим п. Березовая	2	5,9	0,12	5
Казыр м. ст. Казыр	2	5,9	0,12	5
Агул с. Петропавловка	2	5,9	0,12	5
Абакан п. Райков	2	5,9	0,12	5
Абакан г. Абаза	2	5,9	0,12	5
Кизир с Имисское	2,5	4,9	0,099	5
Кан п. Кан-Оклаер	2,5	4,9	0,099	5
Малый Абакан	3,0	4,6	0,093	5

Сравнение результатов расчетов, приведенных в табл. 25, позволяет сделать вывод, что свободнопоточные микроГЭС для рассмотренных выше рек при их уклонах имеют существенные преимущества над деривационными. Так, минимальная стоимость деривационной ГЭС мощностью 5,4 кВт, соответствующая максимальному уклону реки (река Малый Абакан), составляет 4,74 млн руб, а стоимость свободнопоточной – 0,25 млн руб.

При мощности электростанции 50 кВт минимальная стоимость деривационной ГЭС составит 18 млн руб., а свободнопоточной – 4,6 млн руб.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ушаков В. Я. Современная и перспективная энергетика // Томск : Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2008. С. 468.
2. Чугаев Р. Р. Гидротехнические сооружения // М. : Высшая школа, 1978. С. 352.
3. Кривченко Г. И. Гидравлические машины // М. : Энергия, 1978. С. 320.
4. Спирин Е. А. Повышение энергетических характеристик ортогональной турбины // Красноярск : ИПЦ СФУ, 2008. С. 97–103.
5. Малая энергетика : сайт / М. Н. Розин. М., 2005. URL: http://rosinmn.ru/elektro/alternator_windec.htm (Дата обращения 02.05.2012).
6. Иванов И. И. Повышение эффективности малых ГЭС // Гидротехническое строительство. 1991. № 1. С. 14–19.

УДК 631

Филатов Дмитрий Алексеевич,
аспирант кафедры «Управление техническими системами»,
Иркутский государственный университет путей сообщения,
e-mail: Drugs1989@mail.ru
Мухопад Юрий Федорович,
д. т. н., профессор, заслуженный деятель
науки Российской Федерации

МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ТУРБОМЕХАНИЗМАМИ

D.A. Filatov, Yu.F. Muhopad

THE TECHNIQUE OF MONITORING AND MANAGEMENT OF TURBOMECHANISMS

Аннотация. *Предложена методика контроля и управления для турбомеханизмов, применяемых в производстве для экологической очистки воздуха от пыли, а также для очистительной системы на железной дороге.*

Ключевые слова: *турбомеханизмы, контроль, управление, вихревая труба, ультразвук, сирена.*

Abstract. *The technique of monitoring and management for the turbomechanisms applied in manufacture for ecological clearing of air of a dust, and as for cleaning system on the railway is offered.*

Keywords: *turbomechanisms, control, management, vortical pipe, ultrasound, siren.*

Принято считать, что железнодорожный транспорт не зависит от условий погоды, однако некоторые природные явления могут создать затруднения и в работе железных дорог. В Сибирских регионах серьезную опасность для движения поездов представляют обильные снегопады и вызываемые ими снежные заносы. Наиболее уязвимыми элементами пути при этом являются стрелочные переводы и, в первую очередь, стрелки в зоне примыкания остряков и рамных рельсов, а также шпальные ящики с переводными тягами.

В настоящее время широкое применение на сети железных дорог Российской Федерации нашла пневматическая двухпрограммная автоматическая очистка стрелочных переводов от снега. Очистка производится обдувкой межрельсового пространства сжатым воздухом, подаваемым по специальной пневмомагистрали.

Для наиболее эффективной очистки стрелок от снега и льда имеет смысл модернизировать существующую пневмоочистку использованием вихревого эффекта и ультразвука для дробления и топления снега и льда. Могут быть использованы системы с применением таких турбомеханизмов, как вихревая труба противоточного типа [5] и ультразвуковая статическая сирена [9, 13]. Для эффективной эксплуатации всех элементов системы необходимо ее контролировать и диагностировать на всем протяжении периода ее работы в режиме реального времени в связи с тем, что при малейшем изменении давления входного сжатого воздуха изменяются температура горячего сжатого воздуха в вихревой трубе и мощность ультразвука в сирене.

В промышленности используются подобные турбомеханизмы для очистки газа от пыли, такие как высокопроизводительные прямоточные циклоны [1] (вихревые трубы прямоточного типа [4, 5]), особенно в качестве первой ступени очистки.

В настоящей статье на базе рассмотренных ранее вопросов математического и аналитического описания процессов турбулентного движения воздушной среды для анализа зависимостей давления и температуры в разных точках вихревой камеры и влияния этих параметров на мощность ультразвука в сирене выбран метод анализа и способ управления турбомеханизмами. Анализ указанных процессов выполнялся ранее в ряде работ [1, 4, 5], однако не рассматривался вопрос комплексного взаимодействия горячего воздуха с ультразвуком.

Для реализации задачи управления и контроля целесообразно рассмотреть ультразвуковую систему очистки с применением вихревого эффекта как технологический процесс, состоящий из четырех взаимодействующих модулей (рис. 1).

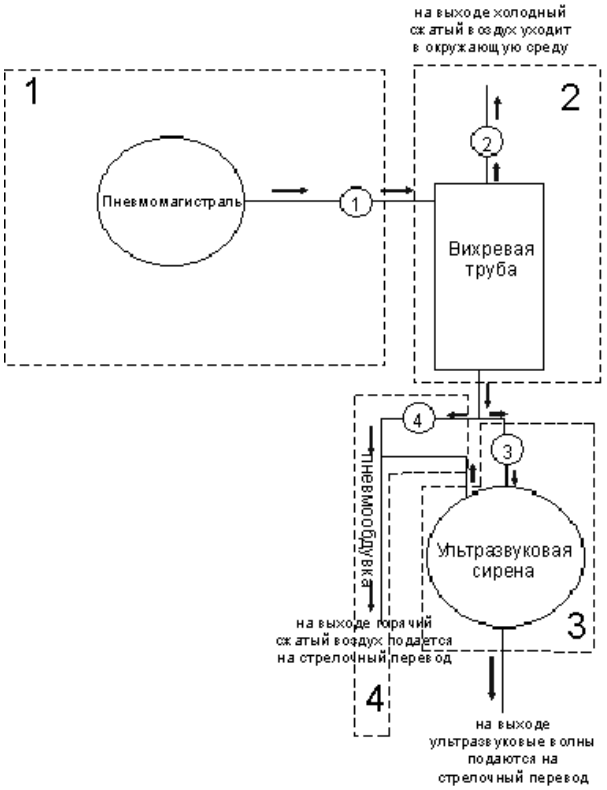


Рис. 1. Система очистки железнодорожных стрелок с применением вихревого эффекта и ультразвука. Стрелками обозначено направление движения сжатого воздуха от пневмомагистрали, а цифрами – номера дросселей/датчиков и технологических блоков (модулей)

Сжатый воздух поступает в вихревую камеру (модуль 2) с пневмомагистрали (модуль 1) и регулируется дросселем 1. Далее сжатый воздух делится на два потока (горячий и холодный), выходит через горячий и холодный выход вихревой трубы и регулируется дросселем 2 на холодном выходе. Часть горячего сжатого воздуха поступает в ультразвуковую сирену, а другая часть – в пневмообдувку (модули 3 и 4), горячий сжатый воздух в 3 и 4 модуле регулируется, соответственно, дросселем 3 и 4. После прохождения через ультразвуковую сирену отработанный сжатый воздух на 99 % возвращается в пневмообдувку, а сгенерированные им ультразвуковые волны в сирене наряду со сжатым горячим воздухом пневмообдувки поступают на стрелочный перевод.

Для создания и реализации системы управления вихревой трубой и ультразвуковой сиреной необходимо исследовать математическую модель для оценки взаимовлияния управляющих параметров и получения алгоритма или аппаратной модели.

В статье в качестве базового метода анализа используется аппарат сетей Петри. Этот подход для анализа вычислительных систем подробно раскрыт в работе [6]. Анализ вычислительных процессов с помощью сетей Петри с запрещающими дугами впервые предложен в работе [7]. Метод получил свое развитие и был использован далее в работах [2, 3, 8]. Однако применительно к анализу турбомеханизмов такие методы не использовались.

Управляющим параметром первого и второго модуля в данном случае является давление сжатого воздуха P1, которое должно находиться в пределах от 6 до 8 атм на выходе из пневмомагистрали или на входе в вихревую камеру; такое же давление Pc сжатого воздуха на холодном выходе вихревой трубы. Управляющим параметром третьего и четвертого модулей является давление Ph горячего сжатого воздуха на выходе из вихревой трубы, которое также колеблется от 6 до 8 атм.

Так как происходит колебание давления сжатого воздуха, что приводит к потере мощности ультразвука в сирене, то возникает необходимость поддерживать исправную работу системы очистки регулированием и контролем давления сжатого воздуха в режиме реального времени, что в свою очередь предусматривает создание микропроцессорной системы управления турбомеханизмами.

Рассмотрим микропроцессорное устройство управления и контроля турбомеханизмами. Процессор может находиться в одном из четырех состояний:

1 – обслуживание модуля 1 (рис. 1) – управление и контроль давлением P1 сжатого воздуха на входе в вихревую трубу;

2 – обслуживание модуля 2 – управление и контроль давления Pc сжатого воздуха на холодном выходе вихревой трубы;

3 – обслуживание модуля 3 – управление и контроль давления Ph сжатого воздуха на горячем выходе из вихревой трубы и на входе в ультразвуковую сирену;

4 – обслуживание модуля 4 – управление и контроль давления Ph сжатого воздуха на горячем выходе из вихревой трубы и входе в пневмообдувку.

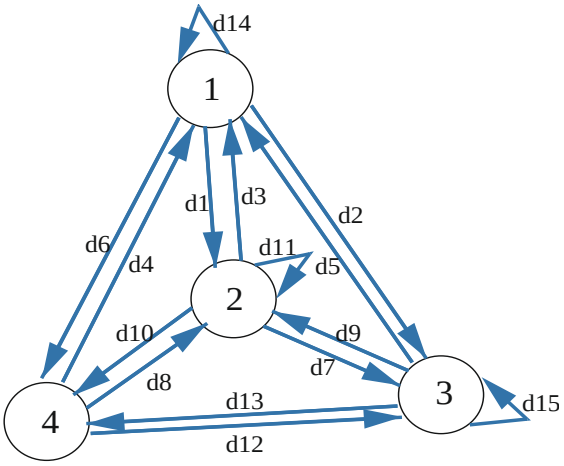


Рис. 2. Сетевая математическая модель микропроцессорной системы управления и контроля турбомеханизмов

Граф состояния устройства приведен на рис. 2. Дугами d1 d10, d12, d13 обозначены переходы между указанными состояниями. Дуги d11, d14, d15 обозначают завершение работы соответственно модуля 2 (при избыточном давлении Pc или его отсутствии на холодном выходе вихревой трубы), модуля 1 (при избыточном давлении P1 или его отсутствии на входе в вихревую трубу), модуля 3 (при избыточном давлении Ph или его отсутствии на горячем выходе вихревой трубы или на входе в ультразвуковую сирену). После завершения работы одного из трех модулей следует завершение работы микропроцессорной системы и отключение системы очистки. Сравнительный анализ для управления и контроля модулей производится над информацией с датчиков (рис. 1). Датчики расположены в каждом из модулей. По средствам дросселей система меняет параметры давления до рабочего состояния устройства очистки при малейшем изменении любого параметра давления.

Таким образом, выбраны условия и события для реализации управления и контроля турбомеханизмами. Список условий приведен в табл. 1, список событий – в табл. 2, а табл. 3 соответствует условиям и событиям.

Таблица 1

Список условий

Обозначение	Условия	Наличие начальных условий
b1	Обслуживание модуля 1 (принят запрос с датчика D1)	есть
b2	Вывод данных входных и выходных параметров модуля 1	нет
b3	Обслуживание модуля 2 (принят запрос с датчика D2)	есть
b4	Вывод данных выходных параметров модуля 2	нет
b5	Обслуживание модуля 3 (принят запрос с датчика D3)	есть
b6	Вывод данных выходных параметров модуля 3	нет
b7	Обслуживание модуля 4 (принят запрос с датчика D4)	есть
b8	Вывод данных выходных параметров модуля 4	нет

Полученная сетевая модель МПС должна обладать следующими свойствами:

1. Безопасность сети при подаче любых внешних воздействий. Это свойство, очевидно, выполняется для позиций, реализующих операцию «логическое ИЛИ» над метками. В случае арифметического суммирования нарушения безопасности могут свидетельствовать об ошибке на стадии логического проектирования МПС. Например, неограниченный рост числа меток в позиции типа «сохранение в стеке» соответствует переполнению стека при данном входном наборе.

2. Живость переходов. Отсутствие живости i-го перехода соответствует событию, которое не произойдет ни при каких любых допустимых входных наборах. На практике это может означать программную или аппаратную избыточность МПС или другую ошибку проектирования.

3. Достижимость. Сетевая модель должна иметь не только начальную разметку, но и некоторое непустое множество всех допустимых разметок. Наличие такого множества и определяет функционирование МПС.

4. Отсутствие тупиков. Наличие тупика означает зависание МПС на некотором входном наборе.

Таблица 2

Список событий

Обозначение	Событие
d1	Переход от модуля 1 к модулю 2 (сравнение PD1 и P1, TD1 и T1)
d2	Переход от модуля 1 к модулю 3 (сравнение PD1 и P1, TD1 и T1)
d3	Возврат из модуля 2 к модулю 1 (сравнение PD2 и Pc, TD2 и Tc)
d4	Возврат из модуля 4 к модулю 1 (сравниеPD4 и Ph, TD4 и Th)
d5	Возврат из модуля 3 к модулю 1 (сравнение PD3 и Ph, TD3 и Th)
d6	Переход от модуля 1 к модулю 4 (сравнение PD1 и P1, TD1 и T1)
d7	Переход от модуля 2 к модулю 3 (сравнение PD2 и Pc, TD2 и Tc)
d8	Возврат из модуля 4 к модулю 2 (сравнение PD4 и Ph, TD4 и Th)
d9	Возврат из модуля 3 к модулю 2 (сравнение PD3 и Ph, TD3 и Th)
d10	Переход от модуля 2 к модулю 4 (сравнение PD2 и Pc, TD2 и Tc)
d11	Переход к завершению работы модуля 2, завершение работы микропроцессорной системы. Отключение системы пневмоочистки
d12	Возврат из модуля 4 к модулю 3 (сравнение PD4 и Ph, TD4 и Th)
d13	Переход от модуля 3 к модулю 4 (сравнение PD3 и Ph, TD3 и Th)
d14	Переход к завершению работы модуля 1, завершение работы микропроцессорной системы. Отключение системы пневмоочистки.
d15	Переход к завершению работы модуля 3, завершение работы микропроцессорной системы. Отключение системы пневмоочистки

Условия делятся на предусловия и постусловия (табл. 3). Предусловия – это условия, которые обеспечивают реализацию события, а постусловия – это условия, которые выполняются после реализации события. Некоторые условия могут одновременно быть как предусловиями, так и постусловиями.

Таблица 3

Список условий и событий

Предусловие	Событие	Постусловие
b1b2	d1	b2b3b4
b1b2	d2	b2b5b6
b3b4	d3	b1b2b4
b7b8	d4	b1b2b8
b5b6	d5	b1b2b6
b1b2	d6	b2b7b8
b3b4	d7	b4b5b6
b7b8	d8	b3b4b8
b5b6	d9	b3b4b6
b3b4	d10	b4b7b8
b3b4	d11	b3b4
b7b8	d12	b5b6b8
b5b6	d13	b6b7b8
b1b2	d14	b1b2
b5b6	d15	b6b5

Для построения PN события будем считать переходами сети, условия – позициями. Если условие bi является предусловием события dj, то позиция bi соединена с переходом dj дугой. Если условие bi является постусловием события dj, то позиция bi соединена с переходом dj дугой. Если для реализации события dj необходимо отрицание условия bi, то позиция bi соединена с переходом dj запирающей дугой. Другими словами, в графе «предусловие» табл. 3 определяют матрицу прямой функции инцидентности Φ, а «постусловие» – матрицу обратной функции инцидентности H:

$$\Phi : B \times Д - \left(0,1,\bar{1}\right); H : Д \times B - (0,1),$$

где $Д$ – множество событий, B – множество постусловий и предусловий, 0 означает отсутствие дуги между событием и условием, 1 – наличие дуги и $\bar{1}$ – наличие запирающей дуги.

Матрицы Φ и H, построенные на основании табл. 3, представлены в табл. 4 и табл. 5 соответственно. Начальная маркировка PN, построенной по матрицам Φ и H, определяется из списка условий (табл. 1): M0 = 0{100000000}.

Таблица 4

Матрица прямой функции инцидентности

Позиция	Переход							
	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7	b8
d1	1	1	0	0	0	0	0	0
d2	1	1	0	0	0	0	0	0
d3	0	0	1	1	0	0	0	0
d4	0	0	0	0	0	0	1	1
d5	0	0	0	0	1	1	0	0
d6	1	1	0	0	0	0	0	0
d7	0	0	1	1	0	0	0	0
d8	0	0	0	0	0	0	1	1
d9	0	0	0	0	1	1	0	0
d10	0	0	1	1	0	0	0	0
d11	0	0	1	1	0	0	0	0
d12	0	0	0	0	0	0	1	1
d13	0	0	0	0	1	1	0	0
d14	1	1	0	0	0	0	0	0
d15	0	0	0	0	1	1	0	0

Таблица 5

Матрица обратной функции инцидентности

Позиция	Переход														
	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8	d9	d10	d11	d12	d13	d14	d15
b1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
b2	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
b3	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0
b4	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0
b5	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1
b6	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1
b7	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
b8	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0

Рассмотрим достижимость сетевой модели (рис. 3):

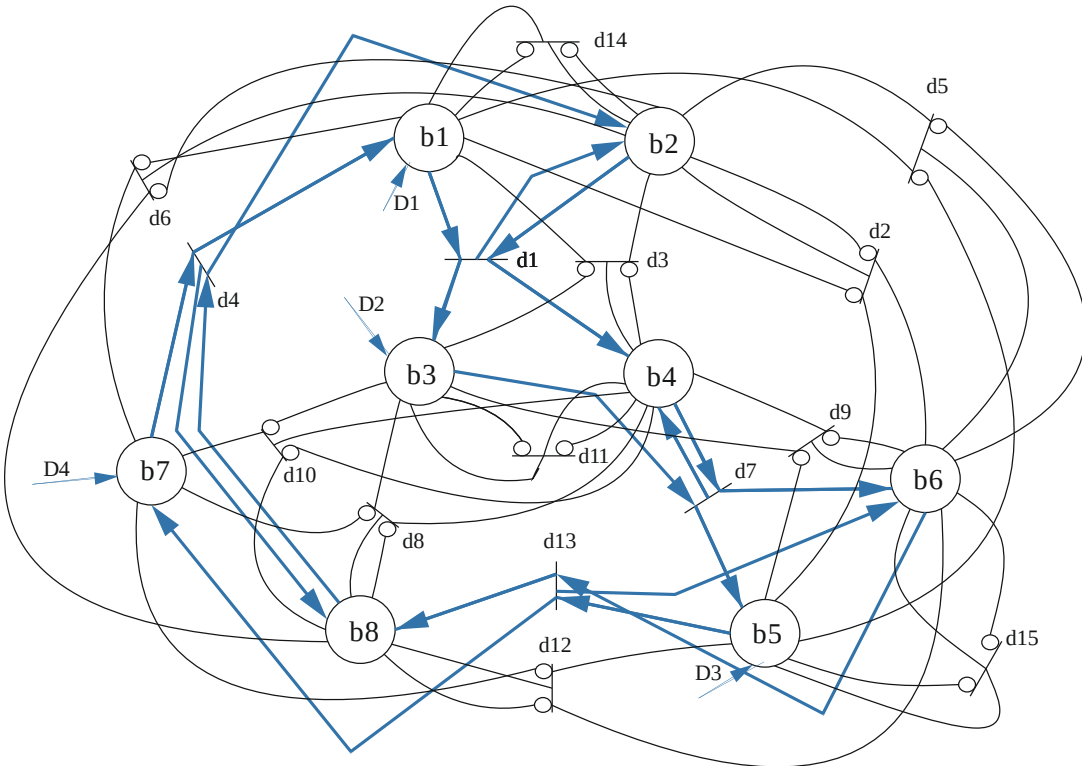


Рис. 3. Сеть Петри микропроцессорной системы управления и контроля турбомеханизмов

Используя прямую и обратную функции инцидентности, запишем уравнение, определяющее наличие метки в позиции bj после срабатывания перехода di:

$$bj = bj \times \Pi_{i=1}^{m} tji \times V_{i=1}^{n} \tau ij \cdot$$

Для сети (рис. 3) система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} b1 = d3 \vee d4 \vee d5 \vee d14 \\ b2 = d1 \vee d2 \vee d3 \vee d4 \vee d5 \vee d6 \vee d14 \\ b3 = d1 \vee d8 \vee d9 \vee d11 \\ b4 = d1 \vee d3 \vee d7 \vee d8 \vee d9 \vee d10 \vee d11 \\ b5 = d2 \vee d7 \vee d12 \vee d15 \\ b6 = d2 \vee d5 \vee d7 \vee d9 \vee d12 \vee d13 \vee d15 \\ b7 = d6 \vee d10 \vee d13 \\ b8 = d4 \vee d6 \vee d8 \vee d10 \vee d12 \vee d13 \end{cases},$$

$$\begin{aligned} & b1 \cdot (d1 \times \overline{d2 d6 d14}) \\ & b2 \cdot (d1 \times \overline{d2 d6 d14}) \\ & b3 \cdot (\overline{d3} d7\ \overline{d10 d11}) \\ & b4 \cdot (\overline{d3} d7\ \overline{d10 d11}) \\ & b5 \cdot (\overline{d5 d9} d13 \overline{d15}) \\ & b6 \cdot (\overline{d5 d9} d13 \overline{d15}) \\ & b7 \cdot (d4 \overline{d8 d12}) \\ & b8 \cdot (d4 \overline{d8 d12}) \end{aligned} .$$

Таким образом, граф достижимости принимает следующий вид:

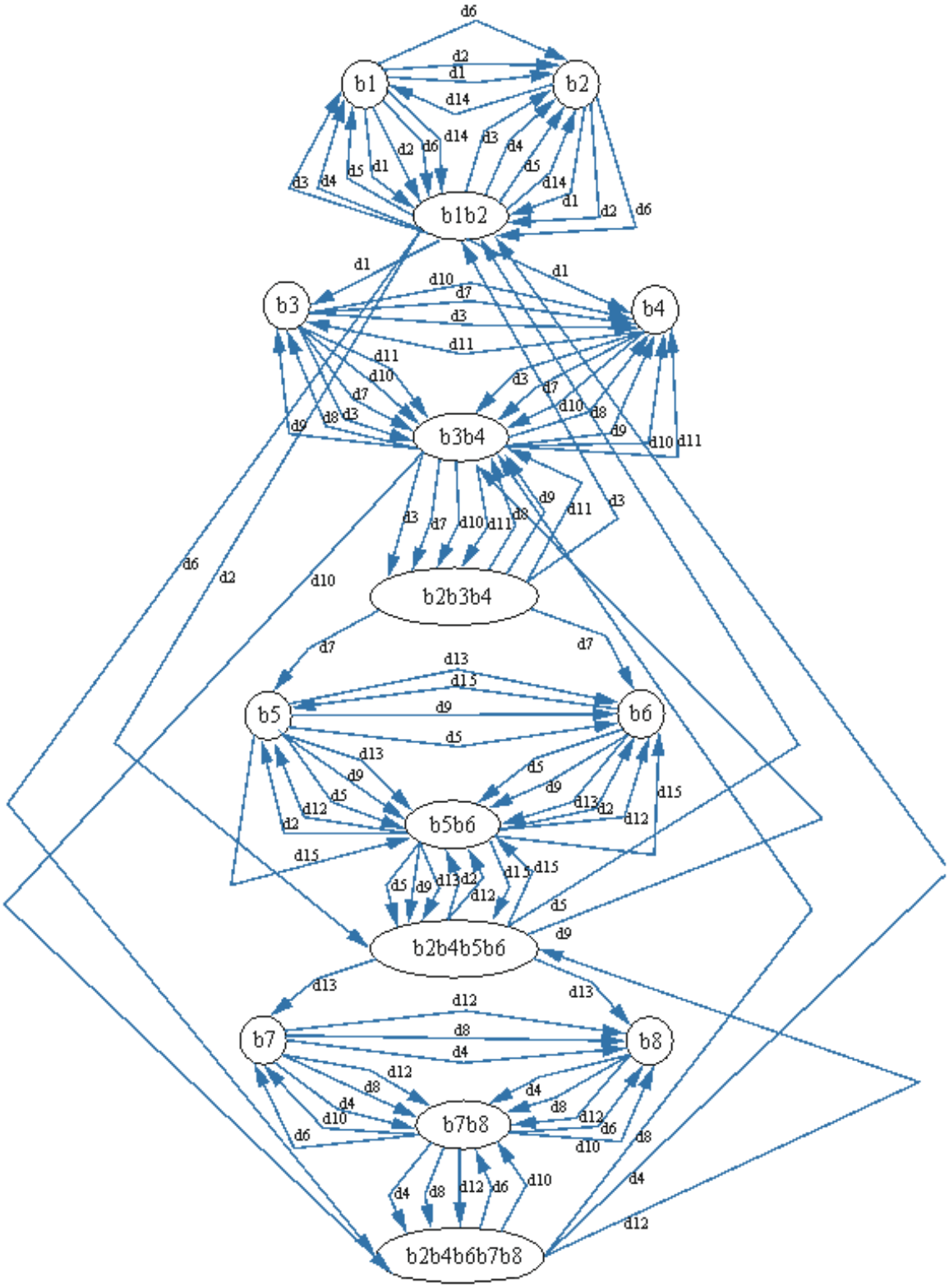


Рис. 4. Граф достижимости, где позиции b2, b4, b6, b8 сохраняются до завершения обхождения всех ребер графа

Из графа достижимости (рис. 4) выбирается следующий маршрут с условием перехода pi:

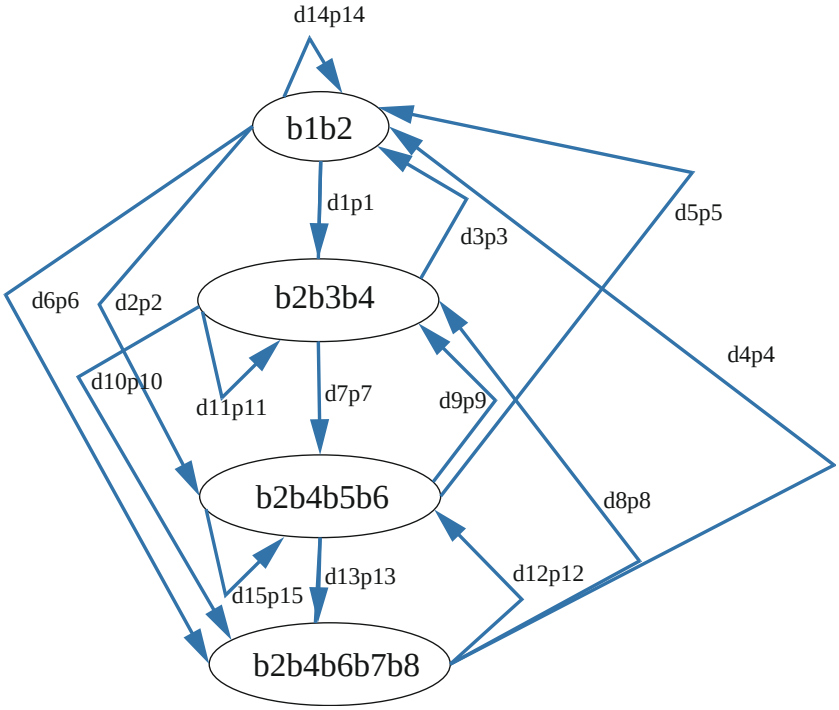


Рис. 5. Маршрут прохождения всех ребер графа достижимости

На основании маршрута (рис. 5) матрица смежности графа достижимости приведена в табл. 6.

Таблица 6

Матрица смежности графа достижимости

Разметка	b1b2	b2b3b4	b2b4b5b6	b2b4b6b7b8
b1b2	d14p14	d1p1	d2p2	d6p6
b2b3b4	d3p3	d11p11	d7p7	d10p10
b2b4b5b6	d5p5	d9p9	d15p15	d13p13
b2b4b6b7b8	d4p4	d8p8	d12p12	

Граф достижимости и матрица смежности выбранного маршрута показывают, что сетевая модель обладает следующими свойствами:

1) безопасность сети при подаче любых внешних воздействий;

2) живость переходов;

3) достижимость;

4) отсутствие тупиков.

Таким образом, сетевая модель микропроцессорной системы управления турбомеханизмами сводится к композиции двух автоматов с обратной связью (рис. 6).

Автомат A1 – автомат Мили, входной алфавит которого составляет множество условий P. Выходной алфавит представлен множеством D, элементами которого являются переходы di.

Автомат A2 – автомат Мура, входной алфавит которого состоит из множества D и множества входных наборов J (сигналы датчиков Di). Выходной алфавит представлен множеством P.

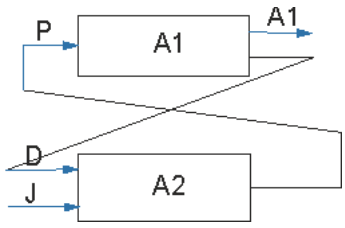


Рис. 6. Автоматная модель микропроцессорной системы управления турбомеханизмами

За время одного такта происходит одно из двух событий:

1. Входной набор J1 переводит автомат A2 из одного состояния в другое. При этом отсутствие меток на входах сети Петри понимается как нулевой входной набор.

2. Срабатывание переходов αi (изменение значений входов D автомата A2) приводит к изменению состояния автомата A2.

Построенная автоматная модель (рис. 6) позволяет решить следующие задачи:

- построение тестовых наборов, обеспечивающих реализацию выбранного маршрута;

- обеспечение контроля функционирования системы в ходе работы;

- преобразование исходной модели микропроцессорной системы к виду, пригодному для самотестирования.

Полученная аппаратная модель приводит к завершению задачи определения метода контроля и управления турбомеханизмами. Дальнейшее развитие модели (рис. 6) дает возможность создания аппаратной реализации микропроцессорной системы управления турбомеханизмами.

Методика управления и контроля турбомеханизмами с использованием аппарата сетей Петри доказала свою пригодность и эффективность в качестве базового метода анализа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Асламова В. С. Прямоточные циклоны. Теория, расчет, практика. Ангарск : АГТА, 2008. 233 с.
2. Васильев В. В., Кузьмин В. В., Сети Петри, параллельные алгоритмы и модули МПС. Киев : Наукова думка, 1991. 216с.
3. Гуревич Д. С. Поглощающие сети Петри при проектировании ЦВС // Автоматика и вычислительная техника. 1990. № 3. 80–87 с.
4. Гуцол А. Ф. Эффект Ранка. Кольск, 1997. 687 с.
5. Меркулов А. П. Вихревой эффект и его применение в технике. М. : Машиностроение, 1969. С. 7–64.
6. Мурата Т. Сети Петри // ТИИЭР. 1989. №4. С. 41-85
7. Мухопад Ю. Ф. Сербуленко Л. М. Автоматная интерпретация устройств контроля и управления. Новосибирск : НЭТИ, 1992. 41–49 с.
8. Мухопад Ю. Ф. Микроэлектронные системы управления. Братск : БрГУ, 2009, 285с.
9. Розенберг Л. Д. Источники мощного ультразвука. Физика и техника мощного ультразвука. М. : НАУКА, 1967. 94–106 с.
10. Автоматическая пневмоочистка стрелок. Напольное оборудование и воздухопроводная сеть : типовые материалы для проектирования. М. : РОСЖЕЛДОРПРОЕКТ, 2006. С. 1–29.
11. Филатов Д. А. Микропроцессорные системы управления турбо-механизмами. Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте : сб. науч. тр. / А. В. Данеев, В. А. Козырев // Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте / Иркут. гос. ун-т путей сообщ., Ин-т динамики систем и теории упр. СО РАН Байкал. науч. центр академии инженер. наук РФ; под ред. Ю. Ф. Мухопада. Иркутск, 2011. Вып. 19. 118-121 с.
12. Филатов Д.А. Структура микропроцессорной системы управления турбо-механизмами на базе микроконтроллера семейства HC08 // Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте / Иркут. гос. ун-т путей сообщ., Ин-т динамики систем и теории упр. СО РАН Байкал. науч. центр академии инженер. наук РФ; под ред. Ю. Ф. Мухопада. Иркутск, 2011. Вып. 20. 53–60 с.
13. Филатов Д. А. Применение сирены, как ультразвукового излучателя на железной дороге // Проблемы транспорта Восточной Сибири : материалы науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов электромехан. факультета ИрГУПС / Федер. агентство ж.-д. трансп., Иркут. гос. ун-т путей сообщ. Иркутск : ИрГУПС, 2012. 117–119 с.

УДК 621.3.019

Володарский Владислав Афанасьевич
к. т. н., с. н. с., доцент, кафедра транспортных систем
Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал ИрГУПС
т. 8391 221 60 72, e-mail: volodarsky.vladislav@yandex.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНЫХ ЗАМЕН И РЕМОНТОВ ПРИ ДОПУСТИМОМ ЗНАЧЕНИИ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ

V.A. Volodarsky

DETERMINATING OF THE PREVENTIVE REPLACEMENT AND REPAIR SYSTEM PARAMETERS ON CONDITIONS FAILURE RATE

Аннотация. *Изложен метод, позволяющий при заданном уровне интенсивности отказов определять глубину восстановления безотказности, периодичность предупредительных замен и ремонтов технических устройств.*

Ключевые слова: *безотказность, глубина восстановления, интенсивность отказов, ремонт, замена, периодичность.*

Abstract. *The method permitting to determine deep of reliability, preventive replacement and repair intensity on conditions failure rate is explicated.*

Keyword: *reliability, deep of restoration, failure rate, repair, preventive, intensity.*

Для технических устройств (ТУ) важным параметром является безопасность, под которой понимают свойство ТУ в случае отказа не создавать угрозу для жизни и здоровья людей, а также для окружающей среды [1]. Например, на транспорте необходимым условием является обеспечение безопасности движения. Известно, что проведение предупредительных замен (ПЗ) и предупредительных ремонтов (ПР) повышает безотказность и, как следствие, безопасность ТУ. Поэтому параметры системы предупредительных замен и ремонтов (периодичность ПЗ, периодичность и количество ПР, глубина восстановления безотказности) в этом случае должны определяться из условия обеспечения допустимого (заданного) уровня безотказности ТУ. Показателями, количественно характеризующими безотказность ТУ, в соответствии с [1] являются вероятность безотказной работы (ВБР), наработка на отказ (ННО), интенсивность отказов (ИО) и др.

Глубину восстановления безотказности в соответствии с [2] предлагается оценивать «возрастом» ТУ α в единицах ННО. Рассмотрим случай, когда после проведения n предупредительных ремонтов осуществляется замена ТУ на новое. Характер изменения ИО представлен на рис. 1.

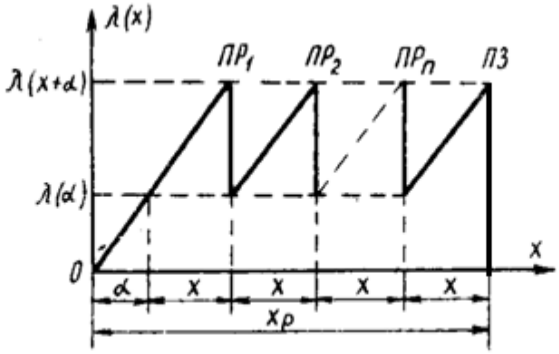


Рис. 1. Изменение интенсивности отказов при проведении предупредительных замен и ремонтов

После проведения ПР с периодичностью x и глубиной восстановления безотказности α ИО снижается до значения λ(α), а после проведения ПЗ с периодичностью x_p – до нуля. ИО в момент проведения ПЗ и ПР составляет λ(x + α). Здесь значения x и x_p измеряются в единицах ННО, а интенсивность отказов приведена к безразмерному виду путем умножения на значение ННО.

ВБР при наработке x_p, согласно рис. 1, определяется как

$$P(x_p) = \exp(-\int_0^{x_p} \lambda(x)dx) = \\ = (P(x+\alpha))^{n+1}(P(\alpha))^{-n}. \quad (1)$$

Частные случаи выражения (1):

при n = 0, когда проводятся только ПЗ и α = 0, $P(x_p) = P(x)$;

при $n \to \infty$ когда проводятся только ПР, после раскрытия неопределенности получим

$$P(x/\alpha) = (P(x+\alpha))(P(\alpha))^{-1}. \quad (2)$$

Учитывая, что $x_p = \alpha + (n + 1)$ (см. рис. 1), получим

$$x = (x_p - \alpha)(n+1)^{-1} \quad (3)$$

Подставив значение x из (3) в (1), получим

$$P(x_p) = (P(\frac{x_p + n\alpha}{n+1}))^{n+1}(P(\alpha))^{-n}. \quad (4)$$

Тогда ИО определяется как

$$\lambda(x_p) = -\frac{(P(x_p))'}{P(x_p)} = \lambda(\frac{x_p + n\alpha}{n+1}) = \lambda(x + \alpha). \quad (5)$$

Частные случаи выражения (5):
при $n = 0$, когда производятся только ПЗ и $\alpha = 0$, $\lambda(x_p) = \lambda(x)$;
при $n \to \infty$, когда проводятся только ПР, получим выражение $\lambda(x/\alpha) = \lambda(x + \alpha)$.

В статье рассматривается метод определения параметров системы предупредительных замен и ремонтов при заданном уровне интенсивности отказов технических устройств, когда

$$\lambda(x / \alpha, n) \le \lambda_g, \quad (6)$$

где λ_g – допустимое по условиям обеспечения безопасности значение интенсивности отказов.

Известно, что ПЗ и ПР целесообразно проводить для ТУ, подверженных износу и старению. Для описания отказов, связанных с износом и старением, как правило, используют нормальное, Вейбулла и гамма-распределение. Кроме того, в случае неполноты исходной информации целесообразно использовать распределение косинуса [3]. Тогда выражение (5) с учетом результатов, полученных в [3], можно представить так:

для нормального распределения

$$\lambda(x / \alpha, n) = f_1((1 - x - \alpha)v^{-1})v^{-1}; \quad (7)$$

для распределения Вейбулла

$$\lambda(x / \alpha, n) = bK_b^b(x + \alpha)^{b-1}; \quad (8)$$

для гамма-распределения

$$\lambda(x / \alpha, n) = (m^m(x + \alpha)^{m-1}) \times \times((m-1)!\sum_0^{m-1}((m(x + \alpha))^i / i!))^{-1}; \quad (9)$$

для распределения косинуса

$$\lambda(x / \alpha, n) = \tan(x + \alpha), \quad (10)$$

где v – коэффициент вариации; f_1 – табулированная функция; b – параметр формы распределения Вейбулла; $K_b = \Gamma(1 + b^{-1})$. Здесь Γ – гамма-функция; m – параметр формы гамма-распределения.

Периодичность предупредительных замен x_{Pg} и ремонтов x_g глубина восстановления безотказности α_g при заданном допустимом значении интенсивности отказов определяются из условия $\lambda(x / \alpha, n) = \lambda_g$ следующим образом.

1. Распределение Вейбулла.

При заданных значениях α из (8) получим:

$$x_g = (\lambda_g(bK_b^b)^{-1})^{\frac{1}{b-1}} - \alpha. \quad (11)$$

При α = 0, когда проводится только ПЗ, из (11) получим:

$$x_{Pg} = (\lambda_g(bK_b^b)^{-1})^{\frac{1}{b-1}}. \quad (11а)$$

При заданных значениях x из (8) получим:

$$\alpha_g = (\lambda_g(bK_b^b)^{-1})^{\frac{1}{b-1}} - x. \quad (12)$$

При заданных значениях x,α и n из (8) с учетом (5) получим

$$x_{Pg} = (n+1)(\lambda_g(bK_b^b)^{-1})^{\frac{1}{b-1}} - n\alpha. \quad (13)$$

Частные случаи выражения (13): при $n = 0$, когда α = 0, получим выражение (11а); при $n \to \infty$ после раскрытия неопределенности получим выражение (11).

2. Распределение косинуса.

При заданных значениях α из (10) получим:

$$x_g = \arctan(\lambda_g) - \alpha. \quad (14)$$

При α = 0, когда проводятся только ПЗ, из (14) получим:

$$x_{Pg} = \arctan(\lambda_g). \quad (14а)$$

При заданных значениях x из (10) получим:

$$\alpha_n = \arctan(\lambda_g) - x. \quad (15)$$

При заданных значениях x,α и n из (10) с учетом (5) получим:

$$x_{Pg} = (n+1)\arctan(\lambda_g) - n\alpha. \quad (16)$$

Частные случаи выражения (16): при $n = 0$ получим выражение (14а); при $n \to \infty$ получим выражение (14).

3. Гамма-распределение.

При заданных значениях α из (9) получим:

при $m = 2$ $$x_g = \lambda_g(4 - 2\lambda_g)^{-1} - \alpha; \quad (17)$$

при $m = 4$ $$x_g = (6\lambda_g + (216\lambda_g - 36\lambda_g^2)^{0.5}) \times \times(54 - 18\lambda_g)^{-1} - \alpha. \quad (18)$$

При α = 0, когда проводятся только ПЗ, получим:

при $m = 2$ $$x_{Pg} = \lambda_g(4 - 2\lambda_g)^{-1}; \quad (17а)$$

при $m = 4$ $$x_{Pg} = (6\lambda_g + (216\lambda_g - 36\lambda_g^2)^{0.5}) \times \times(54 - 18\lambda_g)^{-1} - \alpha. \quad (18а)$$

При заданных значениях x из (9) получим:

при $m = 2$ $$\alpha_g = \lambda_g(4 - 2\lambda_g)^{-1} - x; \quad (19)$$

при $m = 4$ $$\alpha_g = (6\lambda_g + (216\lambda_g - 36\lambda_g^2)^{0.5}) \times \times(54 - 18\lambda_g)^{-1} - x. \quad (20)$$

При заданных значениях x, α и n из (9) с учетом (5) получим:

при $m = 2$ $x_{Pg} = (n+1)\lambda_g (4 - 2\lambda_g)^{-1} - n\alpha;$ (21)

при $m = 4$ $x_{Pg} = (n+1)\left[(6\lambda_g + (216\lambda_g - 36\lambda_g{}^2)^{0.5}) \cdot (54 - 18\lambda_g)^{-1}\right] - n\alpha.$ (22)

Частные случаи выражений (21) и (22): при $n = 0$ получим соответственно выражения (17а) и (18а); при $n \to \infty$ получим соответственно выражения (17) и (18).

Как видно из полученных результатов, периодичность предупредительных замен и ремонтов линейно зависит от глубины восстановления безотказности и, соответственно, глубина восстановления безотказности линейно зависит от периодичности предупредительных замен и ремонтов.

В качестве примера в табл. 1 представлены значения x_g (числитель) и x_{Pg} (знаменатель), вычисленные при отдельных значениях λ_g, n и α с использованием: выражений (11) и (13) в случае распределения Вейбулла при $b = 2$ и $b = 3$; выражений (14) и (16) в случае распределения косинуса; выражений (17) и (22) в случае гамма-распределения при $m = 2$ и выражений (18) и (22) в случае гамма-распределения при $m = 4$

Из таблицы видно следующее. Во-первых, с ростом параметра формы b и m (уменьшением коэффициента вариации) периодичность ПЗ и ПР увеличивается. Это означает, что когда интенсивность отказов возрастает медленнее, предупредительные замены и ремонты могут выполняться реже. Во-вторых, с уменьшением допустимого значения интенсивности отказов ТУ периодичность ПЗ и ПР уменьшается. В-третьих, с уменьшением глубины восстановления безотказности периодичность ПР уменьшается. Следовательно, с целью обеспечения безопасности предупредительный ремонт устройств целесообразно выполнять с возможно большей глубиной, поскольку при этом снижется его частота, особенно при малых значениях λ_g.

На рис. 2 представлены зависимости глубины восстановления безотказности от периодичности ПР при заданных значениях ИО, построенные с использованием выражения (12) в случае распределения Вейбулла при $b = 3$ (прямая 2 при $\lambda_g = 1$ и прямая 4 при $\lambda_g = 0{,}5$), при $b = 2$ (прямая 3 при $\lambda_g = 1$ и прямая 6 при $\lambda_g = 0{,}5$) и с использованием выражения (15) в случае распределения косинуса (прямая 1 при $\lambda_g = 1$ и прямая 5 при $\lambda_g = 0{,}5$). Из рисунка видно следующее.

Во-первых, с уменьшением допустимого значения ИО и периодичности ПР снижается допустимое значение глубины восстановления безотказности ТУ. Во-вторых, существует предельное значение периодичности, когда значение α_g становится равным нулю и необходимо вместо ремонта проводить замену технических устройств.

Таблица 1

Результаты расчетов замен и ремонтов

Распределение		Вейбулла $b = 2$			Вейбулла $b = 3$			Косинуса			Гамма $m = 2$			Гамма $m = 4$		
λ_g	n	x_g / x_{Pg} при α			x_g / x_{Pg} при α			x_g / x_{Pg} при α			x_g / x_{Pg} при α			x_g / x_{Pg} при α		
		0	0,1	0,2	0	0,1	0,2	0	0,1	0,2	0	0,1	0,2	0	0,1	0,2
1	0	- 0,6	-	-	- 0,7	-	-	- 0,8	-	-	- 0,5	-	-	- 0,6	-	-
	1	-	0,54 1,17	0,44 1,07	-	0,58 1,27	0,49 1,17	-	0,68 1,47	0,58 1,37	-	0,4 0,9	0,3 0,8	-	0,44 0,98	0,34 0,88
	3	-	0,54 2,25	0,44 1,95	-	0,58 2,44	0,49 2,14	-	0,68 2,84	0,58 2,54	-	0,4 1,7	0,3 1,4	-	0,44 1,85	0,34 1,55
	5	-	0,54 3,35	0,44 2,82	-	0,58 3,61	0,49 3,11	-	0,68 4,21	0,58 3,71	-	0,4 2,5	0,3 2,0	-	0,44 2,73	0,34 2,23
0,5	0	- 0,3	-	-	- 0,5	-	-	- 0,6	-	-	- 0,2	-	-	- 0,3	-	-
	1	-	0,22 0,54	0,12 0,44	-	0,38 0,87	0,29 0,77	-	0,36 0,82	0,26 0,72	-	0,07 0,23	-	-	0,18 0,47	0,09 0,37
	3	-	0,22 0,53	0,12 0,67	-	0,38 0,87	0,29 0,77	-	0,36 0,82	0,26 1,25	-	0,07 0,37	-	-	0,19 0,85	0,09 0,58
	5	-	0,22 1,41	0,12 0,91	-	0,38 2,41	0,29 1,91	-	0,36 2,28	0,26 1,78	-	0,07 0,5	-	-	0,19 1,23	0,09 0,73

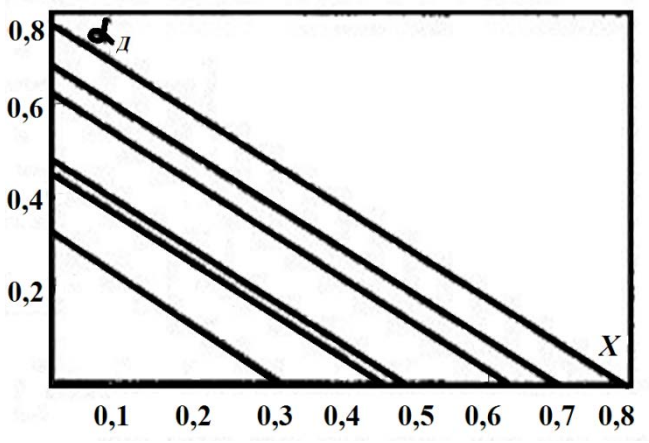


Рис. 2. Зависимости глубины восстановления безотказности ТУ от периодичности ПР и допустимого значения ИО

Заключение

Исходя из условия обеспечения допустимого уровня интенсивности отказов технических устройств, предлагаемый метод позволяет:

- при заданном значении глубины восстановления безотказности определить периодичность ремонтов;
- при заданном значении периодичности ремонтов определить глубину восстановления безотказности;
- при заданных значениях глубины восстановления безотказности, количества и периодичности ремонтов определить срок замены технических устройств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. Введ. 1990-07-01.
2. Володарский В.А. Об оптимизации предупредительных замен и ремонтов технических устройств / Надежность и контроль качества. 1989. №6. С.21–24.
3. Володарский В. А. Определение показателей надежности электрооборудования при неопределенности исходной информации. / Электричество. 1987. №3. С. 49–51.

УДК 621.928.93

Кулакова Ирина Михайловна,
к. т. н., доцент кафедры «Вычислительные машины и комплексы» АГТА,
e-mail: iyelkina@mail.ru
Аршинский Максим Иннокеньевич,
оператор ОАО «АНХК» (НПЗ),
e-mail:arshmax@mail.ru
Асламова Вера Сергеевна,
д. т. н., профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности и экология» ИрГУПС,
e-mail: aslamovav@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ УГЛА ЗАКРУТКИ ПОТОКА И ЭЖЕКЦИИ ЧАСТИ ВОЗДУХА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СЕПАРАЦИИ ПРЯМОТОЧНОГО ЦИКЛОНА

I.M. Kulakova, M.I. Arshinsky, V.S. Aslamova

SWIRL FLOW ANGLE AND PART OF AIR EJECTION INFLUENCE UPON DIRECT FLOW CYCLONE SEPARATION EFFICIENCY

Аннотация. *Исследовано влияние угла закрутки потока, определяемого углом установки лопаток осевого направляющего аппарата, и площади отверстий, через которые эжектируется воздух из бункера в поток очищенного воздуха, на технические характеристики прямоточного циклоны с промежуточным отбором пыли. Получены регрессионные зависимости эффективности сепарации от указанных факторов.*

Ключевые слова: *прямоточный циклон с промежуточным отбором пыли, угол закрутки потока, угол установки лопаток осевого направляющего аппарата, площадь отверстий, эжектирующих воздух, эффективность сепарации.*

Abstract. *The swirl flow angle influence on the direct-flow cyclones with intermediate dust extraction technical characteristics defined by the vane position angle of axial directing mechanism and by the diameter of inlets through which the air from a bunker is ejected into the purified air flow were investigated in the given study. The regressional dependences of separation efficiency on mentioned factors were obtained.*

Keywords: *direct-flow cyclone with intermediate dust extraction, swirl flow angle, vane position angle of axial directing mechanism, the diameter of inlets through which the air from bunker is ejected, separation efficiency.*

Введение

Эффективная очистка воздуха от пыли, выбрасываемой предприятиями строительной индустрии, представляет собой важную народнохозяйственную задачу. Предприятиями отрасли ежегодно выбрасывается в атмосферный воздух около 2,4 млн т пыли [1].

Традиционно действующие мокрые системы пылеулавливания энергоемки, требуют организации шламового хозяйства, исключают утилизацию уловленной пыли и не всегда обеспечивают нормы предельно допустимых выбросов. Поэтому особое значение приобретают разработка и анализ научных основ энергосберегающего сухого пылеулавливания. Дальнейшее сокращение вредных выбросов предприятиями строительной индустрии может быть достигнуто вводом в действие новых эффективных газоочистных установок и аппаратов, технического усовершенствования действующих пылеулавливающих систем, внедрения в промышленность современных эффективных методов очистки [2].

Высокую эффективность очистки могут обеспечить высокопроизводительные прямоточные циклоны с промежуточным отбором пыли (ПЦПО), основным преимуществом которых является: возможность стабильного и эффективного разделения в широком диапазоне варьирования расхода газа и концентрации пыли при сравнительно небольшом гидравлическом сопротивлении. В работах [3, 4] уже проводилось исследование ПЦПО. Однако рациональные значения некоторых деталей циклона нуждаются в уточнении.

Цель работы: исследование влияния угла закрутки потока, определяемого углом установки лопаток осевого направляющего аппарата (ОНА), и площади отверстий, через которые эжектируется воздух из бункера в поток очищенного воздуха, на технические характеристики ПЦПО.

Результаты исследований. На опытной установке (рис. 1) исследовался ПЦПО диаметром D = 114 мм, конструкция которого защищена патентом на полезную модель [5]. ПЦПО был спроектирован с помощью автоматизированной системы проектирования и расчета деталей ПЦПО [6].

Закручивание потока осуществлялось ОНА 3 с бицилиндрическими профилированными лопатками. Испытаны ОНА с углом установки лопаток $\gamma = 20°$, 30° и 35° к радиальной плоскости (закрутка потока 70°, 60° и 55°) и числом лопаток 10, 10 и 11 соответственно.

Измерения проводили по общепринятым стандартам. Для запыления потока использовали цемент марки М400. Гранулометрический состав порошка определялся методом жидкостной седиментации в керосине. Масс-медианные диаметры частиц цемента d_m составили 8 мкм, среднее квадратическое отклонение функции распределения частиц по размерам $\lg \sigma_ч = 0{,}286$.

Дозатор пыли 2 представлял собой виброворонку с возможностью изменения размера выходного сечения. Для предотвращения слеживания частиц пыль предварительно прогревалась. Истинная плотность ρ_δ цемента, измеренная с помощью пикнометра, составила 3017,8 кг/м^3.

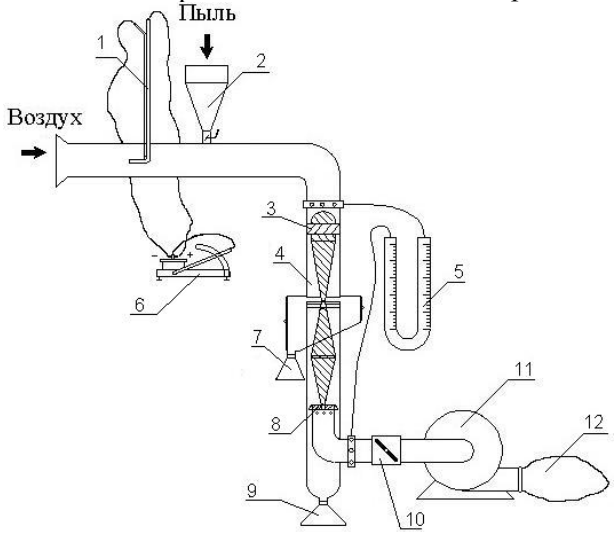


Рис. 1. Схема опытной установки: 1 – трубка Пито; 2 – виброворонка для подачи пыли; 3 – ОНА; 4 – ПЦПО; 5 – U-образный манометр; 6 – микроманометр; 7 – промежуточный бункер пыли; 8 – отверстия, эжектирующие воздух из второго бункера; 9 – второй бункер пыли; 10 – заслонка; 11 – вентилятор; 12 – тканевый фильтр

Скорость потока определялась с помощью откалиброванной трубки Пито 1. Для измерений малых перепадов давлений использовался микроманометр 6 серии ММН-240. Расход очищаемого воздуха Q регулировался с помощью заслонки 10. Запыленность потока z определялась по формуле

$$z = m_n / (t_n Q),$$

где m_n – масса навески пыли, [г]; t_{n2} – время истечения пыли из дозатора, [с].

Критерий Рейнольдса рассчитывался по формуле

$$\mathrm{Re} = \rho w_{cp} D / \mu,$$

где ρ – плотность воздуха, [кг/м^3]; D – диаметр циклона, [м]; μ – динамическая вязкость воздуха, [Па·с]; w_{cp} – среднерасходная скорость в плане циклона, [м/с], рассчитываемая по формуле

$$w_{cp} = Q / (\pi D^2).$$

Гидравлическое сопротивление пылеуловителя ΔP рассчитывается по перепаду полных давлений на входе в циклон и на выходе из него. Учитывая, что $z_2 = 0$, уравнение Бернулли запишем для несжимаемого газа в виде

$$\frac{\rho\alpha_k w_1^2}{2} + P_1 + \rho g h_1 = \frac{\rho\alpha_k w_2^2}{2} + P_2 + \Delta P,$$

где h_1 – расстояние между сечениями 1-1 и 2-2, [м]; $P_1 - P_2$ – перепад статических давлений, измеряемый по показанию U-образного манометра 5, [Па]; w_1, w_2 – среднерасходные скорости потока в кольцевом зазоре и в выхлопном патрубке; α_k – коэффициент Кориолиса, учитывающий неравномерность распределения скорости по сечению и равный отношению истинной кинетической энергии к кинетической энергии потока, вычисленной по средней скорости. Известно, что для турбулентного режима движения газа α_k = 1,10…1,15. Принимаем α_k = 1.

После преобразований получим:

$$\Delta P = P_1 - P_2 + \rho g h_1 + 0,5\rho(w_1^2 - w_2^2).$$

Зная ΔP, можно рассчитать коэффициент гидравлического сопротивления:

$$\zeta = 2\Delta P / (\rho w_{cp}^2).$$

Оценка эффективности пылеулавливания проводилась двояко: по поданной и улавливаемой отборами циклона пыли (минорантная оценка η_{min}); по поданной и выносимой из циклона пыли (мажорантная оценка η_{max}); средняя эффективность пылеулавливания η рассчитывалась по формуле

$$\eta = (\eta_{\min} + \eta_{max}) / 2.$$

Среднее расхождение между η_{min} и η_{max} не превышало 6 %, что соответствует требованиям нормативных документов, по которым ошибка измерения эффективности очистки не должна превышать 10 % [7]. При определении плотности воздуха его влажность не учитывали, так допускаемая при этом ошибка не превышает 0,5 %. В табл. 1 приведены средние характеристики испытанного циклона ПЦПО. Опыты с углом установки лопаток $\gamma = 18°$ проводились авторами работы [3].

На рис. 2 представлена регрессионная зависимость эффективности очистки от угла установки лопаток ОНА, полученная в пакете Statgraphics Plus:

$$\eta = 46,088 + 2,548\gamma - 0,045\gamma^2, \qquad (1)$$

где угол задан в градусах. Критерии достоверности регрессии (7): коэффициент детерминации R^2, критерий Дарбина Уотсона DW, среднеквадратическая σ и Δ абсолютная ошибки, $n_в$ – объем выборки – приведены в табл. 2.

Видно, что использование эжектирующей насадки в виде 8 отверстий в выхлопном патрубке способствовало увеличению эффективности очистки η на 58 %.

Таблица 1

Влияние угла установки лопаток ОНА на технические характеристики циклона ПЦПО

№ опыта	z, г/м^3	w_{cp}, м/с	γ,°	ΔP, Па	η, %	Re	ζ	ρ, кг/м^3	d_m, мкм
1	22,60	5,23	18	517,99	76,71	24207,7	32,89	1,151	14
2	25,63	6,03		671,30	72,27	27948,5	31,96	1,153	
3	33,16	4,24		364,82	77,90	19884,4	34,74	1,167	
4	33,01	7,25	20	897,92	79,19	59271,5	26,59	1,284	8
5	15,84	7,11		858,88	78,65	58097,7	26,47	1,284	
6	26,43	7,01		849,12	78,69	57361,0	26,88	1,286	
7	12,58	6,91		829,60	78,86	56513,0	27,06	1,286	
8	32,59	7,17	30	878,44	82,76	58767,9	26,53	1,288	
9	14,91	7,03		849,12	80,74	57580,6	26,72	1,288	
10	19,07	6,87		819,84	81,62	56295,6	26,92	1,292	
11	28,65	7,29	35	917,44	79,67	59659,9	26,85	1,286	
12	13,65	7,14		878,40	80,45	58532,4	26,75	1,288	
13	18,21	6,94		858,88	78,85	56995,2	27,66	1,291	

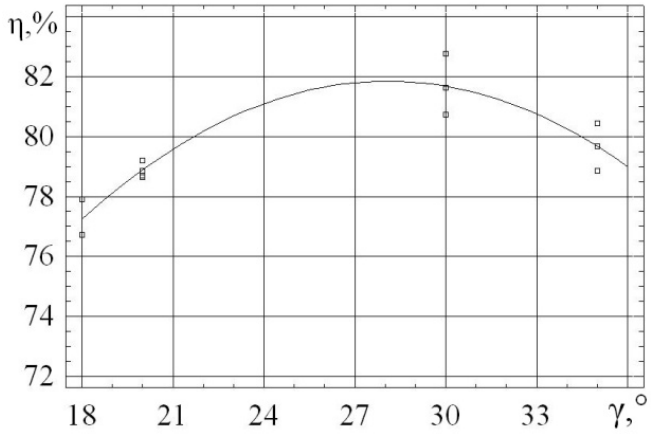


Рис. 2. Влияние угла установки лопаток γ на эффективность сепарации ПЦПО

Таблица 2

Критерии статистической значимости уравнений регрессий

Номер формулы	R^2,%	DW	σ	Δ	$n_в$
(1)	85,98	2,11	0,686	0,816	11
(2)	95,72	1,36	0,490	0,861	10
(3)	90,43	0,177	0,499	1,108	10
(4)	91,12	1,20	0,905	0,970	11
(5)	97,04	1,29	0,408	0,824	11
(6)	95,31	1,96	0,599	0,537	11

Наблюдаемое повышение эффективности сепарации η при самоотсосе части воздуха из бункера можно объяснить выравниванием профиля скоростей при входе очищенного газа в выхлопной патрубок и вследствие этого уменьшением возмущения пристенного пылевого слоя при входе в бункер.

В табл. 3 и на рис. 3 представлены экспериментальные данные по влиянию площади отверстий, через которые эжектируется воздух из бункера основного отбора пыли в поток очищенного газа, на эффективность очистки.

Таблица 3

Влияние площади эжектирующих отверстий на технические характеристики ПЦПО

D отв, мм	Площадь эжектируемых отверстий, *f*, мм^2	Δ*P*, Па	*w*, м/с	*Q*, м^3/ч	*z*, г/м^3	η $_{ПО}$, %	η $_{ВО}$, %	η, %
0	0	2540	7,12	261,808	33,605	61,54	20,97	82,51
0	0	2540	7,12	261,808	25,998	61,00	20,95	81,95
0	0	2540	7,12	261,808	12,193	60,07	19,79	79,86
0	0	2770	8,34	306,390	28,026	58,93	22,83	81,76
0	0	1820	7,28	267,439	14,397	57,16	22,58	79,74
0	0	1620	7,28	267,439	17,999	57,45	21,17	78,62
1,5	14,13	2200	7,50	212,119	9,364	59,96	27,46	86,43
1,5	14,13	2100	7,43	210,029	6,094	59,59	28,03	86,61
2	25,12	2070	7,12	201,453	3,673	59,84	27,65	87,49
2	25,12	2070	6,89	194,773	15,576	60,19	25,94	86,14
2	25,12	1770	6,73	190,189	25,172	60,78	25,48	86,26
2	25,12	2340	7,61	215,216	14,026	61,46	25,26	86,72
3	56,52	2210	7,43	210,029	6,465	60,94	25,68	86,62
3	56,52	2210	7,43	210,029	7,938	60,51	25,27	85,78

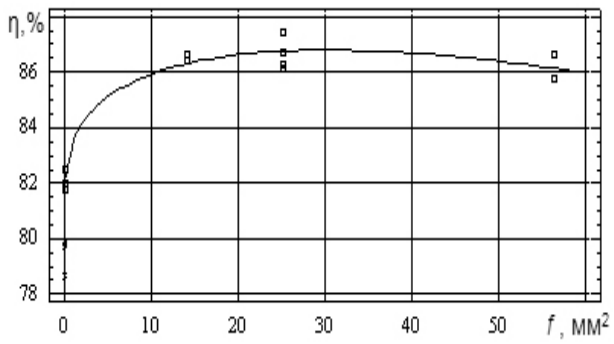


Рис. 3. Зависимость эффективности очистки ПЦПО от площади эжектирующих отверстий

При статистической обработке данных табл. 3 получены следующие уравнения регрессии:
для эффективности пылеулавливания ПЦПО

$$\eta = 82,089 + 1,715\sqrt{f} - 0,156 f\ ; \qquad (2)$$

для эффективности пылеулавливания промежуточного отбора пыли

$$\eta_{ПО} = 57,333 + 0,272 f - 0,028 f^{1,5}; \qquad (3)$$

для эффективности пылеулавливания второго отбора пыли

$$\eta_{Во} = 21,920 + 2,363\sqrt{f} - 0,254 f\ . \qquad (4)$$

Множественные уравнения регрессии, описывающие зависимости эффективности пылеулавливания ПЦПО и второго отбора $\eta_{Во}$ от расхода воздуха, запыленности потока и площади эжектирующих отверстий имеет вид:

$$\eta = 82,073 + 12,413(zfQ)^{-0,095}. \qquad (5)$$

$$\eta_{Во} = 21,920 + 120,656(zfQ)^{-0,3}. \qquad (6)$$

Критерии достоверности регрессионных зависимостей приведены в табл. 2.

Выводы

1. Согласно регрессионной модели, оптимальным углом установки лопаток ОНА является угол γ = 28,3°, при котором эффективность очистки циклона увеличивается на 4–6 %.

2. Установлено влияние площади отверстий, эжектирующих воздух из бункера второго отбора, на его эффективность пылеулавливания. Наибольшая эффективность пылеулавливания циклона соответствует диаметру эжектирующих отверстий 2 мм.

3. Получены регрессионные зависимости, прогнозирующие показатели работы прямоточного циклона с промежуточным отбором пыли при промышленной эксплуатации, пригодные для постановки оптимизационных задач на стадиях проектирования и модернизации систем пылеочистки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Красовицкий Ю. В., Батищев В. В., Иванова В.Г. Новый подход к проблеме энергосберегающего сухого пылеулавливания при производстве строительных материалов // Строительные материалы. 2004.№ 4. С. 2.
2. Банит Ф. Г., Мальгин А. Д. Пылеулавливание и очистка газов в промышленности строительных материалов. М. : Мир, 1979. 164 с.
3. Асламова В. С., Аршинский М. И., Брагин Н. А., Жабей А. А. Исследование прямоточного циклона с промежуточным отбором пыли // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2009. № 6. С. 37–38.
4. Асламова В. С., Асламов А. А., Ляпустин П. К. Промышленные испытания группового прямоточного циклона с промежуточным отбором пыли // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2007. Т. 1. № 2(30). С. 6–8.
5. Патент RU 61156 U1, МПК B04C 3/06. Прямоточный циклон / В.С. Асламова, А.А. Асламов, П.К. Ляпустин, Т.Н. Мусева, Н.А. Брагин. ; заявитель и патентообладатель Ангарск. гос. техн. академия. Бюл. № 6. 2007.
6. Кулаков А. Ю., Кулакова И. М., Асламова В. С., Асламов А. А., Аршинский М. И. Автоматизация расчета и проектирования деталей прямоточного циклона // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. № 1. С. 110–116.
7. ГОСТ 17.2.4.06-90. Охрана природы. Атмосфера. Методы определения скорости и расхода газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнений. Введ. 1991–01–01. М. : Госкомитет по охране природы СССР, 1990.

УДК 005

Бутырин Олег Владимирович,
к. т. н., доцент кафедры «Информационные системы»
Иркутского государственного университета путей сообщения,
тел. 89086408900, e-mail: informnet@list.ru
Помогаев Игорь Евгеньевич,
аспирант кафедры «Информационные системы»
Иркутского государственного университета путей сообщения
тел. 89500528899, e-mail: alz5@mail.ru

МЕТОДИКА РАЦИОНАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ РЕЛЬСОВ РУЧНЫМИ СРЕДСТВАМИ ДЕФЕКТОСКОПИИ

O.V. Butyrin, I.E. Pomogaev

THE METHOD OF RATIONAL PLANNING CONTROL STATE OF THE RAILS BY MANUAL MEANS OF DEFECTOSCOPY

Аннотация. *Рассмотрены общие вопросы методики планирования контроля состояния рельсов ручными средствами дефектоскопии относительно заданного интервала времени при помощи решения задач линейного программирования.*

Ключевые слова: *дефектоскопия, планирование контроля, задача линейного программирования.*

Abstract. *The article consides general issues of methodology of planning control state of the rails by manual means of defectoscopy relative to a given time interval by solving linear programming problems.*

Keywords: *inspection, defectoscopy, planning of control, problem of linear programming.*

Все элементы железнодорожного пути по прочности, устойчивости и состоянию должны обеспечивать безопасное движение поездов с наибольшей скоростью, установленной для данного участка пути. Важнейшим фактором, влияющим на обеспечение безопасности движения поездов, является современный контроль состояния рельсов.

В процессе эксплуатации в рельсах по мере наработки тоннажа накапливаются внутренние усталостные дефекты. Интенсивность их появления зависит от различных факторов, таких как металлургический состав рельсовой стали, осевые нагрузки и скорость движения, состояние подрельсового основания и ряда других. С ростом частоты появления дефектов необходимо чаще проверять состояние рельсов, чтобы гарантировать своевременное выявление и устранение внутренних дефектов до возникновения опасности излома рельса. Исследования показали, что на 1000 обнаруженных и оставленных в пути дефектов приходится примерно 1,3 схода, что подчеркивает важность соответствия периодичности проверок интенсивности появления дефектов.

Предприятия, осуществляющие диагностику и контроль над безопасным движением подвижного состава, входят в структуру службы пути. В свою очередь, служба пути является самостоятельным структурным подразделением и находится в непосредственном подчинении заместителя начальника железной дороги, курирующего вопросы путевого хозяйства. Таким образом, служба пути является подсистемой системы, на которую возлагаются задачи по обеспечению безопасности и бесперебойного движения поездов с установленными скоростями и нагрузками, передаваемыми от колесной пары на рельсы.

Основными средствами, которыми осуществляется контроль рельсового хозяйства, являются дефектоскопы. Дефектоскоп – это небольшая тележка с измерительной аппаратурой, которую везут по рельсам против движения поездов, определяя состояние металла и фиксируя его дефекты.

Работа средств рельсовой дефектоскопии дистанции пути выполняется согласно графику, ежемесячно разрабатываемому руководителем участка дефектоскопии и утверждаемому начальником пути. В базу исходных данных вводится расчет годового графика работы дефектоскопных средств в соответствии с приказом 2ЦЗ [1]. На основании годового графика формируется ежемесячный и ежедневный план работы дефектоскопных средств на дистанции пути. Выполнение ежедневного плана работы дефектоскопов за сутки вводится мастером цеха дефектоскопии. Потом формируется сводная ведомость наличия дефектных рельсов по главному ходу и анализ использования дефектоскопных средств за месяц, квартал и т.д. На основании указанных выше таблиц формируется годовая статистическая отчетность. Выписки из графи-

ка заносятся в рабочие журналы дефектоскопных автомотрис и дефектоскопов.

В период с 1 по 5 число каждого месяца начальник дистанции пути или главный инженер дистанции пути рассматривает результаты работы средств рельсовой дефектоскопии за прошлый месяц в день, предусмотренный графиком для технической учебы, в присутствии всех работников участка дефектоскопии.

На составление плана графика работы дефектоскопов по дистанции Иркутск-Пассажирский на очередной месяц специалистом затрачивается в среднем от 2 до 4 рабочих дней. Это связано с большим количеством ограничений, которые необходимо учитывать при организации, планировании и проведении дефектоскопии рельсов средствами неразрушающего контроля. Основными из них являются:

- периодичность проверки каждого из путей;
- количество станций и остановочных пунктов;
- количество дефектоскопов и их модификация;
- последовательность проверки различными модификациями дефектоскопов соответствующего участка пути;
- ограниченность участка пути, подлежащего проверке на текущие сутки;
- проведение технической учебы в течение месяца;
- длительность выходных и праздничных дней;
- общая протяженность дистанции пути.

Если рассматривать ручные средства дефектоскопии как ресурсы, необходимые для обеспечения своевременного выявления, устранения внутренних дефектов до возникновения опасности излома рельса, то решение задачи распределения ресурсов обеспечивает возможность эффективного планирования графика работы дефектоскопных средств на основе определенных критериев оптимизации. Учитывая, что расположение участков, проверяемых ручными средствами дефектоскопии, удалено относительно расположения цеха дефектоскопии, на дистанции пути организовывают пункты хранения тележек. В таких случаях целесообразнее планировать работу по проверке рельсового хозяйства ручными средствами дефектоскопии от пунктов их хранения на текущую дату. Одним из критериев в этом случае является время прибытия к месту проведения проверки как специалистами цеха дефектоскопии, так и техническими средствами проведения контроля состояния рельсового хозяйства.

Известно, что большинство задач с детерминированными данными решаются совокупностью таких разделов математики, как математическое программирование и теория графов. При этом в качестве ограничений таких задач рассматриваются различные виды ресурсов. Наиболее исследованным и широко применяемым на практике методом решения задач поиска оптимальных решений в статической постановке является линейное программирование (ЛП) [2]. В этом случае целевая функция линейна, а множество, на котором ищется экстремум целевой функции, задается системой линейных равенств и (или) неравенств.

Введем следующие обозначения:

d – продолжительность планируемого периода по обслуживанию участков путевого хозяйства в границах дистанции пути железной дороги; e – общее число участков пути, располагающихся на территории дистанции пути; y_{ij} – подлежащие определению неизвестные переменные, равные 1, если i-й дефектоскоп планируется для проверки на j-м участке дистанции пути в данную дату планируемого периода, и равные 0 в противном случае; r_{ij} – время следования j-го ручного дефектоскопа на i-ый участок, подлежащий планируемой проверке; w_i – минимальное количество ручных средств дефектоскопии, необходимое для проверки всех участков дистанции пути в i-й планируемый день; g_j – число проверок, которое необходимо провести на заданном участке пути в течении планируемого периода по обслуживанию участков путевого хозяйства в границах дистанции пути железной дороги – как правило, в течении месяца; q_j – периодичность проверки по каждому участку пути в соответствии с g_j для этого участка – устанавливается периодами с одинаковой продолжительностью, равными отношению продолжительности планируемого периода проверки d к числу проверок g_j; V – интервал дней из планируемого периода проверки, когда не ведутся работы по определению дефектов рельсов на заданных участках пути по причине выходных, праздничных дней или проведения учебных мероприятий.

В соответствии с принятыми обозначениями и характером решаемой задачи целевая функция имеет вид

$$\sum_{i=1}^{d}\sum_{j=1}^{e} r_{ij} y_{ij}. \qquad (1)$$

Для нахождения решения задачи линейного программирования необходимо привести значение целевой функции к экстремальному значению, в заданном случае под экстремальным будет подразумеваться ее минимальное значение.

Введем ограничение, устанавливающее минимально необходимое количество ручных средств дефектоскопии на участках дистанции пути, подлежащих проверке:

$$\sum_{j=1}^{e} y_{ij} \geq w_i, \quad i = \overline{1,d}. \qquad (2)$$

Следующее ограничение позволяет учесть суммарное количество проверок на каждом из обслуживаемых участков:

$$\sum_{i=1}^{d} y_{ij} \geq g_j, \quad j=\overline{1,e} \qquad (3)$$

Далее, по определению,

$$y_{ij} = 0,1, \quad i=\overline{1,d}, j=\overline{1,e}. \qquad (4)$$

Таким образом, сформулированная задача (1)–(4) сводится к задаче булевого программирования с $d \times e$ неизвестными переменными и $d+e$ ограничениями-неравенствами. Для ее решения могут быть использованы, например, методы Гомори или ветвей и границ [2].

Дополнительное ограничение, позволяющее равномерно распределить каждую следующую проверку для участка в соответствии с указанной продолжительностью интервала:

$$\sum_{i=l-q_j+1}^{l} y_{ij} = 1, \quad l=\overline{q_j,d}, \quad j=\overline{1,e}, \qquad (5)$$

где q продолжительность интервала между проверками.

Продолжительность интервала q зависит от количества проверок для соответствующего участка пути. Так, при 2-разовой проверке участка железнодорожного пути соответствующего направления продолжительность интервала между проверками составит 1415 дней. В соответствии с установленными для каждого участка нормативными требованиями продолжительность интервала равна:

$$q = \begin{cases} 14, \textit{если } g_j = 2, \\ 9, \textit{если } g_j = 3, \\ 7, \textit{если } g_j = 4, \ j=\overline{1,e}. \end{cases} \qquad (6)$$

Таким образом, задача булева программирования (1)–(4) в указанной ситуации преобразуется в задачу целочисленного программирования (1)–(5).

При планировании работы, в том числе и при составлении графика проверки железнодорожного пути ручными дефектоскопами следует учитывать выходные, праздничные и учебные дни, когда не ведутся работы по проверке участков пути. Следующее ограничение является модификацией системы ограничений (2):

$$\sum_{j=1}^{e} y_{ij} = 0, \quad i \in V, \quad i=\overline{1,d}. \qquad (7)$$

При решении конкретных проблем возможны ситуации, когда имеющихся ресурсов окажется недостаточно для осуществления проверки рельсового полотна железной дороги дистанции пути в текущий момент времени, что повлечет превышение возможностей подразделения дефектоскопии. На формальном уровне это требует модификации ограничений (2) и (3), выраженной в формулах (8) и (9) соответственно.

$$\sum_{j=1}^{e} y_{ij} + p_i \geq w_i, \quad i=\overline{1,d}, \qquad (8)$$

$$\sum_{i=1}^{d} y_{ij} + o_j \geq g_j, \quad j=\overline{1,e}. \qquad (9)$$

Здесь новые неизвестные целые переменные p_i и o_j в математическом смысле могут трактоваться как искажения, искусственно привнесенные в задачу (1)–(4) в случае ее некорректности [3]. При этом в соответствии с теорией решения некорректных задач целевую функцию (1) следует заменить на следующую:

$$\sum_{i=1}^{d}\sum_{j=1}^{e} r_{ij} y_{ij} + \sum_{i=1}^{d} p_i + \sum_{j=1}^{e} o_j \to min, \qquad (10)$$

которая будет гарантировать суммарную минимальность указанных искажений.

Ограничение (4) дополняется следующим: p_i, o_j – целые, $i=\overline{1,d}$, $j=\overline{1,e}$.

В результате построенные модели позволят своевременно реагировать на нештатные ситуации посредством принятия управленческих решений в следующих задачах:

- прогнозировать различные варианты составления графика проведения проверок средствами ручной дефектоскопии;
- на основе данных прогноза осуществлять определение требуемого числа дефектоскопных тележек или других средств ручной дефектоскопии;
- минимизировать общее время составления плана-графика проведения проверок средствами ручной дефектоскопии;
- автоматизировать сквозной учет проведения проверок всеми средствами дефектоскопии;
- повысить эффективность функционирования подразделений дефектоскопии за счет снижения временных, трудовых и материальных издержек.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. О совершенствовании системы контроля состояния рельсов средствами дефектоскопии : приказ МПС № 2ЦЗ от 25.02.1997 г. / Министерство путей сообщения Российской Федерации. Департамент пути и сооружений. – М., 1997. 28 с.
2. Сетевая энциклопедия Википедия [электронный ресурс]. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki. (Дата обращения 24.09.2012).
3. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М. : Наука, 1979. 288 с.

УДК 631.563.2

Павлов Игорь Олегович,
к. т. н., доцент кафедры информационных технологий моделирования и управления федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Воронежская государственная технологическая академия»
Воронова Елена Васильевна,
к. т. н., программист центра новых информационных технологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Воронежская государственная технологическая академия»
тел.: (4732) 66-21-67, 89036568581, e-mail: e-lena_B@inbox.ru

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОМАССООБМЕНА В ПРОЦЕССЕ СУШКИ

I.O. Pavlov, E.V. Vorornova

ANALYSIS OF RESULTS OF MATHEMATICAL MODELING HEAT AND MASS TRANSFER IN THE DRYING PROCESS

Аннотация. *Представлен метод и получено решение задачи конвективной сушки зерна в численно-аналитической форме для системы уравнений А.В. Лыкова путем представления искомых потенциалов модифицированными рядами Фурье. Это позволяет определять поля температур и влагосодержания зерна. Проведено сравнение полученного решения с известным решением А.В. Лыкова.*

Ключевые слова: *зерно, конвективная сушка, тепломассообмен.*

Abstract. *A method and the solution of the problem of convective drying of grain in the numerical-analytic form for the Lykov's system by submitting the required potentials with modified Fourier series are obtained. This allows to define the fields of temperature and moisture content of the grain. A comparison of the solution with the Lykov's solution is given.*

Keyword: *grain, convective drying, heat and mass transfer.*

Развитие теории тепломассопереноса обязано главным образом работам академика А.В. Лыкова и его школы, создавшим все возможности для широкого внедрения в инженерную практику аналитических и экспериментально-аналитических методов расчета процессов тепломассопереноса в системах с твердой фазой.

При конвективной сушке система дифференциальных уравнений в частных производных дополняется условиями неоднозначности в виде граничных условий третьего рода.

Для описания динамики процесса используются уравнения А.В. Лыкова [1] в предположении о бесконечно малой величине общего градиента давления. Поэтому основными характеристиками нестационарного процесса сушки будут температура $\theta(t,x)$ и влагосодержание $u(t,x)$, где $t-$ время, $x-$ радиус.

В задачах такого типа используются уравнения с переменными параметрами. В качестве таких параметров могут приниматься эмпирические коэффициенты теплообмена α и влагообмена β, а также коэффициент диффузии влаги $a_m(t)$. Математическое описание процесса сушки зерна еще усложняется, так как зерно неоднородно по структуре и составу. Подвижной слой влажного зерна рассматривается как сплошная среда, когда исследованию подлежат температурное поле и поля влагосодержания.

Рассмотрим алгоритм решения данной задачи в аналитической форме с помощью модифицированных рядов Фурье [2, 3], а затем сравним полученное решение с решением А.В. Лыкова [1].

За основу возьмем систему уравнений А.В. Лыкова [1], представленную в сферической системе координат в безразмерной форме:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = A_{11}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial T}{\partial r}\right) - A_{12}\left(\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial U}{\partial r}\right),$$
$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = -A_{21}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial T}{\partial r}\right) + A_{22}\left(\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial U}{\partial r}\right), \quad (1)$$
$$(U, T) \geq 0, \quad (U,T) < \infty \quad \text{при} \quad r \to 0 \quad r \in [0,1],$$
$$\tau \in [0,\ \tau_k],$$

с граничными условиями третьего рода на шаровой поверхности:

$$\left.\frac{\partial T(r,\tau)}{\partial r}\right|_{r=1} - a_1(1 - T(r,\tau)\big|_{r=1}) +$$
$$+a_2(1 - U(r,\tau)\big|_{r=1}) = 0,$$
$$-\left.\frac{\partial U(r,\tau)}{\partial r}\right|_{r=1} + b_1(1 - T(r,\tau)\big|_{r=1}) + \quad (2)$$
$$+b_2(1 - U(r,\tau)\big|_{r=1}) = 0,$$

с начальными условиями:

$$T(r,0) = 0,\ U(r,0) = 0, \quad (3)$$

где комплексы критериев определяются уравнениями:

$$A_{11} = 1 + \varepsilon\,\mathrm{KoLu\,Pn},\ A_{12} = \varepsilon\mathrm{KoLu},$$
$$A_{21} = \mathrm{LuPn},\ A_{22} = \mathrm{Lu},\ a_1 = \mathrm{Bi_q},$$
$$a_2 = (1-\varepsilon)\mathrm{KoLuBi_m},\ b_1 = \mathrm{Pn\,Bi_q},$$
$$b_2 = \mathrm{Bi_m}(1 - (1-\varepsilon)\mathrm{PnKoLu}),$$

а используемые критерии: $\tau = \mathrm{Fo}$, $\tau_k = \mathrm{Fo}_k$ – безразмерное текущее и конечное время; Ko – Коссовича; Lu – Лыкова; Pn – Поснова; Fo – число Фурье; теплообменный и массообменный критерии соответственно $\mathrm{Bi_q}$, $\mathrm{Bi_m}$.

Для решения задачи (1)(3) будем использовать два метода. M_1: метод разложения неизвестных функций по модифицированным рядам Фурье [2, 3]; M_2: метод интегральных преобразований Лапласа и разложение в ряды Фурье, предложенный А.В. Лыковым и Ю.А. Михайловым.

Решение M_1

Шаг 1. Решается система обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$-z_1' + A_{1,1}z_3 - A_{1,2}z_4 = 0,$$
$$-z_2' - A_{2,1}z_3 + A_{2,2}z_4 = 0,$$
$$a_1 z_1 - a_2 z_2 + \frac{1}{3}z_3 - a_1 + a_2 +$$
$$+\sum_{m=1}^{M} z_{m+4} m\pi(-1)^m = 0,$$
$$-b_1 z_1 - b_2 z_2 - \frac{1}{3}z_4 + b_1 + b_2 -$$
$$-\sum_{m=1}^{M} z_{m+4+M} m\pi(-1)^m = 0,$$
$$\frac{(-1)^m}{m\pi}z_1' + \frac{(-1)^{m+1}}{m^3\pi^3}z_3' - \frac{1}{2}z_{m+4}' -$$
$$-A_{1,1}\left[\frac{1}{2}\pi^2 m^2 z_{m+4} + \frac{(-1)^m}{m\pi}z_3\right] +$$
$$+A_{1,2}\left[\frac{1}{2}\pi^2 m^2 z_{m+4+M} + \frac{(-1)^m}{m\pi}z_4\right] = 0,$$
$$m = 1, \ldots, M,$$
$$\frac{(-1)^m}{m\pi}z_2' + \frac{(-1)^{m+1}}{m^3\pi^3}z_4' - \frac{1}{2}z_{m+4+M}' +$$
$$+A_{2,1}\left[\frac{1}{2}\pi^2 m^2 z_{m+4} + \frac{(-1)^m}{m\pi}z_3\right] -$$
$$-A_{2,2}\left[\frac{1}{2}\pi^2 m^2 z_{m+4+M} + \frac{(-1)^m}{m\pi}z_4\right] = 0.$$
$$m = 1, \ldots, M,$$

с начальными условиями

$$z_i(0) = 0,\ i = 1, \ldots, N,$$

где M – число членов ряда, $N = 2M + 4$ – общее количество уравнений.

Шаг 2. Записываем решение в общем виде:

$$T(r,\tau) = \phi(\tau) + \phi_1(\tau)\left(\frac{1}{6}r^2 - \frac{1}{6}\right) +$$
$$+\frac{1}{r}\sum_{m=1}^{M} T_m(\tau)\sin(m\pi r),$$
$$U(r,\tau) = \psi(\tau) + \psi_1(\tau)\left(\frac{1}{6}r^2 - \frac{1}{6}\right) +$$
$$+\frac{1}{r}\sum_{m=1}^{M} U_m(\tau)\sin(m\pi r),$$

где $T_m(\tau) = T_{m+4}(\tau)$, $U_m(\tau) = U_{m+4+M}(\tau)$, $m = 1 \ldots M$, $\phi(\tau) = z_1(\tau)$, $\psi(\tau) = z_2(\tau)$, $\phi_1(\tau) = z_3(\tau)$, $\psi_1(\tau) = z_4(\tau)$.

Решение системы алгебраических и обыкновенных дифференциальных уравнений можно получить аналитически методом интегральных преобразований Лапласа, методом Эйлера или численными методами РунгеКутты [4].

Решение M_2

Шаг 1. Согласно алгоритму решения уравнения А.В.Лыкова [1], корни μ_n находятся из характеристического уравнения:

$$Q_{n_2}P_{n_1} - Q_{n_1}P_{n_2} = 0, \quad (4)$$

где $Q_{nj} = \dfrac{\nu_j\mu_n}{\mathrm{Bi_q}}\cos\nu_j\mu_n + \left[1 - \dfrac{1}{\mathrm{Bi_q}} + (1-\nu_j^2)K_1\right] \times$
$\times \sin\nu_j\mu_n;$

$$P_{nj} = \left[(1-\nu_j^2) - \mathrm{Fe}\right]\frac{\nu_j \mu_n}{\mathrm{Bi_m}}\cos\nu_j\mu_n +$$

$$+\left[1-(1-\nu_j^2) - \frac{(1-\nu_j^2)+\mathrm{Fe}}{\mathrm{Bi_m}}\right]\sin\nu_j\mu_n;$$

$$\nu_j^2 = \frac{1}{2}\left[\left(1+\mathrm{Fe}+\frac{1}{\mathrm{Lu}}\right) + (-1)^j\sqrt{(1+\mathrm{Fe}+\frac{1}{\mathrm{Lu}})^2 - \frac{4}{\mathrm{Lu}}}\right],$$

где $K_1 = \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}\mathrm{Lu}\frac{\mathrm{Bi_q}}{\mathrm{Bi_m}}$; $\mathrm{Fe} = \varepsilon\,\mathrm{Ko}\,\mathrm{Pn}$ – критерий Федорова, $j = 1,\ 2$.

Шаг 2. Записываем решение:

$$T(r,\tau) = 1 - \sum_{n=1}^{\infty}\left(C_{n_1}\frac{\sin\nu_2\mu_n\frac{r}{R}}{\frac{r}{R}} - C_{n_2}\frac{\sin\nu_1\mu_n\frac{r}{R}}{\frac{r}{R}}\right)\times$$

$$\times\exp(-\mu_n^2\tau),$$

$$U(r,\tau) = 1 -$$

$$-\sum_{n=1}^{\infty}\left[C^*_{n_2}(1-\nu_1^2)\frac{\sin\nu_1\mu_n\frac{r}{R}}{\frac{r}{R}} - C^*_{n_1}(1-\nu_2^2)\frac{\sin\nu_2\mu_n\frac{r}{R}}{\frac{r}{R}}\right]\times$$

$$\times\exp(-\mu_n^2\tau)$$

где $C_{nj} = 2\frac{P_{nj} + \varepsilon\mathrm{Ko}(Q_{nj} - K_1 P_{nj})}{\mu_n\psi_n}$,

$$C^*_{nj} = \frac{1}{\varepsilon\mathrm{Ko}}C_{nj},$$

$$\nu_j^2 = \frac{1}{2}\cdot\left(1+\mathrm{Fe}+\frac{1}{\mathrm{Lu}}\right) +$$

$$+\frac{1}{2}\cdot(-1)^j\sqrt{(1+\mathrm{Fe}+\frac{1}{\mathrm{Lu}})^2 - \frac{4}{\mathrm{Lu}}},$$

$$\psi_n = \nu_1 P_{n_2} A_{n_1} + \nu_2 Q_{n_1} B_{n_2} - \nu_1 P_{n_1} A_{n_2} - \nu_1 Q_{n_2} B_{n_1},$$

$$A_{nj} = \left[1+(1-\nu_j^2)K_1\right]\cos\nu_j\mu_n - \frac{\nu_j\mu_n}{\mathrm{Bi_q}}\sin\nu_j\mu_n,$$

$$B_{nj} = (1-\nu_j^2)\cos\nu_j\mu_n -$$

$$-\left[(1-\nu_j^2)+\mathrm{Fe}\right]\frac{\nu_j\mu_n}{\mathrm{Bi_m}}\sin\nu_j\mu_n,$$

$$Q_{nj} = \frac{\nu_j\mu_n}{\mathrm{Bi_q}}\cos\nu_j\mu_n +$$

$$+\left[1-\frac{1}{\mathrm{Bi_q}}+(1-\nu_j^2)K_1\right]\sin\nu_j\mu_n$$

$$P_{nj} = \left[(1-\nu_j^2) - \mathrm{Fe}\right]\frac{\nu_j \mu_n}{\mathrm{Bi_m}}\cos\nu_j\mu_n +$$

$$+\left[1-(1-\nu_j^2) - \frac{(1-\nu_j^2)+\mathrm{Fe}}{\mathrm{Bi_m}}\right]\sin\nu_j\mu_n.$$

Средние значения потенциалов переноса теплоты и вещества в шаре вычисляются по соотношениям M_1 и M_2:

$$\overline{T}(\tau) = \frac{3}{R^3}\int_0^R r^2 T(r,\tau)dr,\ \overline{U}(\tau) = \frac{3}{R^3}\int_0^R r^2 U(r,\tau)dr\ .$$

Для сравнения решений в качестве базовых взяты значения критериев $\varepsilon = 0,5$, $\mathrm{Ko} = 1,2$, $\mathrm{Pn} = 0,5$, $\mathrm{Bi_m} = 10$. Критерии Лыкова и теплообменный критерий Био выбирались соответственно из множеств $\mathrm{Lu} = \{0,1;\ 0,3;\ 0,5;\ 0,7;\ 1.0\}$ и $\mathrm{Bi_q} = \{1;\ 5;\ 10;\ 15;\ 20\}$. В табл. 1 приведены корни характеристического уравнения (4) из литературного источника [1, табл. 6.33].

Проводились вычисления по программам, реализующим алгоритм M_1 и M_2 в системе Maple 9.5, и сравнение по всем вариантам табл. 1. В качестве одного из примеров приводим сравнение результатов расчета для критериев $\varepsilon = 0,5$, $\mathrm{Ko} = 1,2$, $\mathrm{Pn} = 0,5$, $\mathrm{Bi_m} = 10$, $\mathrm{Lu} = 0,3$, $\mathrm{Bi_q} = 10$ – строка 8 табл. 1. Получены значения корней характеристического уравнения $\mu_1 = 1,81664$, $\mu_2 = 3,20370$, $\mu_3 = 3,61264$, $\mu_4 = 5,52769$, на рис. 1 приведен график характеристического уравнения (4). Принятый для анализа случай характерен тем, что полученные значения корней имеют некоторое отличие от данных литературного источника [1].

Для проведения сравнения в алгоритме А.В. Лыкова использованы корни, полученные решением характеристического уравнения в системе Maple 9.5. Результаты, полученные по программам, отличаются не более чем на 1 %. На рис. 2 и 3 приведен графический анализ результатов работы обоих алгоритмов. В табл. 2 приведены численные значения температуры и влагосодержания на поверхности зерна, а в табл. 3 – среднее значение температуры и влагосодержания.

Проведенное исследование подтвердило пригодность применения метода модифицированных рядов Фурье для решения задач тепломассопереноса путем сравнения с известным решением А.В. Лыкова.

Предлагаемый метод отличается от метода А.В. Лыкова тем, что отсутствует необходимость вычисления корней характеристического уравнения. Доказано, что подобные ряды Фурье обладают свойством повышенной сходимости и допус-

кают возможность почленного дифференцирования [3].

Применение модифицированных рядов Фурье для решения подобных задач позволяет получить приближенное решение в аналитическом виде с любой заданной точностью при минимальных вычислительных затратах на ЭВМ [5].

Таблица 1

Корни характеристического уравнения в зависимости от критериев Lu и Bi_q

($\omega_{=0,5}$; Ko = 1,2; Pn = 0,5; $Bi_m = 10$)

Lu	Bi_q	μ_n			
		$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$
0,1	1	0,8798	1,6202	1,7714	2,6881
	5	0,8846	1,7841	3,6251	4,5726
	10	0,8851	1,7836	2,7066	2,8718
	15	0,8852	1,7834	2,7006	2,9772
	20	0,8853	1,7833	2,6990	3,0297
0,3	1	1,3413	1,8552	2,9306	4,4007
	5	1,4701	2,7410	4,4733	5,7429
	10	1,4788	2,9750	4,4946	7,6040
	15	1,4814	3,0075	3,0671	4,5028
	20	1,4827	2,9811	3,1443	4,5072
0,5	1	1,4348	2,2685	3,4996	5,1359
	5	1,7845	2,9899	3,5529	5,4716
	10	1,8166	3,2037	3,6126	5,5277
	15	1,8263	3,2675	3,6523	5,5421
	20	1,8309	3,2955	3,6777	5,5486
0,7	1	1,4605	2,6800	3,7602	5,5923
	5	1,9594	3,2621	3,8992	6,0763
	10	2,0239	3,4217	4,0194	6,1816
	15	2,0440	3,4681	4,0814	6,2023
	20	2,0537	3,4890	4,1168	6,2106
1,0	1	1,4753	3,2987	3,8529	6,0609
	5	2,0906	3,8079	4,0596	6,5239
	10	2,1967	3,8267	4,3272	6,7084
	15	2,2320	3,8297	3,4369	6,7667
	20	2,2495	3,8309	4,4943	6,7930

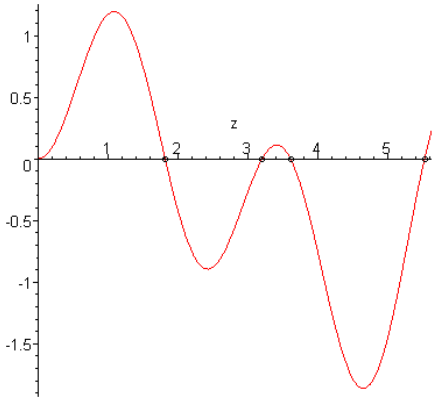


Рис. 1. График корней характеристического уравнения

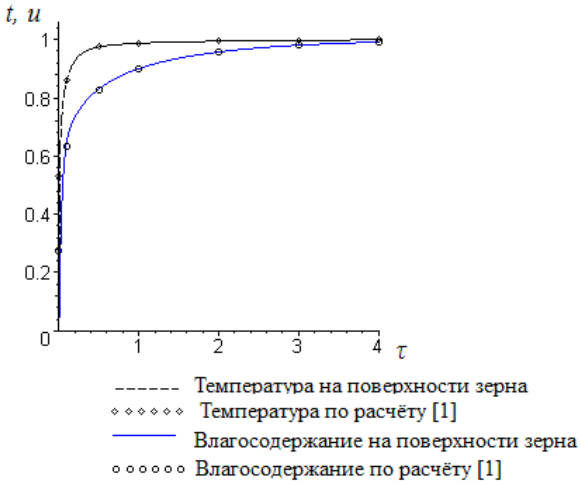


Рис. 2. Значения температуры и влагосодержания на поверхности зерна

Таблица 2

Значение температуры и влагосодержания на поверхности зерна

Время	Температура			Влагосодержание		
	Расчетн.	Эксперим.	Абс.погрешность	Расчетн.	Эксперим.	Абс.погрешность
0,10	0,8649	0,8584	0,0065	0,6553	0,6316	0,0237
0,50	0,9748	0,9744	0,0004	0,8301	0,8283	0,0018
1,00	0,9871	0,9870	0,0001	0,9003	0,8999	0,0004
2,00	0,9945	0,9945	0,0000	0,9571	0,9570	0,0001
3,00	0,9975	0,9975	0,0000	0,9805	0,9804	0,0001
4,00	0,9989	0,9988	0,0001	0,9911	0,9911	0,0000

Таблица 3

Средние значения температуры и влагосодержания на поверхности зерна

Время	Температура			Влагосодержание		
	Расчетн.	Эксперим.	Абс. погрешность	Расчетн.	Эксперим.	Абс. погрешность
0,10	0,6087	0,5968	0,0119	0,1550	0,1492	0,0058
0,50	0,9403	0,9396	0,0007	0,4403	0,4391	0,0012
1,00	0,9695	0,9694	0,0001	0,6359	0,6353	0,0006
2,00	0,9866	0,9865	0,0001	0,8361	0,8359	0,0002
3,00	0,9939	0,9939	0,0000	0,9253	0,9251	0,0002
4,00	0,9972	0,9972	0,0000	0,9659	0,9658	0,0001

Примечание В качестве экспериментальных значений приняты значения температуры и влагосодержания, вычисленных по алгоритму M_2. Сравнение результатов проводилось при $\tau > 0$.

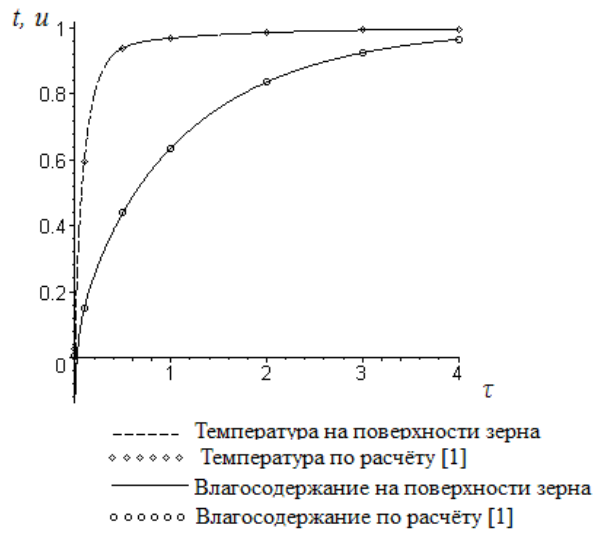


Рис. 3. Средние значения температуры и влагосодержания на поверхности зерна

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лыков А. В., Михайлов Ю. А. Теория тепло- и массопереноса. М.-Л. : Госэнергоиздат, 1963.
2. Шевцов А. А., Павлов И. О., Воронова Е. В., Бритиков Д. А. Применение модифицированных рядов Фурье для решения уравнений Лыкова // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов : материалы Междунар. науч.-техн. семинара. Воронеж : ВГЛТА, 2010. С. 106–108.
3. Чернышов А. Д. Улучшенные ряды Фурье и граничные функции // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики : сб. трудов Междунар. конф. Воронеж, июнь 22-24. Воронеж, 2009. Ч. 2. С. 236–238.
4. Котляр Я. М. Методы и задачи тепломассообмена. М. : Машиностроение, 1987.
5. Свидетельство № 2010613333 об офиц. Рег. Прогр. для ЭВМ Россия, Расчёт полей температуры и влагосодержания для процесса нестационарной сушки зерна методом модифицированных радов Фурье / Шевцов А. А., Павлов И. О., Воронова Е. В., Бритиков Д. А. ; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. № 2010611441 ; заявл. 22.03.2010; опубл. 20.05.2010.

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
Герасимов Дмитрий Олегович,
инженер кафедры электропривода и электрического транспорта НИ ИрГТУ,
тел.(3952)405238, e-mail: gerasimovdo@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУСКА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С ДВИГАТЕЛЯМИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Yu.V. Konovalov, D.O. Gerasimov

THE RESEARCH OF ELECTRIC DRIVES WITH ALTERNATING CURRENT ENGINES START-UP

Аннотация. *Представлены результаты исследований пуска электроприводов с двигателями переменного тока при различных уровнях напряжения и нагрузки на валу в программной среде MATLAB. Выполнена оценка активной и реактивной энергии двигателя, а также тепловой энергии ротора во время пуска при различных условиях.*

Ключевые слова: *исследование пуска, двигатели переменного тока, MATLAB, активная энергия, реактивная энергия, тепловая энергия ротора.*

Abstract. *Results of researches of start-up of electric drives with alternating current engines are presented at various levels of voltage and loading on a shaft in program MATLAB environment. The estimation of active and jet energy of the engine, and also thermal energy of a rotor during start-up is executed under various conditions.*

Keywords: *start-up research, alternating current engines, MATLAB, active energy, jet energy, rotor thermal energy.*

При пуске мощных электроприводов как с синхронными (СД), так и с асинхронными (АД) приводными электродвигателями (ЭД) возникают следующие проблемы:

1. Режим пуска мощных электротехнических комплексов с ЭД приводит к значительным затратам электроэнергии, что сопряжено с бросками пусковых токов в 5÷10 раз больше номинальных. Протекание повышенных токов по элементам схемы электроснабжения приводит к значительным потерям напряжения в этих элементах.

2. Постоянная времени нагрева в ЭД большой мощности достигает нескольких часов. Поэтому при повторном пуске через время, меньшее, чем то, за которое активные материалы и изоляция ЭД остынут до установившейся температуры окружающей среды, будет происходить перегрев этих элементов и преждевременный выход из строя дорогостоящих электротехнических комплексов. Поэтому такие установки допускают пуск из «горячего» состояния один раз в сутки, что ограничивает возможность использования этих агрегатов в качестве потребителей регуляторов [1].

3. Необходима оценка условий самозапуска таких электромеханических комплексов с ЭД при кратковременных перерывах электроснабжения [1, 2, 3].

Среди известных способов ограничения пусковых токов в настоящее время широко используется пуск при пониженном регулируемом напряжении через тиристорный регулятор напряжения (ТРН), через устройства плавного пуска (УПП) и с использованием преобразователей частоты [4].

Действительно, пуск при пониженном напряжение позволяет ограничить пусковой ток и решает первую проблему. Однако при пониженном напряжении приводной двигатель развивает меньший момент на валу, что приводит к увеличению длительности пуска и практически не приводит к уменьшению энергии, затрачиваемой при пуске.

Так как процесс пуска при различных условиях длится разное время, то для возможности сравнения разных агрегатов будем оценивать его относительным временем пуска ($t_{П*}$) в долях механической постоянной. Значение механической постоянной времени агрегата «двигатель-механизм» определяется из основного уравнения движения электропривода:

$$M = M_C + M_\partial = M_C + J \cdot \frac{d\omega}{dt}, \qquad (1)$$

где M – развиваемый электромагнитный момент электродвигателя, для СД он складывается из момента асинхронного режима и момента, обусловленного возбуждением; M_C – момент сопротивле-

ния на валу; $M_\partial = J \cdot \frac{d\omega}{dt}$ – динамический момент на преодоление момента инерции движущихся масс (J). Процесс пуска будет успешным, если момент, развиваемый двигателем, больше момента сопротивления, т.е. выполняется условие

$$M - M_C = M_\partial = J \cdot \frac{d\omega}{dt} > 0 .$$

Выразим динамический момент через скольжение (s) с учетом того, что угловая частота вращения может быть представлена выражением $\omega = \omega_0 - \omega_0 \cdot s = \omega_0 \cdot (1 - s)$:

$$\begin{aligned} M_\partial &= J \cdot \frac{d\omega}{dt} = J \cdot \frac{d(\omega_0 \cdot (1-s))}{dt} = \\ &= J \cdot \omega_0 \cdot \frac{d(1-s)}{dt} = -J \cdot \omega_0 \cdot \frac{ds}{dt}. \end{aligned} \quad (2)$$

Выражение динамического момента в о. е. имеет вид

$$\begin{aligned} M_{\partial *} &= \frac{M_\partial}{M_H} = -\frac{J \cdot \omega_0}{M_H} \cdot \frac{ds}{dt} = \\ &= -\frac{J \cdot \omega_0 \cdot \omega_H}{P_H} \cdot \frac{ds}{dt} = -T_J \cdot \frac{ds}{dt}, \end{aligned} \quad (3)$$

где ω_0 – синхронная угловая частота вращения; ω_H – номинальная угловая частота вращения вала электродвигателя; P_H – номинальная полезная мощность на валу; T_J – механическая постоянная времени агрегата «двигатель-механизм», которая для АД вычисляется по формуле [5]

$$T_J = \frac{J \cdot \omega_0 \cdot \omega_H}{P_H}, \quad (4)$$

а для СД

$$T_J = \frac{J \cdot \omega_0^{\,2}}{P_H}. \quad (5)$$

По уравнению (3) можно определить время, соответствующее изменению скольжения от s_1 до s_2, в секундах (t) или о. е. (t_*):

$$t = -T_J \cdot \int_{s_1}^{s_2} \frac{1}{M_{\partial *}} ds \text{ или } t_* = \frac{t}{T_J} = -\int_{s_1}^{s_2} \frac{1}{M_{\partial *}} ds . \quad (6)$$

Если предположить, что $M_\partial = M_H$, следовательно $M_{\partial *} = 1$, то для разгона агрегата от начала пуска ($\omega = 0$, $s_1 = 1$) до синхронной частоты вращения ($\omega = \omega_0$, $s_2 = 0$) потребуется время:

$$t_П = -T_J \cdot \int_{s_1}^{s_2} \frac{1}{M_{\partial *}} ds = T_J . \quad (7)$$

Для выбега от синхронной частоты вращения ($\omega = \omega_0$, $s_1 = 0$) до остановки агрегата ($\omega = 0$, $s_2 = 1$) при динамическом моменте $M_{\partial *} = -1$ потребуется время:

$$t_B = -T_J \cdot \int_{s_1}^{s_2} \frac{1}{M_{\partial *}} ds = -T_J \cdot \int_0^1 \frac{1}{-1} ds = T_J . \quad (8)$$

Таким образом, механическую постоянную времени можно взять за базисную величину при определении относительного времени пуска $t_{П*} = t_П / T_J$ или выбега $t_{B*} = t_B / T_J$, которые будут равны $t_{П*} = t_{B*} = 1$ при изменении скольжения от 0 до 1 и от 1 до 0 и при $|M_{\partial *}| = 1$.

При пуске АД и асинхронном пуске СД активная мощность, потребляемая двигателем из сети, расходуется на потери в статоре, на потери в роторе и на создание вращающего момента на валу. Выполним оценку потерь активной мощности в цепи ротора через потери активной энергии в обмотке ротора (W_2). В соответствии с законом Джоуля Ленца потери энергии составляют $W_2 = P_P \cdot t_П = I_2^2 \cdot R_2 \cdot t_П$. Так как ток ротора ($I_2$) при пуске изменяется, то для определения энергии за время пуска ($t_П$) необходимо перейти к бесконечно малым величинам и выполнить интегрирование выражения $dW_2 = I_2^2(t) \cdot R_2 \cdot dt$. Для вычисления энергии, соответствующей изменению скольжению в процессе пуска от 1 до 0, заменим dt выражением из (3): $dt = -\frac{T_J}{M_{\partial *}} ds$. В результате преобразования получим: $dW_2 = -I_2^2(t) \cdot R_2 \frac{T_J}{M_{\partial *}} ds$. Интегрирование этого выражения дает:

$$W_2 = -T_J \cdot R_2 \int_{s_1}^{s_2} \frac{I_2^2(s)}{M_{\partial *}} ds = -T_J \cdot R_2 \int_{s_1}^{s_2} \frac{I_2^2(s)}{(M_* - M_{C*})} ds . \quad (9)$$

При пуске на холостом ходу (ХХ) момент сопротивления на валу M_{C*} равен нулю, и выражение (9) значительно упрощается. Вычисление момента, развиваемого двигателем, выполним с учетом мощности скольжения и отношения $M = P / \omega$:

$$M_* = \frac{M}{M_H} = \frac{P_P \cdot \omega}{\omega \cdot s \cdot P_H} = \frac{I_2^2(s) \cdot R_2}{s \cdot P_H} . \quad (10)$$

Подставляя значение M_* из (10) в уравнение (9), при пуске на ХХ ($M_{*C} = 0$) получаем:

$$W_{20} = -T_J \cdot R_2 \int_{s_1}^{s_2} \frac{I_2^2(s)}{M_*} ds =$$

$$= -T_J \cdot R_2 \int_{s_1}^{s_2} \frac{I_2^2(s) \cdot s \cdot P_H}{I_2^2(s) \cdot R_2} ds = \qquad (11)$$

$$= -T_J \cdot P_H \int_1^0 s ds = \frac{T_J \cdot P_H}{2}.$$

Или с учетом выражения (5):

$$W_{20} = \frac{T_J \cdot P_H}{2} = \frac{J_P \cdot \omega_0^2 \cdot P_H}{P_H \cdot 2} = \frac{J_P \cdot \omega_0^2}{2}. \quad (12)$$

Следовательно, потери активной энергии в роторе в процессе пуска на XX, при изменении скольжения от 1 до 0 постоянны по величине и равны кинетической энергии ротора.

Для исследования процесса пуска выполним моделирование режимов для АД типа 4А315S4УЗ с параметрами P_{2H} = 160 кВт; U_1 = 380 кВ; f_1=50 Гц; ω_0 = 157,1 рад/с; s_H = 1,4%; s_K = 6,5%; $M_{*П}$ = 1,3; M_{*K} = 2,2; $I_{*П}$ = 6,5; $t_П$ = 0,47 с; J_P = 3,1 кг·м^2 [6] при различных условиях в программной среде MATLAB.

Механическая постоянная времени данного двигателя, в соответствии с (4), равна:

$$T_J = \frac{J \cdot \omega_0 \cdot \omega_H}{P_H} = \frac{J \cdot \omega_0 \cdot \omega_0 \cdot (1 - s_H)}{P_H} =$$

$$= \frac{3{,}1 \cdot 157{,}1 \cdot 154{,}9}{160000} = 0{,}47\,c$$

Механическая постоянная времени равна времени пуска, указанному в справочнике [6].

При выполнении моделирования длительность пуска будем вычислять в соответствии с методикой оценки длительности переходного процесса. Длительность пуска $t_П$ определим как время переходного процесса, по истечении которого текущее значение изменяющейся величины, в данном случае угловой частоты вращения $\omega(t)$, будет отличаться от своего установившегося значения ($\omega_{УСТ}$) не более чем на 3 %:

$$\frac{\left|\omega(t) - \omega_{УСТ}\right|}{\omega_{УСТ}} \le 0{,}03.$$

Схема для моделирования режимов АД типа 4А315S4УЗ в программной среде MATLAB приведена на рис. 1. Данная схема позволяет подключать исследуемый двигатель к трехфазной системе напряжения с заданными параметрами и в определенный момент времени; задавать нагрузку на валу; вычислять активную и реактивную мощности трехфазной цепи статора; осциллографировать и замерять параметры АД с помощью блока измерения переменных электрической машины; вычислять и осциллографировать действующие значения токов статора и ротора; вычислять значение квадрата тока ротора (I^2_2) для дальнейшей оценки теплового воздействия, а также выполнять построение функций всех перечисленных величин на плоттере с возможностью дальнейшей их обработки.

Результаты моделирования пуска АД мощностью 160 кВт на холостом ходу показали, что при номинальном напряжении U_H = 1 о. е. фактическая длительность пуска составляет 0,47 с, при U_H = 0,8 о. е. – 0,64 с, а при U_H = 0,2 о. е. – уже 8,94 с. Таким образом, по сравнении с пуском при номинальном напряжении, время пуска при U_H = 0,2 о. е. увеличивается практически в 19 раз.

Результаты измерений параметров пуска на XX сведены в табл.1, осциллограммы тока статора при напряжениях 1,0; 0,8; 0,4 и 0,2 приведены на рис. 2.

Таблица 1

Результаты моделирования пуска АД типа 4А315S4УЗ на холостом ходу при различных уровнях напряжения на статоре

U, о.е.	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	**1,0**	1,1	1,2	1,3
$I_П$, А	511	767	1023	1280	1536	1800	2052	2310	**2571**	2832	3093	3355
$I_{П*}$, о.е.	1,79	2,68	3,58	4,48	5,38	6,3	7,18	8,09	**9,0**	9,9	10,83	11,74
I_0, А	20,87	27,63	37,97	44,64	53,51	62,38	71,28	80,17	**89,07**	97,96	106,9	115,8
I_{0*}, %	7,3	9,7	13,3	15,6	18,7	21,8	71,28	25	**31,2**	34,3	37,4	40,5
$t_П$, с	8,94	3,92	2,22	1,43	1,01	0,80	0,64	0,52	**0,47**	0,40	0,38	0,34
$t_{П*}$, о.е.	19,02	8,34	4,72	3,04	2,15	1,70	1,36	1,11	**1**	0,85	0,81	0,72

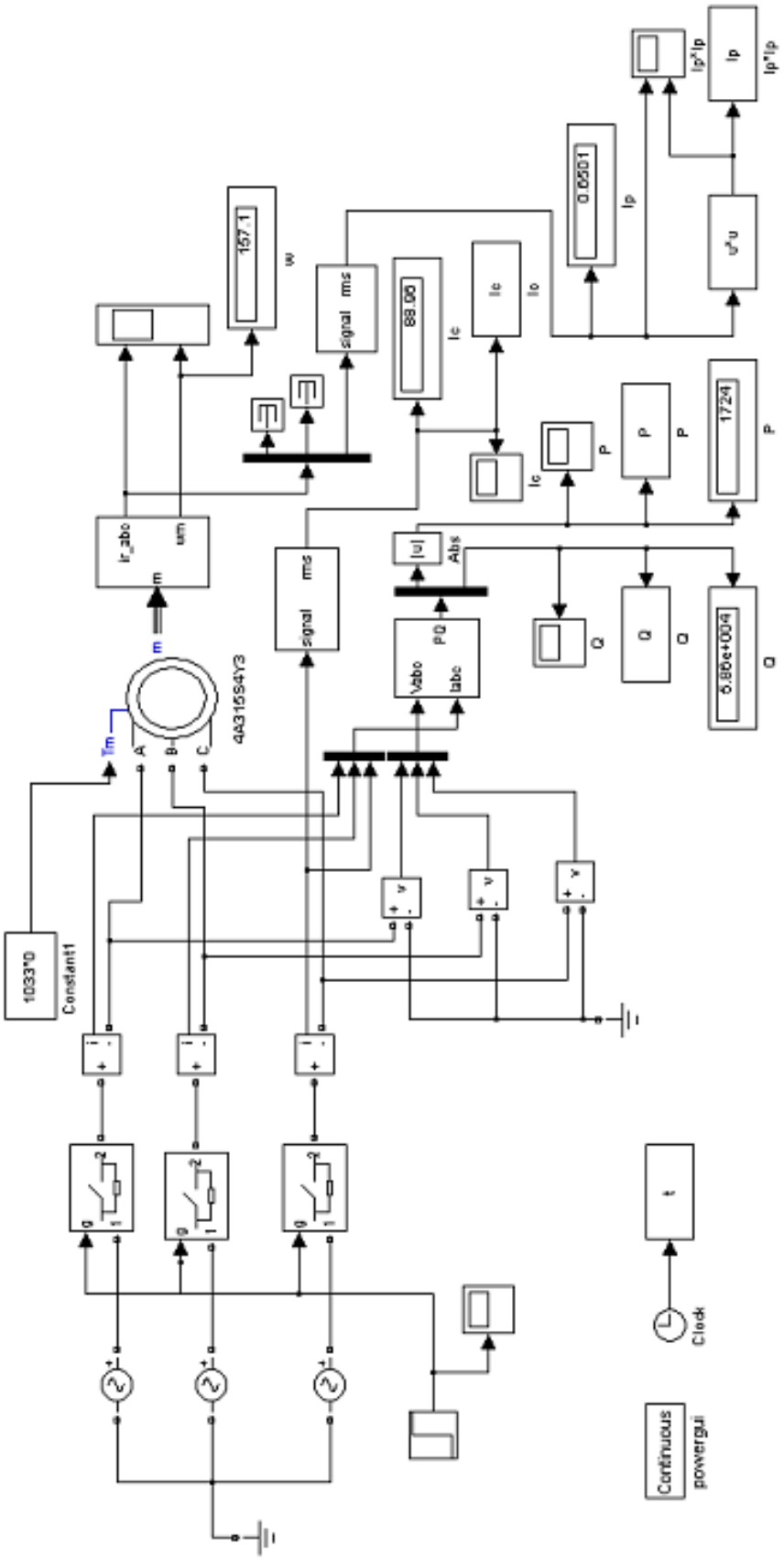


Рис. 1. Схема моделирования режимов АД типа 4А315S4У3 в программной среде MATLAB

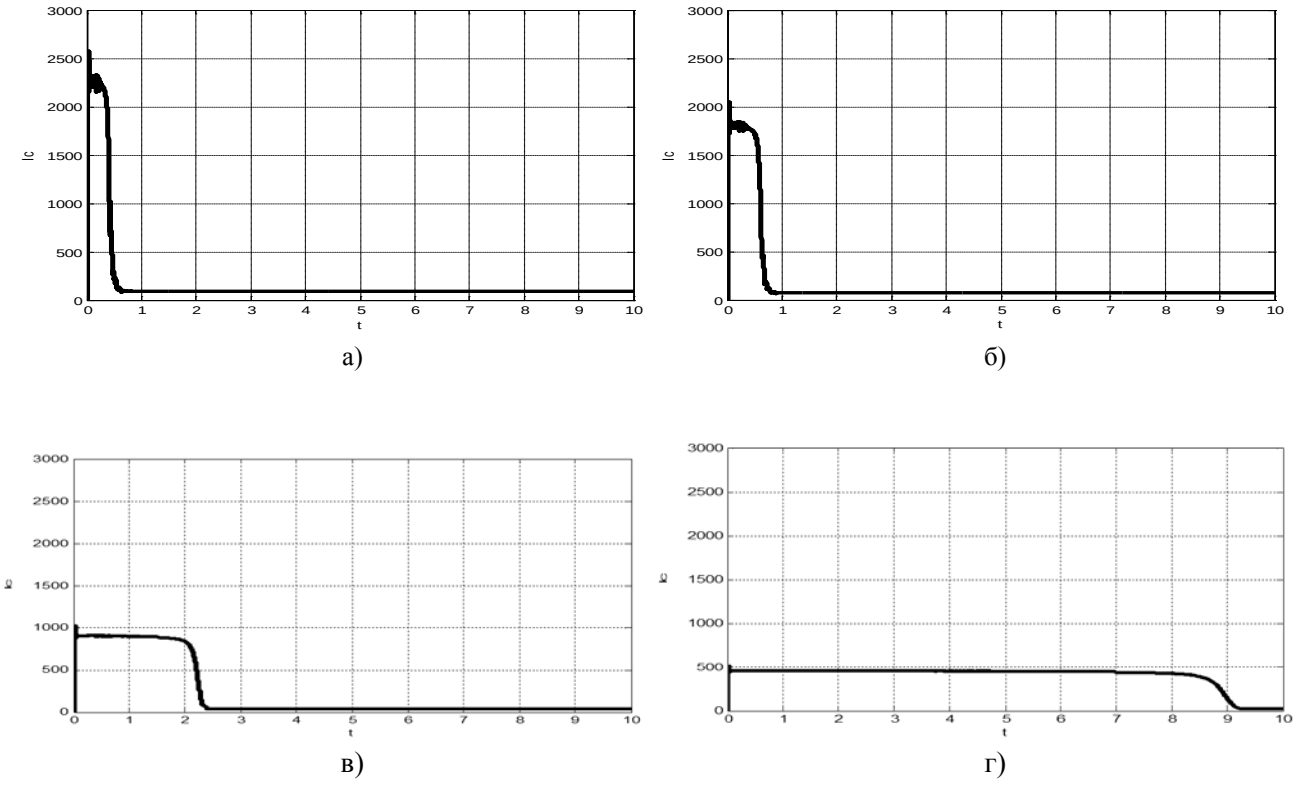


Рис. 2. Осциллограммы тока статора $I_C(t)$ на XX при напряжениях: а) U = 1,0; б) U = 0,8; в) U = 0,4; г) U = 0,2

В табл. 1 приняты следующие обозначения:

$I_П$ – максимальное значение действующего тока статора за время пуска, А;

$I_{П*} = I_П/I_H$ – максимальное значение действующего тока статора за время пуска, о.е.;

I_H – номинальное значение тока статора:

$$I_H = \frac{P_{2H}}{\sqrt{3} \cdot U_{1H} \cdot \cos\phi_H \cdot \eta_H} = \frac{160000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,91 \cdot 0,935} = 285,7\ A;$$

I_0 – ток статора на холостом ходу в установившемся режиме $I_0 = I_{C\ УСТ}$, А;

$I_{0*} = I_0/I_H$ – ток статора на холостом ходу, о. е.;

$t_П$ – длительность пуска, с;

$t_{П*} = t_П/T_J$ – длительность пуска, о. е.

Оценим потери активной энергии в роторе, а также активную и реактивную энергию, которая потребляется электродвигателем за время пуска в режиме XX при различных уровнях напряжения.

При моделировании выберем метод вычисления одношаговый, использующий модифицированную формулу Розенброка второго порядка с минимальным и максимальным шагом 0,0001 и 0,001 соответственно. Данные параметры решения позволяют получить адекватные реальным условиям результаты, приемлемое время моделирования и оптимальное использование памяти вычислительной машины.

Для вычисления энергии полученную при осциллографировании функцию изменения активной и реактивной мощности представим в виде полинома, а затем этот полином проинтегрируем по времени, где нижним пределом будет начало пуска $t = 0$, а верхним пределом – время окончания процесса пуска $t_П$ в соответствии с табл. 1. Потери активной энергии в роторе будем оценивать по «тепловой энергии ротора», представленной выражением $I_2^2 \cdot t$, где I_2 – действующее значение тока ротора.

Так как одной из задач исследования пуска является оценка теплового воздействия на электродвигатель, то при определении активной энергии будем учитывать как энергию от источника к двигателю, так и перетоки активной энергии от двигателя к источнику, возникающие при колебательном процессе пуска.

Алгоритм вычисления энергии, например активной энергии статора при U = 0,4 о. е. в режиме XX, заключается в следующем:

1) Выведенный на плоттер график функции активной мощности статора $P_1(t)$ (рис. 3, тонкая линия) интерполируем полиномом десятой

степени, дающим возможность получить наибольшее приближение полинома к исследуемой функции (рис. 3, более толстая линия):

$$P_1(t) = p_1 \cdot t^{10} + p_2 \cdot t^9 + p_3 \cdot t^8 + p_4 \cdot t^7 + $$
$$+ p_5 \cdot t^6 + p_6 \cdot t^5 + p_7 \cdot t^4 + p_8 \cdot t^3 + p_9 \cdot t^2 + $$
$$+ p_{10} \cdot t + p_{11}.$$

2) В результате интерполяции получаем значения коэффициентов полинома:
p_1 = 0,1377; p_2 = 6,3376; p_3 = 119,24; p_4 = 1155,2; p_5 = 5741,6; p_6 = 9560,6; p_7 = 36596; p_8 = $1{,}9912 \cdot 10^5$; p_9 = $3{,}1691 \cdot 10^5$; p_{10}= $1{,}6921 \cdot 10^5$; p_{11} = 75114.

3) Подставляя числовые значения коэффициентов полинома, получим для данных условий следующий вид функции активной мощности в зависимости от времени:

$$P_1(t) = -0{,}1377 \cdot t^{10} + 6{,}3376 \cdot t^9 -$$
$$-119{,}24 p_3 \cdot t^8 + 1155{,}2 \cdot t^7 - 5741{,}6 \cdot t^6 +$$
$$+9560{,}6 \cdot t^5 + 36596 \cdot t^4 -$$
$$-1{,}9312 \cdot 10^5 \cdot t^3 + 3{,}1691 \cdot 10^5 \cdot t^2 -$$
$$-1{,}6921 \cdot 10^5 \cdot t + 75114.$$

4) Интегрируя это выражение, получим активную энергию, прошедшую через двигатель за время пуска:

$$W_1 = \int_{t=0}^{t=t_П} P_1(t) \cdot dt = \int_{t=0}^{t=t_П} (p_1 \cdot t^{10} + p_2 \cdot t^9 +$$
$$+ p_3 \cdot t^8 + p_4 \cdot t^7 + p_5 \cdot t^6 + p_6 \cdot t^5 +$$
$$+ p_7 \cdot t^4 + p_8 \cdot t^3 + p_9 \cdot t^2 + p_{10} \cdot t + p_{11}) \cdot dt =$$
$$= \int_0^{2{,}22} (-0{,}1377 \cdot t^{10} + 6{,}3376 \cdot t^9 - 119{,}24 p_3 \cdot t^8 +$$
$$+ 1155{,}2 \cdot t^7 - 5741{,}6 \cdot t^6 + 9560{,}6 \cdot t^5 + 36596 \cdot t^4 -$$
$$- 1{,}9312 \cdot 10^5 \cdot t^3 + 3{,}1691 \cdot 10^5 \cdot t^2 -$$
$$- 1{,}6921 \cdot 10^5 \cdot t + 75114) \cdot dt =$$
$$= 133{,}5 \cdot 10^3 \; Вт \cdot с = 133{,}5 \; кВт \cdot с = 133{,}5 \; кДж.$$

Выполняя вычисления по данному алгоритму, результаты сведем в табл. 2, где величина *VAр·с* соответствует реактивной энергии, измеряемой в кВАр·с.

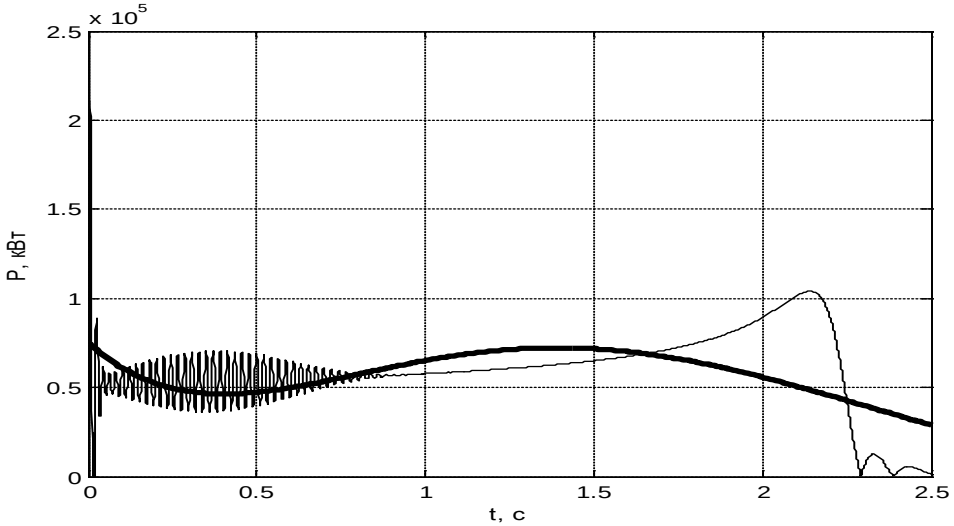


Рис. 3. График функции активной мощности статора при пуске на ХХ при U = 0,4 (тонкая линия) и полином данной функции десятой степени (более толстая линия)

Таблица 2

Результаты вычислений энергетических параметров при пуске АД типа 4А315S4УЗ на холостом ходу при различных уровнях напряжения на статоре

U, о.е.	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	**1,0**	1,1	1,2	1,3
$t_П$, с	8,94	3,92	2,22	1,43	1,01	0,80	0,64	0,52	**0,47**	0,40	0,38	0,34
W_1, кВт·с, (кДж)	174,1	136,0	133,5	132,8	132,4	141,0	145,1	146,0	**154,2**	157,8	170,8	178,2
VAр·с, кВАр·с	232,7	471,8	464,6	464,2	467,8	487,2	487,2	476,9	**492,0**	490,5	517,8	530,2
$(I_2^2 \cdot t) \cdot 10^6$, А^2·с	1,303	1,576	1,545	1,543	1,540	1,615	1,600	1,488	**1,566**	1,518	1,526	1,587

Из табл. 2 видно, что «тепловая энергия ротора» $I_2^2 \cdot t$ фактически не зависит от напряжения статора в режиме ХХ. Активная энергия ЭД на ХХ сначала уменьшается с ростом напряжения до 0,6 о. е., а затем начинает возрастать. Реактивная энергия по мере роста напряжения увеличивается.

За время пуска $t_П$ = 0,47 с при номинальном напряжении на ХХ электродвигатель потребляет активную энергию W_1 = 154,2 кДж, что в 2,05 раза больше, чем потребляемая двигателем активная энергия за то же время при номинальной нагрузке.

Результаты исследования режимов пуска при нагрузке на валу 25 % и 40 % от номинальной приведены в табл. 3 и 4 соответственно.

Таблица 3

Результаты моделирования и вычислений энергетических параметров при пуске АД типа 4А315S4УЗ при нагрузке на валу 25 % от номинальной при различных уровнях напряжения на статоре

U, о.е.	0,6	0,7	0,8	0,9	**1,0**	1,1	1,2	1,3
$I_П$, А	1535	1800	2050	2310	**2569**	2830	3092	3353
$I_{П*}$, о.е.	5,38	6,3	7,18	8,09	**9,0**	9,9	10,83	11,74
$I_{УСТ}$, А	124	114	109	109	**111**	115	120	126
$I_{УСТ*}$, %	43,4	39,9	38,2	38,2	**38,9**	40,3	42	44,1
$t_П$, с	10,32	1,73	1,06	0,75	**0,61**	0,49	0,41	0,38
$t_{П*}$, о.е.	21,96	3,68	2,26	1,60	**1,30**	1,04	0,87	0,81
W_1, кВт·с,(кДж)	1231,4	305,06	242,74	217,35	**210,09**	204,38	204,37	212,87
$VAp \cdot c$, кВАр·с	6038,2	1156,4	873,63	773,84	**739,04**	715,15	699,63	708,11
$(I_2^2 \cdot t) \cdot 10^6$, А^2·с	21,4	3,8902	2,903	2,5168	**2,4503**	2,3762	2,1998	2,1931

Таблица 4

Результаты моделирования и вычислений энергетических параметров при пуске АД типа 4А315S4УЗ при нагрузке на валу 40% от номинальной при различных уровнях напряжения на статоре

U, о.е.	0,8	0,9	**1,0**	1,1	1,2	1,3
$I_П$, А	2050	2310	**2570**	2830	3090	3352
$I_{П*}$, о.е.	7,18	8,09	**9,0**	9,9	10,83	11,74
$I_{УСТ}$, А	150	142	**138**	137	138	141
$I_{УСТ*}$, %	52,5	49,7	**48,3**	48,0	48,3	49,4
$t_П$, с	2,20	1,11	**0,77**	0,58	0,47	0,36
$t_{П*}$, о.е.	4,68	2,36	**1,64**	1,23	1,0	0,77
W_1, кВт·с, (кДж)	495,62	315,26	**268,04**	239,93	230,87	215,84
$VAp \cdot c$, кВАр·с	1941	1167,4	**962,72**	860,67	816,02	746,39
$(I_2^2 \cdot t) \cdot 10^6$, А^2·с	6,4838	3,8728	**3,1246**	2,7766	2,7005	2,3612

Анализ результатов моделирования под нагрузкой однозначно показывает, что при понижении напряжения значительно возрастают потребляемая активная и реактивная энергии ЭД, а также «тепловая энергия ротора», что приводит к повышенному нагреву двигателя, хотя и при ограничении пускового тока.

Выводы

1. Потери активной энергии в обмотке ротора при пуске на ХХ не зависят от напряжения. Следовательно, при пуске на пониженном напряжении или при регулировании напряжения во время пуска нагрев обмоток ротора не уменьшается.

2. Потери в обмотках статора зависят от длительности пуска. При пониженном напряжении время пуска увеличивается, длительность протекания увеличенного тока больше, поэтому энергия за время пуска при пониженном напряжении также увеличивается. Повышенный пусковой ток при пуске на пониженном напряжении протекает и по всем элементам схемы электроснабжения, в них также увеличивается нагрев.

3. Устройства плавного пуска (УПП), осуществляющие пуск на пониженном напряжении, нужно использовать, только если есть ограничения по величине броска пускового тока или механические ограничения. В остальных случаях с точки зрения уменьшения теплового воздействия на электродвигатели целесообразно использовать прямой способ пуска.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Возбуждение и устойчивость электромеханических комплексов с синхронными двигателями / Б. Н. Абрамович и др.; под общ. ред. Б. Н. Абрамовича. СПб. : Изд-во Политехн.

ун-та, 2010. 127 с.
2. Коновалов Ю. В. Моделирование электромеханических процессов в синхронном двигателе // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. № 4(33). С. 84–89.
3. Дунаев М.П. Комплексный метод создания экспертных систем для наладки электрооборудования // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2010. № 4(29). С.108–111.
4. Павлов В.Е. Моделирование нагрузок электроприводов типовых производственных механизмов с применением системы «Преобразователь частоты – асинхронный двигатель» // Вестник ИрГТУ. 2011. №9(56). С. 168–173.
5. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. М. : Энергоатомиздат, 1984. 240 с.
6. Асинхронные двигатели серии 4А : справочник / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. М. : Энергоиздат, 1982. 504 с.

УДК 519.237:519.711.3

Соколов Лев Александрович,
аспирант, Челябинский государственный университет, тел. 89085708253
Тырсин Александр Николаевич,
д. т. н., в. н. с., научно-инженерный центр «Надежность и ресурс больших систем машин» УрО РАН, тел. 89221007452

ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ РОБАСТНОГО ОЦЕНИВАНИЯ СТОХАСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

L.A. Sokolov, A.N. Tyrsin

INCREASING OF AUTHENTICITY OF DIAGNOSTICS OF SYSTEMS BASED ON ROBUST ESTIMATION OF STOCHASTIC TIME SERIES MODELS

Аннотация. *Показано, что робастное оценивание параметров стохастических моделей временных рядов повышает достоверность диагностирования состояния системы. Предложен алгоритм оценивания дисперсии основного распределения ошибок. Это позволяет использовать робастные процедуры оценки параметров стохастических моделей временных рядов без априорной информации о величине дисперсии основного распределения ошибок.*

Ключевые слова: *диагностика системы, оценки коэффициентов авторегрессии, оценка дисперсии, робастный метод оценивания.*

Abstract. *This paper shows that robust estimation of parameters of stochastic time series models increases the authenticity of diagnostics of system status. An algorithm of estimation of the variance of the distribution of basic errors is described. This allows using robust procedures of estimation of parameters of stochastic time series models without a priori information about a variance of basic distribution of the errors.*

Keywords: *diagnosis of system, estimations of coefficients of autoregression, estimation of variance, robust methods of estimation.*

Введение

Процессы, протекающие во многих предметных областях, можно адекватно описывать с помощью стохастических моделей авторегрессии АР(p) [1–5]

$$y_k = \sum_{i=1}^{p} a_i y_{k-i} + \varepsilon_i, \qquad (1)$$

где $\mathbf{a} = (a_1, ..., a_p)$ – вектор коэффициентов модели, p – порядок модели, ε_i – случайные ошибки, $k = 1, ..., n$.

Использование соотношения (1) в виде диагностической модели позволяет решать задачи дефектоскопии, обнаружения неисправностей, контроля качества и профилактики брака [6–10]. Когда система работоспособна, значения параметров авторегрессионной модели (1) остаются стабильными и соответствуют области значений нормальной эксплуатации. Поэтому момент зарожде-

ния дефекта в системе соответствует резкому изменению параметров модели (1). Задача заключается в том, чтобы оперативно и достоверно распознать момент зарождения дефекта в системе и тем самым предотвратить ее выход из строя.

При распознавании состояния системы могут быть ошибки двоякого рода. Ошибки первого рода можно описать как преждевременное уведомление об изменении значений коэффициентов, или «ложную тревогу». В свою очередь ошибки второго рода показывают задержку в определении момента изменения коэффициентов, или «пропуск дефекта» [11]. Для того чтобы избежать вышеуказанных ошибок, необходимо проводить оценивание параметров модели с помощью устойчивых методов. Пусть H_0 – система работает в штатном режиме, тогда H_1 – альтернативная гипотеза.

В практических задачах закон распределения ошибок редко является «чисто» нормальным, чаще в наблюдениях могут появиться выбросы, например, из-за ошибок, контролирующих состояния системы приборов, которые могут повлиять на значение параметров модели. Поэтому целесообразно в качестве закона распределения случайных ошибок в модели (1) будем рассматривать модель засорения Тьюки – Хьюбера

$$F(x) = (1-\gamma)F_{\varepsilon}(x) + \gamma H(x), \qquad (2)$$

где $F_{\varepsilon}(x)$ – функция распределения случайных ошибок ε, обладающая «хорошими» свойствами (как правило, нормальностью); H(x) – функция распределения засорений, имеющих вид выбросов, как по уровню, так и по дисперсии; γ – вероятность появления выброса. Модель (2) фактически означает, что распределение случайных ошибок состоит из смеси устойчивой средней части распределения погрешностей однократных измерений, характеризующих их обычные составляющие, и растянутых хвостов, которые учитывают относительно редкие выбросы или промахи. Иначе говоря, делается вероятностное предположение об однородности гипотетической генеральной совокупности, в которой допускается возможность появления погрешностей высокого уровня.

Следовательно, если чувствительность метода оценивания к выбросам будет велика, то может привести к ошибке первого рода, т. е. основная гипотеза H_0 (система работоспособна) будет отвергнута, хотя система функционирует нормально. С другой стороны, если метод не будет чувствителен к выбросам, то может появиться ошибка второго рода, т. е. H_0 принимается, хотя система вышла из строя.

Методика проведения исследований

Одним из таких эффективных методов является робастный метод оценивания (РМО), основанный на минимизации выпукло-вогнутой функции потерь. В качестве функций потерь здесь используют функции вида [12–14]:

$$\rho_1(x) = \lambda\left(1 - \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma}\right)^2\right)\right), \qquad (3)$$

$$\rho_2(x) = d\ \mathrm{arctg}\left(\left|\frac{x}{\sigma}\right|^{\alpha}\right),\ \alpha > 1, \qquad (4)$$

$$\rho_3(x) = \begin{cases} \frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma}\right)^2, & |x| < c, \\ c\left|\frac{x}{\sigma}\right| - \frac{1}{2}c^2, & |x| \geq c. \end{cases} \qquad (5)$$

Основным затруднением, ограничивающим использование функций потерь вида (3)(5) является присутствие неизвестных параметров (λ, σ, c, d). Их необходимо или задавать на основе априорной информации, или каким-то образом оценивать. Отметим, что преимуществом асимптотически ограниченных функций потерь вида (3) или (4) перед (5) является то, что получаемые на их основе оценки параметров модели (1) имеют меньшее смещение при несимметричных, односторонних засорениях. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать функции потерь (3) и (4).

Алгоритм оценивания коэффициентов авторегрессии

Для функций потерь (3), (4) введем соответствующие целевые функции

$$Q_1(\mathbf{a}) = \sum_{k=1}^{n}\lambda\left(1 - \exp\left(-\frac{1}{2}\left(y_k - \sum_{i=1}^{p} a_i y_{k-i}\right)^2\right)\right),$$

$$Q_2(\mathbf{a}) = \sum_{k=1}^{n} d\ \mathrm{arctg}\left(\left|\sum_{i=1}^{p}\left(y_k - a_i y_{k-i}\right)\right|^{\alpha}\right). \qquad (6)$$

Тогда для нахождения коэффициентов $\mathbf{a} = (a_1^*, ..., a_p^*)$ необходимо решить задачи

$$a_1^*, ..., a_p^* = \arg\min_{a_1,...,a_p} Q_1(\mathbf{a})$$

и

$$a_1^*, ..., a_p^* = \arg\min_{a_1,...,a_p} Q_2(\mathbf{a}) \qquad (7)$$

соответственно.

Рассмотрим решение данных задач на примере задачи (7). Из необходимого условия существования экстремума следует, что градиент искомой точке должен быть равен 0, $\nabla Q(\mathbf{a}) = 0$. Вычислим первую производную по элементу a_j:

$$\frac{\partial Q_2}{\partial a_j} = \alpha d \sum_{k=1}^{n} \left(\frac{(-y_{k-j}) sign\left(y_k - \sum_{i=1}^{p} a_i y_{k-i} \right)}{1 + \left(y_k - \sum_{i=1}^{p} a_i y_{k-i} \right)^{2\alpha}} \times \right.$$

$$\left. \times \left| y_k - \sum_{i=1}^{p} a_i y_{k-i} \right|^{\alpha-1} \right).$$

Следовательно, для нахождения экстремумов функции потерь (6) необходимо решить следующую систему уравнений:

$$\frac{\partial Q_2}{\partial a_j} = 0, \ j = 1, 2, ..., p. \qquad (8)$$

Каждое из уравнений системы является нелинейным относительно $a_1, \ldots, a_p$, и нахождение аналитического решения системы является трудоемкой задачей. Поэтому воспользуемся численными методами для решения задачи (7). Найденные решения системы (8) необходимо подвергнуть дальнейшему исследования, чтобы определить, какое из них является точкой минимума, что, в свою очередь, требует вычисления вторых производных функции (6) и определения знака определителя матрицы Гесса.

Рассмотрим алгоритм нахождения минимума для вогнутой функции потерь [13]. Проверим его работу для целевой функции (6) и модели авторегрессии вида $y_k = a_1^* y_{k-1} + \varepsilon_k$, где ε_k имеет вид (2), $a_1 = -0,3$, $\sigma^2 = 0,81$, дисперсия засорения $\sigma_1^2 = 20$, $n = 30$. С помощью перебора узловых точек [13] получили следующую оценку параметра a_1^*: $a_1 = -0,279$, а минимум функции находится в точке –0,287. Это говорит о том, что для выпукло-вогнутых функций потерь минимум целевой функции не лежит в узловых точках.

С помощью метода Монте-Карло было установлено, что узловая точка, в которой функция потерь принимает наименьшее значение, лежит в окрестности глобального минимума. Поэтому одним из способов решения задачи минимизации (7) является градиентный спуск из «наилучшей» узловой точки. В качестве начальной точки можно взять оценку, найденную методом наименьших модулей (МНМ).

Алгоритм оценивания дисперсии основного распределения ошибок

Имеем модель авторегрессии вида (1), для которой ошибки имеют закон распределения вида (2). Для оценивания вектора коэффициентов **a** воспользуемся РМО с функциями потерь ρ_1 и ρ_2. Сначала необходимо вычислить значения параметров α, λ, d для функций ρ_1 и ρ_2. Для оптимального выбора этих параметров найдем оценку $\hat{\sigma}$ среднего квадратического отклонения σ основного закона.

Найдем оценки коэффициентов авторегрессии методом, который более устойчив к выбросам, чем метод наименьших квадратов (МНК), например МНМ [16]. Обозначим вектор МНМ-оценок как $\mathbf{a}' = (a_1', ..., a_p')$. Вычисляем остатки авторегрессии $\hat{\mathbf{e}} = (\hat{e}_1, ..., \hat{e}_n)$

$$\hat{e}_k = y_k - \sum_{i=1}^{p} a_i' y_{k-i} .$$

Далее решим систему относительно β:

$$\begin{cases} F(a - q\sigma) = x_{0,5-\beta}, \\ F(a + q\sigma) = x_{0,5+\beta}. \end{cases}$$

Вычтем из второго уравнение первое

$$F(a + q\sigma) - F(a - q\sigma) = P\{ |x - a| < q\sigma \} =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{a-q\sigma}^{a+q\sigma} e^{-\frac{t-a}{2\sigma^2}} dt = 2\Phi_0(q).$$

Отсюда $x_{0,5+\beta} - x_{0,5-\beta} = 2\Phi_0(q)$ и $\beta = \Phi_0(q)$.

Упорядочим вектор остатков $\hat{\mathbf{e}}$, например, по возрастанию и найдем среднее квадратическое отклонение основного закона распределения как $\hat{\sigma} = \hat{e}_{(0,5+\beta)q} - \hat{e}_{(0,5-\beta)q} / 2q$.

Вычислив среднее квадратическое отклонение основного закона распределения, введем целевые функции:

$$Q_1^*(\mathbf{a}) = \sum_{k=1}^{n} \lambda \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{2\hat{\sigma}^2} \left(y_k - \sum_{i=1}^{p} a_i y_{k-i} \right)^2 \right) \right),$$

$$Q_2^*(\mathbf{a}) = \sum_{k=1}^{n} d \operatorname{arctg} \left(\left| \frac{1}{\hat{\sigma}} \left(y_k - \sum_{i=1}^{p} a_i y_{k-i} \right) \right|^{\alpha} \right).$$

Для оценки коэффициентов модели (1) также можно применить МНК. Поскольку регрессоры относятся к предыдущим моментам времени, а ε_i – белый шум, то корреляция регрессоров со случайным возмущением ε_i отсутствует. МНК не дает несмещенных оценок, но дает состоятельные оценки, несмотря на то, что присутствует стохастический регрессор. Если дополнительно белый шум является гауссовым, то значения y_k распределены нормально, а МНК-оценки коэффициентов состоятельны и асимптотически нормальны. Поскольку нормальность оценок достигается только асимптотически и закон распределения ошибок, описываемый моделью вида (2), представляет собой нормальное распределение с «тяжелыми хвостами», то можно считать нормированные функ-

ции Q_1^* и Q_2^* близкими к квадратичным при малых отклонениях. Тогда параметры α, λ, d можно определить, решив задачи:

$$f_1(\lambda) = \int_0^m \left[x^2 - \lambda\left(1 - \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right)\right)\right]^2 dx \longrightarrow \min_{\lambda},$$

$$f_2(d,\alpha) = \int_0^m \left[x^2 - d\,\mathrm{arctg}\left(|x|^{\alpha}\right)\right]^2 dx \longrightarrow \min_{d,\alpha}.$$

Были рассмотрены три случая, в которых функции минимизировались на отрезках $[0;1]$, $[0;1,5]$, $[0;2]$ и для каждого отрезка были найдены соответствующие α, λ и d:

1. $[0;1]$: $\min(f_1) =$ 0,00052; $\lambda = 2{,}368$,
   $\min(f_2) = 0{,}00015$; $d = 1{,}219$; $\alpha = 2{,}307$.
2. $[0;1{,}5]$: $\min(f_1) =$ 0,0183; $\lambda = 2{,}852$,
   $\min(f_2) = 0{,}0163$; $d = 1{,}456$; $\alpha = 3{,}183$.
3. $[0;2]$: $\min(f_1) = 0{,}2075$; $\lambda = 3{,}557$,
   $\min(f_2) = 0{,}3345$; $d = 1{,}867$; $\alpha = 3{,}458$.

Был проведен сравнительный анализ оценок, полученных с помощью РМО, в зависимости от длины отрезка, на котором график функции потерь должен быть наиболее близок к графику квадратичной функции. Для моделирования процесса авторегрессии АР(2) использовался метод статистического моделирования Монте-Карло, где ошибки ε_i имеют распределение (2).

Результаты моделирования показали, что наименьшая дисперсия оценок получается тогда, когда для выбора констант функций потерь рассматривается отрезок [0; 1].

Анализ методов оценивания параметров авторегрессии

Сравним методы МНК, МНМ и РМО с помощью метода Монте-Карло на примере модели авторегрессии АР(2). Рассмотрим пример. Зададим: $a_1 = 0{,}8$, $a_2 = -0{,}2$, $\sigma^2 = 0{,}81$, $\sigma_1^2 = 20$, $n = 70$, $\gamma = 0$; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3, $M = 2500$ – число испытаний. Для функции потерь Хьюбера (5) выберем значение константы c, используя правило «трех сигм», в качестве оценки $\hat{\sigma}^2$ дисперсии σ^2 возьмем теоретическое значение дисперсии основной части закона распределения. Результаты статистического моделирования – оценки коэффициентов $\hat{a}_1$, $\hat{a}_2$ и их дисперсии $\mathrm{var}^2(\hat{a}_1)$, $\mathrm{var}^2(\hat{a}_2)$ приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1

γ	Метод	$\hat{a}_1$	$\mathrm{var}^2(\hat{a}_1)$
0,1	МНК	0,783	0,0126
	МНМ	0,790	0,0094
	РМО с ρ_3	0,786	0,0090
	РМО с ρ_1	0,794	0,0114
	РМО с ρ_2	0,793	0,0091
0,2	МНК	0,792	0,0133
	МНМ	0,797	0,0071
	РМО с ρ_3	0,794	0,0080
	РМО с ρ_1	0,798	0,0058
	РМО с ρ_2	0,798	0,0057
0,3	МНК	0,787	0,0130
	МНМ	0,793	0,0054
	РМО с ρ_3	0,790	0,0075
	РМО с ρ_1	0,794	0,0049
	РМО с ρ_2	0,793	0,0051

Таблица 2

γ	Метод	$\hat{a}_2$	$\mathrm{var}^2(\hat{a}_2)$
0,1	МНК	0,201	0,0118
	МНМ	0,199	0,0091
	РМО с ρ_3	0,201	0,0084
	РМО с ρ_1	0,202	0,0107
	РМО с ρ_2	0,201	0,0085
0,2	МНК	0,206	0,0123
	МНМ	0,203	0,0066
	РМО с ρ_3	0,204	0,0073
	РМО с ρ_1	0,202	0,0054
	РМО с ρ_2	0,203	0,0053
0,3	МНК	0,205	0,0123
	МНМ	0,201	0,0052
	РМО с ρ_3	0,203	0,0070
	РМО с ρ_1	0,201	0,0048
	РМО с ρ_2	0,201	0,0049

На основе приведенных в таблице результатов можно говорить, что РМО-оценки с ρ_1 и ρ_2 имеют меньшее смещение относительно исходного значения и меньшую дисперсию.

Диагностика системы

Как уже было отмечено раннее, при диагностике системы необходимо отслеживать появление ошибок первого и второго рода. Ошибки первого рода можно описать как преждевременное уведомление об изменении значений коэффициентов, ошибки второго рода показывают задержку в определении момента изменения коэффициентов. Таким образом, сравнение методов, применяемых для диагностирования, может быть основано на сравнении количества ошибок первого и второго родов или на сравнении вероятностей их появления.

Сравнение методов проводилось на примере системы, описываемой моделью авторегресии вида (1) с порядком модели $p = 2$:

$$y_k = \begin{cases} a_1 y_{k-1} + a_2 y_{k-2} + \varepsilon_k, & k \le m, \\ b_1 y_{k-1} + b_2 y_{k-2} + \varepsilon_k, & k > m, \end{cases}$$

где $k = 1, ..., n$; m – момент изменения значений коэффициентов (изменение процесса) $(m < n)$.

В качестве законов распределения ошибок рассматривались:

- сумма двух нормальных законов, с различными дисперсиями вида (2);

- сумма нормального и равномерного законов – $(1-\gamma)N(0,\sigma^2) + \gamma R_{[a,b]}$, $\gamma \in [0;1]$;

- сумма нормального закона и закона Лапласа – $(1-\gamma)N(0,\sigma^2) + \gamma L(\alpha, 0)$, $\gamma \in [0;1]$;

Тогда ошибками первого рода можно считать отклонения от теоретических значений, больших заданного значения δ, при нахождении коэффициентов a_1 и a_2. Их вероятности обозначим как $P\left(\left|a_1 - \hat{a}_1\right| > \delta\right)$ и $P\left(\left|a_2 - \hat{a}_2\right| > \delta\right)$. Соответственно, ошибки второго рода – это отклонения от теоретических значений, больших заданного значения δ, при нахождении коэффициентов b_1 и b_2. Их вероятности обозначим, как $P\left(\left|b_1 - \hat{b}_1\right| > \delta\right)$ и $P\left(\left|b_2 - \hat{b}_2\right| > \delta\right)$. Значение δ было выбрано равным 10 % от теоретического значения соответствующего параметра, взятого по модулю. Оценки ошибок первого и второго рода, полученные с помощью статистического моделирования, для указанных выше законов распределения ошибок приведены в табл. 35 соответственно.

Таблица 3

Метод	$P\left(\left\|a_1 - \hat{a}_1\right\| > \delta\right)$	$P\left(\left\|a_2 - \hat{a}_2\right\| > \delta\right)$
МНК	0,65	0,48
МНМ	0,18	0,18
РМО с ρ_1	0,15	0,20
РМО с ρ_2	0,18	0,22
Метод	$P\left(\left\|b_1 - \hat{b}_1\right\| > \delta\right)$	$P\left(\left\|b_2 - \hat{b}_2\right\| > \delta\right)$
МНК	0,15	0,34
МНМ	0,08	0,97
РМО с ρ_1	0,07	0,12
РМО с ρ_2	0,01	0,12

Таблица 4

Метод	$P\left(\left\|a_1 - \hat{a}_1\right\| > \delta\right)$	$P\left(\left\|a_2 - \hat{a}_2\right\| > \delta\right)$
МНК	0,69	0,74
МНМ	0,12	0,40
РМО с ρ_1	0,05	0,05
РМО с ρ_2	0,15	0,00
Метод	$P\left(\left\|b_1 - \hat{b}_1\right\| > \delta\right)$	$P\left(\left\|b_2 - \hat{b}_2\right\| > \delta\right)$
МНК	0,37	0,65
МНМ	0,11	0,21
РМО с ρ_1	0,06	0,07
РМО с ρ_2	0,06	0,08

Таблица 5

Метод	$P\left(\left\|a_1 - \hat{a}_1\right\| > \delta\right)$	$P\left(\left\|a_2 - \hat{a}_2\right\| > \delta\right)$
МНК	0,59	0,38
МНМ	0,19	0,05
РМО с ρ_1	0,10	0,05
РМО с ρ_2	0,13	0,04
Метод	$P\left(\left\|b_1 - \hat{b}_1\right\| > \delta\right)$	$P\left(\left\|b_2 - \hat{b}_2\right\| > \delta\right)$
МНК	0,24	0,24
МНМ	0,14	0,11
РМО с ρ_1	0,10	0,09
РМО с ρ_2	0,13	0,09

Выводы

1. Показано, что робастное оценивание параметров стохастических моделей временных рядов повышает достоверность диагностирования состояния системы.

2. Предложен алгоритм оценивания коэффициентов авторегрессии, основанный на спуске из «наилучшей» узловой точки.

3. Предложен алгоритм оценивания дисперсии основного распределения ошибок. Это позволяет использовать робастные процедуры оценки параметров стохастических моделей временных рядов без априорной информации о величине дисперсии основного распределения ошибок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. Вып. 1. М. : Мир, 1974. 408 с.
2. Кармалита В. А. Цифровая обработка случайных колебаний. М. : Машиностроение, 1986. 80 с.
3. Бурмистров В. И., Калев О. Ф., Чернякова И. В. Математические модели в клинической кардиологии. Основы прогнозирования. Магнитогорск : МгТУ, 2005. 113 с.
4. Зотеев В. Е. Параметрическая идентификация диссипативных механических систем на основе

разностных уравнений. М. : Машиностроение, 2009. 344 с.
5. Семёнычев В. К. Идентификация экономической динамики на основе моделей авторегрессии. Самара : АНО «Изд-во СНЦ РАН», 2004. 243 с.
6. Байков И. Р., Галлямов А. К. Математические модели в трубопроводном транспорте нефти и газа. Уфа : УНИ, 1991. 69 с.
7. Никифоров И. В. Последовательное обнаружение изменения свойств временных рядов. М. : Наука, 1983. 199 с.
8. Обнаружение изменения свойств сигналов и динамических систем / под ред. М. Бассвиль, А. Банвениста. М. : Мир, 1989. 278 с.
9. Орлов А. И. Сертификация и статистические методы : обобщающая ст. // Заводская лаборатория. 1997. Т. 63, № 3, С. 55–62.
10. Panyukov A. V., Tyrsin A. N. Stable Parametric Identification of Vibratory Diagnostics Objects // Journal of Vibroengineering. 2008, vol. 10, № 2, P.142–146.
11. Биргер И. А. Техническая диагностика. М. : Машиностроение, 1978. 241 с.
12. Айвазян С. А., Енюков И. С., Мешалкин Л. Д. Прикладная статистика: Исследование зависимостей. М. : Финансы и статистика, 1985. 488 с.
13. Тырсин А. Н. Робастное построение регрессионных зависимостей на основе обобщенного метода наименьших модулей // Записки научн. семинаров ПОМИ. 2005. Т. 328. С.236–250.
14. Хьюбер П. Робастность в статистике. М. : Мир, 1984. 304 с.
15. Соколов Л. А., Тырсин А. Н., Максимов К. Е. Использование робастных методов оценивания стохастических моделей временных рядов в задачах диагностики // Математика, ее приложения и математическое образование : материалы IV Междунар. конф. Ч.2. Улан-Удэ : Изд-во ВСГТУ, 2011. С. 72–76.
16. Мудров В. И., Кушко В. Л. Методы обработки измерений. Квазиправдоподобные оценки. М. : Радио и связь, 1983. 304 с.

УДК 621.002.56

Степанов Максим Александрович,
соискатель кафедры «Прикладная механика» ИрГУПС,
тел.: (3952) 638-343, 338-343, e-mail: Stepanov_MA@irgups.ru

СПОСОБ МАГНИТНОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ, НАХОДЯЩИХСЯ В НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

M.A. Stepanov

METHOD OF MAGNETIC INSPECTION OF FERROMAGNETIC STRUCTURES UNDER TENSION

Аннотация. *Разработан способ магнитной дефектоскопии ферромагнитных конструкций, находящихся в напряженном состоянии. Может применяться на транспорте и в промышленности непосредственно в процессе эксплуатации конструкций, находящихся под нагрузкой, изготовленных из однородного ферромагнитного материала и имеющих симметричную форму профилей сечений.*

Ключевые слова: *магнитная дефектоскопия, напряженное состояние конструкций, ферромагнитные конструкции.*

Abstract. *The way of magnetic inspection of ferromagnetic structures that are in tension. Can be used in transport and industry directly in the operation of loaded structures made of a homogeneous ferromagnetic material and having a symmetrical shape profiles sections.*

Keywords: *magnetic particle inspection, the state of stress constructive functions, ferromagnetic structures.*

Автором статьи в соавторстве был разработан способ магнитной дефектоскопии изделий в напряженном состоянии (в дальнейшем способ) и получен патент на изобретение РФ [1]. Основные предпосылки разработки способа и его суть можно изложить в следующем виде.

Способ относится к области магнитной дефектоскопии в промышленности и на транспорте, в частности может быть использован при дефектоскопии в процессе эксплуатации изделий, находящихся под нагрузкой, изготовленных из однородного ферромагнитного материала и имеющих симметричную форму профилей сечений, например рельсов, металлических профилей, осей, трубопроводов и т. д.

Известен способ магнитной дефектоскопии [2], заключающийся в определении дефектов, вызванных неоднородностью материала или нарушением формы профиля, возникших при изготовлении изделия или при его эксплуатации, при этом о дефекте изделия судят по величине и месторас-

положению магнитных аномалий, регистрируемых при отклонении линии нуля напряженности магнитного поля от плоскости, положение которой нормируется по эталонному образцу. При этом, под понятием «неоднородность» подразумевается наличие разрывов (пустот, раковин) в сплошности структуры однородного по химическому составу и физическим свойствам ферромагнитного изделия. К «неоднородностям» такого рода могут быть отнесены зоны сечений в изделии, в которых в процессе эксплуатации возникают напряжения сжатия, растяжения, сдвига, являющиеся предпосылкой разрушения изделия при превышении допускаемых значений этих напряжений или вследствие усталости материала. Известный способ [2] регистрирует факт состоявшегося разрушения, не предлагая средств для предупреждения развития процесса роста местных напряжений в изделии и накопления местной усталости материала.

Техническое решение, позволяющее устранить этот недостаток, разработано с учетом известных сведений о взаимозависимости напряженного состояния и сопутствующих его появлению изменениях магнитных свойств объекта наблюдения: возникновении в нем магнитных аномалий в зонах присутствия местных механических напряжений. В частности, эта взаимозависимость проявляется в эффекте Виллари [3], согласно которому появление или изменение местных напряжений в локальных зонах сечений намагниченных изделий из ферромагнитного материала изменяет величину намагниченности материала в этих зонах.

Предлагаемый способ решает задачу обнаружения в процессе эксплуатации зон возникновения и роста местных напряжений (растяжения, сжатия, сдвига), предшествующих разрушению, в том числе от накопления усталости материала, в сечениях ферромагнитных изделий, находящихся под действием постоянной или переменной нагрузки.

Согласно способу, для изделий из ферромагнитного материала, намагниченных с образованием полюсов магнитного поля симметричного относительно геометрии профиля на оси симметрии профилей сечений по всей длине объекта наблюдения, эта задача решается тем, что об изменениях значений местных напряжений в зонах сечений судят по изменению величины магнитной индукции в попарно симметричных точках сечений на границах объекта. При этом по сравниваемым значениям индукции в указанных точках судят о наличии и характере напряженного состояния в зонах сечения; сравнение этих значений с данными, полученными по эталонным образцам, дает возможность судить об опасности превышения допускаемых напряжений и о нарастании усталостных процессов в материале объекта наблюдения. Информация о проявлениях напряженного состояния изделий может накапливаться для создания базы данных, служащей для прогнозирования развития усталостных процессов в материале изделия в ходе эксплуатации.

Способ реализуется следующим образом: производим намагничивание исследуемого объекта (с помощью постоянных магнитов или путем пропускания тока по объекту) с целью получения симметричного магнитного поля относительно геометрии профиля таким образом, чтобы получить два явно выраженных магнитных полюса на выбранной оси симметрии профиля сечения объекта. Разрешающей способностью магнитометра, привлекаемого к измерениям величины магнитной индукции, определяется потребная степень намагничивания или остаточная напряженность магнитного поля. Длина участка намагничивания исследуемого объекта выбирается таким образом, чтобы в зоне работы датчика магнитометра было получено однородное магнитное поле, отвечающее чувствительности средств измерения. Значения магнитной индукции в выбранных для исследования попарно симметричных точках профиля сечения на границах объекта наблюдения измеряются и передаются на устройство сравнения или обрабатываются вручную.

Технический результат реализации способа заключается в возможности обеспечения оперативного выявления и оценки местных напряжений в материале конструкций с помощью стационарных и мобильных технических средств. При этом опасные значения напряжений, возникающих в процессе эксплуатации, могут быть определены непосредственно в момент их проявления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. №2441227 Российская Федерация, RU 2 441 227 C1, МПК G01N 27/72 (2006.1). Способ магнитной дефектоскопии изделий в напряжённом состоянии / Степанов А.П., Милованов А.И., Степанов М.А. ; заявитель и патентообладатель Иркут. гос. ун-т путей сообщен. № 2010121417/28, заявл. 26.05.2010, опубл. 27.01.2012, Бюл. № 3. 3 с.
2. Пат. №2387983 Российская Федерация, RU 2 387 983 C1, МПК G01N 27/82 (2006.01). Способ магнитной дефектоскопии / Степанов А.П., Степанов М.А., Милованов А.И., Саломатов В.Н., Лопатин М.В. ; заявитель и патентообладатель Иркут. гос. ун-т путей сообщен. № 2008143039/28, заявл. 29.10.2008, опубл. 27.04.2010, Бюл. № 12. 5 с. : ил.
3. Allphysics.ru. Физика для всех : сайт. 2012. URL: http://www/allphysics.ru (Дата обращения 15.08.2012)

УДК 550.388.2+519.237.7

Гефан Григорий Давидович,
к. ф.-м. н., доцент кафедры «Математика» ИрГУПС,
тел.: 8(3952) 638-354,
Иванов Всеволод Борисович,
д. ф.-м. н., профессор кафедры радиофизики ИГУ,
тел.: 8-964-816-4650
Горбачев Олег Анатольевич,
д. т. н., директор Иркутского филиала МГТУ ГА,
тел.: 8-902-511-6868

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЛОБАЛЬНОЙ СТАТИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ В ИОНОСФЕРЕ, ОСНОВАННОЙ НА МЕТОДЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ И ПРЕДНАЗНАЧЕННОЙ ДЛЯ СИСТЕМ СПУТНИКОВОЙ РАДИОНАВИГАЦИИ

G.D. Gefan, V.B. Ivanov, O.A. Gorbachev

THE RESEARCH OF THE GLOBAL STATISTICAL MOLEL OF THE TOTAL ELECTRON CONTENT IN THE IONOSPHERE BASED ON THE METHOD OF NATURAL ORTHOGONAL FUNCTIONS AND AIMED FOR SATELLITE NAVIGATION SYSTEMS

Аннотация. *Представлена глобальная статистическая (эмпирическая) модель полного электронного содержания в ионосфере (GEMTEC) и проведены исследования по выбору параметров, обеспечивающих оптимальное соотношение между точностью и «компактностью» этой модели. Реализация модели GEMTEC представляет собой блок числовых данных размером в несколько десятков килобайт и небольшой программный код. Такая реализация легко размещается в современных навигационных приемниках.*

Ключевые слова: *ионосферное запаздывание радиосигналов, метод естественных ортогональных функций, модель полного электронного содержания в ионосфере.*

Abstract. *The global statistical (empirical) model of the total electron content in the ionosphere (GEMTEC) is presented, research on choice the parameters capable of the optimal accuracy-compactness ratio of this model is done. Implementation of the GEMTEC model on a personal computer is a compact construction containing some tens kilobytes of numerical data and small amount of software. This model can be easily implemented in the modern navigational receivers.*

Keywords: *ionosphere delay of radio signals, method of natural orthogonal functions, model of the total electron content in the ionosphere.*

Введение

Разнообразные методы ионосферного моделирования разрабатывались в течение нескольких десятилетий в первую очередь в интересах прогнозирования распространения декаметровых радиоволн. В последние годы задача моделирования полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере вновь стала актуальной в связи с использованием спутниковых навигационных приемников GPS/ГЛОНАСС. Дело в том, что ошибка позиционирования потребителя в значительной степени зависит от дополнительного запаздывания радиосигналов при их распространении в околоземной космической плазме (ионосфере). Добиться повышения точности определения координат потребителя можно путем адекватной коррекции этого запаздывания непосредственно в приемниках. Если говорить о приемниках, работающих в одночастотном режиме, то единственным средством коррекции дополнительного запаздывания является информация о текущем состоянии ионосферы. Речь, конечно, идет не о прямых измерениях ио-

носферных параметров в реальном времени и их передаче приемнику, а о применении прогностических моделей этих параметров. Такие модели должны поставлять значения ПЭС на луче, соединяющем приемник и передатчик на спутнике, для заданных приближенных координат пользователя, времени, а также геофизических и гелиофизических данных.

При разработке системы GPS была предусмотрена возможность такой коррекции с использованием упрощенной модели ионосферы Клобучара [1]. С целью дальнейшего повышения точности позиционирования потребителей, использующих одночастотную аппаратуру, авторы настоящей работы предложили глобальную эмпирическую модель ПЭС (GEMTEC), представив убедительные свидетельства ее преимущества перед моделью Клобучара [2, 3]. Однако модель GEMTEC зависит от ряда параметров, которые существенно влияют на ее «компактность» и точность, что следует иметь в виду при практической реализации данной методики в навигационных приемниках. Поэтому целью настоящей работы является выбор таких параметров модели GEMTEC, которые обеспечили бы оптимальное соотношение между точностью модели и ее «компактностью».

В настоящее время функционирует ряд центров сбора и обработки данных, поставляющих информацию о вертикальных ПЭС. Такие данные находятся в открытом доступе с середины 1998 года. Информация сообщается в виде так называемых IONEX-файлов, которые представляют собой массивы числовых значений ПЭС по широтно-долготным сеткам с дискретностью по времени в 2 часа [4].

В модели GEMTEC [2] для сжатия исходной базы данных и сглаживания случайных вариаций нами было предложено применение метода естественных ортогональных функций (ЕОФ). Метод обеспечивает компактное представление изменений ПЭС в зависимости от следующих факторов: времени в сутках, месяца в году, географических широты и долготы, а также уровня солнечной активности, задаваемого индексом интенсивности радиоизлучения Солнца на длине волны 10,7 см (индекс $F_{10.7}$). Методика применения разложения по ЕОФ не является общеизвестной, поэтому далее приводится достаточно подробное ее описание с учетом специфики ионосферного моделирования.

Метод естественных ортогональных функций

Пусть имеется N наборов измерений величины $f(n, x)$, которая зависит от фактора x и от совокупности других факторов, символизируемых номером набора $n = \overline{1, N}$. В каждом наборе измерений переменная x принимает значения $x_1, x_2, ..., x_{k_0}$, а другие факторы неизменны. Для каждого набора измерений записывается разложение

$$f^n(x) = \sum_{i=1}^{i_0} b_i^n y_i(x), \qquad (1)$$

где $y_i(x)$ – естественные ортогональные функции, одинаковые для всех наборов данных, а b_i^n – коэффициенты разложения, характеризующие набор данных с номером n и не зависящие от x. Коэффициенты b_i^n несут в себе информацию обо всех факторах, кроме фактора x.

Если число членов разложения $i_0 = k_0$, то разложение (1) будет точным, а при $i_0 < k_0$ – приближенным.

Рассмотрим определение $y_i(x)$ и b_i^n для $i = \overline{1, i_0}$, $n = \overline{1, N}$. Из условия ортогональности функций $y_i(x)$ можно показать, что

$$b_i^n = \sum_{k=1}^{k_0} f^n(x_k) y_i(x_k). \qquad (2)$$

Система ортогональных функций может быть найдена из условия

$$\mathbf{A} y_i = \lambda_i y_i, \quad i = \overline{1, i_0},$$

где y_i – искомые векторы (ортогональные функции), $\mathbf{A}$ – автокорреляционная симметрическая матрица размера $k_0 \times k_0$:

$$\mathbf{A} = \{A_{kp}\} = \left\{ \sum_{n=1}^{N} f_k^n f_p^n \right\}. \qquad (3)$$

Таким образом, y_i являются собственными векторами, а λ_i – собственными числами матрицы $\mathbf{A}$. При этом наибольший вклад в разложение (1) дают слагаемые с теми y_i, собственные числа которых λ_i максимальны. Следовательно, если обрывать ряд ($i_0 < k_0$), то надо расположить собственные числа в порядке убывания, т. е. $\lambda_1 > \lambda_2 > ...$, и в качестве системы ортогональных функций взять первые i_0 собственных векторов.

Пусть для моделируемого ПЭС имеются медианные (средние по каждому месяцу s) данные для суточного интервала местного времени t (с заданной дискретностью) и для фиксированного набора уровней солнечной активности F, сетки широт ϕ и долгот λ:

$$f = f(t, s, F, \phi, \lambda).$$

Представим эти данные в виде разложения

$$f(t, s, F, \phi, \lambda) = \\ = \sum_{i}^{l_1}\sum_{j}^{l_2}\sum_{k}^{l_3}\sum_{m}^{l_4} X_i(t)Y_{ij}(s)\Phi_{ijk}(\phi)Z_{ijkm}(F)L_{ijkm}(\lambda), \quad (4)$$

где $X_i(t)$ – ЕОФ местного времени t, $Y_{ij}(s)$ – ЕОФ месяца s, $\Phi_{ijk}(\phi)$ – ЕОФ широты ϕ, $Z_{ijkm}(F)$ – ЕОФ уровня солнечной активности F, $L_{ijkm}(\lambda)$ – коэффициенты разложения, зависящие уже только от долготы λ.

Нахождение ЕОФ проводится поэтапно. На первом этапе определяется система ЕОФ местного времени. Для этого представляем

$$f(t, s, F, \phi, \lambda) = \sum_{i=1}^{p_0} W_i(s, F, \phi, \lambda)X_i(t) \quad (5)$$

(здесь p_0 – число градаций по времени), по всем имеющимся суточным ходам определяем автокорреляционную матрицу $\boldsymbol{A}$, находим ее собственные векторы – систему ортогональных функций по времени $X_i(t)$. После этого находим коэффициенты $W_i(s, F, \phi, \lambda)$:

$$W_i(s, F, \phi, \lambda) = \sum_{p=1}^{p_0} f(t_p, s, F, \phi, \lambda)X_i(t_p). \quad (6)$$

Ряд (5) обрываем, оставив l_1 собственных векторов с наибольшим собственными числами. Критерием обрыва ряда (5) является достижение достаточной точности разложения при существенном сжатии информации.

На втором этапе определяем ЕОФ сезона. Каждый из полученных l_1 коэффициентов $W_i(s, F, \phi, \lambda)$ представляем в виде

$$W_i(s, F, \phi, \lambda) = \sum_{j=1}^{l_2} U_{ij}(F, \phi, \lambda)Y_{ij}(s). \quad (7)$$

ЕОФ сезона $Y_{ij}(s)$ находятся через сезонные ходы коэффициентов $W_i(s, F, \phi, \lambda)$. Таким образом, мы получаем l_1 систем ортогональных функций сезона, причем число удерживаемых членов в каждой системе принято одинаковым и равным l_2. Коэффициенты в разложении (7) определяются по формуле

$$U_{ij}(F, \phi, \lambda) = \sum_{p=1}^{p_0} W_i(s_p, F, \phi, \lambda)Y_{ij}(s_p) \quad (8)$$

(здесь p_0 – число градаций по сезонам). Итак, система ЕОФ по сезону – это $l_1 \times l_2$ p_0-мерных векторов.

На третьем этапе определяем ЕОФ широты ϕ. Каждый полученный коэффициент $U_{ij}(F, \phi, \lambda)$ представляем в виде ряда

$$U_{ij}(F, \phi, \lambda) = \sum_{k=1}^{l_3} Q_{ijk}(F, \lambda)\Phi_{ijk}(\phi). \quad (9)$$

Ортогональные функции широты $\Phi_{ijk}(\phi)$ вычисляются через широтные ходы коэффициентов $U_{ij}(F, \phi, \lambda)$. Получаем l_2 систем ЕОФ широты, число удерживаемых членов в каждой системе равно l_3. Теперь p_0 – число градаций по широте так, что система ЕОФ по широте – это $l_1 \times l_2 \times l_3$ p_0-мерных векторов. Коэффициенты $Q_{ijk}(F, \lambda)$ рассчитываются по формуле

$$Q_{ijk}(F, \lambda) = \sum_{p=1}^{p_0} U_{ij}(F, \phi_p, \lambda)\Phi_{ijk}(\phi_p). \quad (10)$$

На четвертом этапе определяются ЕОФ солнечной активности F. Каждый полученный коэффициент $Q_{ijk}(F, \lambda)$ представляем в виде ряда

$$Q_{ijk}(F, \lambda) = \sum_{m=1}^{l_4} L_{ijkm}(\lambda)Z_{ijkm}(F). \quad (11)$$

Ортогональные функции $Z_{ijkm}(F)$ находятся через имеющиеся коэффициенты $Q_{ijk}(F, \lambda)$ по солнечной активности. Получаем l_3 систем ЕОФ солнечной активности. Число удерживаемых членов в каждой системе равно l_4. Сетка по солнечной активности содержит p_0 градаций, так что система ЕОФ по солнечной активности – это $l_1 \times l_2 \times l_3 \times l_4$ p_0-мерных векторов.

После этого находим коэффициенты $L_{ijkm}(\lambda)$:

$$L_{ijkm}(\lambda) = \sum_{p=1}^{p_0} Q_{ijk}(F_p, \lambda)Z_{ijkm}(F_p). \quad (12)$$

Теперь все необходимые значения найдены, и формула (4) превращается в основное соотношение, определяющее моделируемое значение ПЭС в зависимости от рассматриваемых факторов.

Оптимизация модели

Дискретность в суточном ходе составляет 2 часа в соответствии с временным шагом в IONEX-файлах. Поэтому полное количество собственных функций по времени равно 12. Входные данные в сезонном ходе (по месяцам) формировались для каждого месяца усреднением по всем дням. Таким образом, полное число собственных функций по сезону также равно 12. Географическая сетка по широтам выбрана от 70° северной широты до 70° южной широты с шагом в 10° (т. е. для разложения по широте может быть использовано 15 ЕОФ). Для каждого месяца из анализируемого набора использовался среднемесячный индекс солнечной активности $F_{10.7}$. Значения индекса, охватывающие

все месяцы всех лет от 1999 до 2009 года, группируются в 7 узлов, отстоящих друг от друга на 18,3 единицы. В узлах такой сетки значения ПЭС определялись с использованием линейной интерполяции по ближайшим значениям, содержащим данный узел.

Таким образом, система ЕОФ по солнечной активности может содержать до $12 \times 12 \times 15 \times 7 = 15200$ семимерных векторов. Таким же будет и число коэффициентов $L_{ijkm}(\lambda)$, зависящих от долготы (каждый такой коэффициент представляет собой 12-мерный вектор, т. к. число точек по долготной сетке с шагом в 30 градусов равно 12). При таких параметрах модель будет абсолютно точно воспроизводить исходные данные. Оптимизация модели состоит в том, чтобы, ограничивая разложения (5), (7), (9), (11) как можно меньшим числом членов, добиться значительного сжатия информации при допустимой потере точности воспроизведения данных.

На первом этапе подбор параметров модели проводился эвристически. Было замечено, что точность модели сильно зависит от узлов сетки, но во многих узлах в качестве грубого приближения достаточно удерживать $l_1 = 3$ члена разложения по времени (рис. 1), $l_2 = 3$ члена разложения по сезону (рис. 2), $l_3 = 2$ члена разложения по широте (рис. 3) и всего лишь $l_4 = 1$ член разложения по солнечной активности (рис. 4).

Рис. 1. Суточный ход ПЭС (апрель, широта 40˚, долгота 0˚, активность Солнца 124,9)

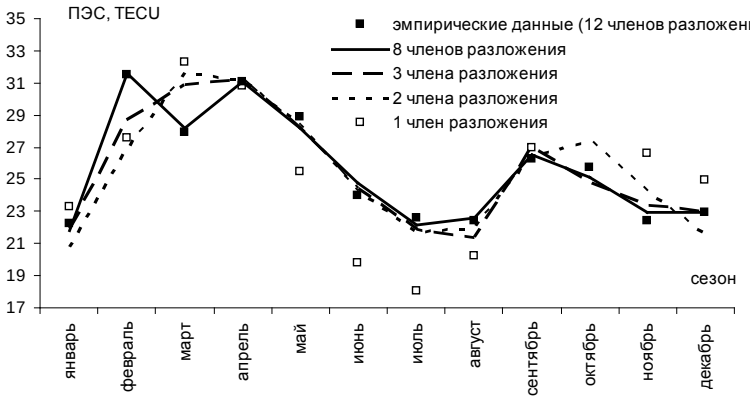


Рис. 2. Сезонный ход ПЭС (мировое время 11 час, активность Солнца 124,9, широта 40˚, долгота 0˚)

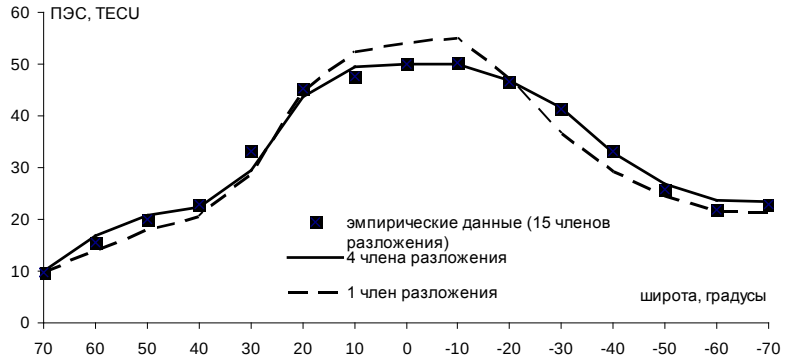


Рис. 3. Широтный ход ПЭС (мировое время 11 час, активность Солнца 124,9, долгота 0˚, декабрь)

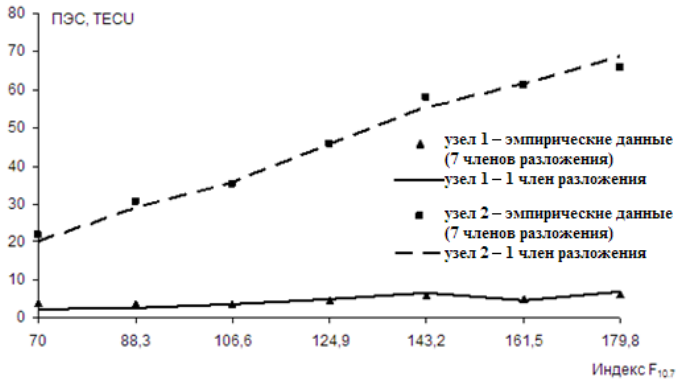


Рис. 4. Зависимость ПЭС от солнечной активности (узел 1 – январь, мировое время 1 час, широта 50˚, долгота 0˚; узел 2 – июль, мировое время 13 час, широта 0˚, долгота 0˚)

На всех рисунках ПЭС измеряется в единицах TECU (Total Electron Content Unit = 10^{10} см$^{-2}$). Однако такой вариант дает неудовлетворительно высокую относительную погрешность в узлах с низким значением ПЭС. Была реализована следующая схема оптимизации. В нескольких характерных узлах сетки модель была проверена при максимальном числе членов разложений на абсолютное соответствие модельных результатов исходным данным. Затем последовательно уменьшалось число ЕОФ по времени, сезону, широте и солнечной активности так, чтобы погрешность оставалась в заданных пределах. Например, для обеспечения относительной погрешности во всех узлах сетки не более 2 % необходимо задавать $l_1 = 5$, $l_2 = 8$, $l_3 = 9$, $l_4 = 4$. Более экономичными являются варианты

$l_1 = 5$, $l_2 = 4$, $l_3 = 5$, $l_4 = 4$ (вариант 1),

$l_1 = 5$, $l_2 = 5$, $l_3 = 4$, $l_4 = 4$ (вариант 2),

дающие одинаковое сжатие информации. Вариант 2 дает среднюю относительную ошибку 7 %; при этом характерная абсолютная погрешность составляет всего 1-2 единицы TECU. Вариант 1 кажется менее предпочтительным: средние абсолютная и относительная погрешности примерно в полтора раза больше, чем для варианта 2.

Однако приведенные результаты касаются лишь точности воспроизведения исходных данных моделью и ничего не говорят о том, насколько удачно выполняется главная задача − повышение точности определения координат потребителя путем коррекции дополнительного запаздывания в ионосфере. С этой точки зрения вариант 1 выглядит по крайней мере не хуже, чем вариант 2.

Заключение

Реализация модели GEMTEC представляет собой блок числовых данных размером около 50 килобайт и небольшой программный код. Такая реализация легко размещается в современных навигационных приемниках.

Согласно исследованиям, приведенным в работах [2, 3], использование модели GEMTEC в решении навигационной задачи существенно снижает ошибки позиционирования по сравнению с применением модели Клобучара. По результатам [5], коррекция по модели GEMTEC устраняет около 85 % ошибок, обусловленных отсутствием коррекции.

Большинство факторов в модели GEMTEC определяется географическим положением точки и заданным моментом времени. Задание единственного входного (гелиофизического) фактора – индекса солнечной активности − желательно реализовать в виде трансляции в навигационном сообщении. Можно использовать прогностическую модель этого индекса, хотя это, вероятно, приведет к некоторой потере точности коррекции.

Авторы благодарят А. Меновщикова за помощь в вычислениях и анализе результатов.

Работа подготовлена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 8388).

БИБИЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Klobuchar J. A. Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1987. AES-23. 325–331.
2. Ivanov V. B., Gefan G. D., Gorbachev O. A., 2011. Global Empirical Modelling of the Total Electron Content of the Ionosphere for Satellite Radio Navigation Systems // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2011. T. 73. P. 1703–1707.
3. Былинин К. Е., Горбачёв О. А., Иванов В. Б., Гефан Г. Д. Глобальная эмпирическая модель коррекции ионосферной погрешности спутниковых навигационных систем // Научный вестник МГТУ ГА. 2011. № 171 (9). С. 78–83.
4. Schaer S., Gurtner W., Feltens J. IONEX: The IONosphere Map EXchange Format Version~1. Proceeding of the IGS AC Workshop, 1998.
5. Ivanov V. B., Gorbachev O. A., Gefan G. D. The GEMTEC Model: Assessment of Quality of Ionospheric Correction in Satellite Radio Navigation Systems. // Consumer electronic times. 2012. v. 1. Iss. 2. P. 43–46.

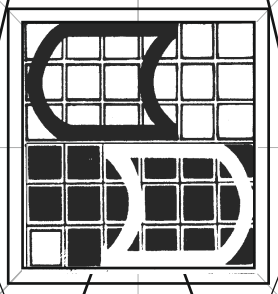
Министерство образования и науки Российской Федерации
Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта

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. Экономика и управление

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 621.311: 621.331

Крюков Андрей Васильевич,
д. т. н., профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), and_kryukov@mail.ru
Чан Зюй Хынг,
аспирант, Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), tranduyhung67@yahoo.com

ВЛИЯНИЕ УСТАНОВОК РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ НА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

A.V. Kryukov, Tran Duy Hung

INFLUENCE OF DISTRIBUTED GENERATION PLANTS ON QUALITY OF ELECTRIC ENERGY IN TRACTION POWER-SUPPLY SYSTEMS

Аннотация. *Рассмотрены вопросы влияния установок распределенной генерации (РГ) на несимметрию и несинусоидальность в системах электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог переменного тока. Решение поставленной задачи осуществлялось на основе компьютерного моделирования в системе Matlab. По результатам моделирования установлен положительный эффект влияния РГ на качество электроэнергии. Показано, что величина этого эффекта зависит от состава потребителей, подключенных к установке РГ.*

Ключевые слова: *системы электроснабжения железных дорог переменного тока, установки распределенной генерации.*

Abstract. *A problem of distributed generation plants influence on unsymmetry and unharmonicity in AC traction power-supply systems is considered. This problem also affects non-tractive AC railway consumers. Solution of this problem was implemented with the use of computer modeling in Matlab. The result of these experiments was a conclusion of positive effect of distributed generation plants on quality of electric energy. It was disclosed that amount of this effect depends on composition of consumers connected to the distributed generation plants.*

Keywords:*AC traction power-supply systems, distributed generation plants.*

Введение

Под распределенной генерацией (РГ) понимается совокупность потребительских энергоустановок для выработки электроэнергии (ЭЭ) на основе современных технологий. Эти установки могут работать как отдельные генераторы, подключенные к сети, а также объединяться в микроэнергосистемы [1]. Вопросы использования технологий РГ на железнодорожном транспорте нашли отражение в нормативных документах, определяющих перспективы развития отрасли, в частности, в энергетической стратегии ОАО «РЖД» на перспективу до 2030 года и в стратегических направлениях научно-технического развития ОАО «Российские железные дороги».

Постановка задачи

В регионах, где внешнее электроснабжение железных дорог является неустойчивым, предполагается создавать принадлежащие ОАО «РЖД» источники ЭЭ для обеспечения тяги поездов и нужд объектов инфраструктуры. На основе установок РГ может быть эффективно решена проблема улучшения качества электроэнергии в районах электроснабжения нетяговых потребителей (РЭС) [2–4], предназначенных для снабжения ЭЭ нагрузок, расположенных вдоль железной дороги и отличающихся большой протяженностью линий электропередачи 6–10 кВ, достигающей нескольких десятков километров. Это обстоятельство определяет достаточно большую удаленность отдельных потребителей от источников питания. В такой ситуации влияние установок РГ на качество электроэнергии может быть значительным. В настоящей статье на основе компьютерного моделирования приведены некоторые результаты решения задачи о влиянии установок распределенной генерации на качество электроэнергии в РЭС. В отличие от моделей, использованных в работах [2–4], указанные результаты получены с учетом потребителей электроэнергии, получающих питание от сетей РЭС.

Методика моделирования

Для исследования влияния РГ на качество электроэнергии были разработаны динамические модели (рис. 2–5) применительно к исходной схеме, показанной на рис. 1. В этой схеме представлена тяговая подстанция (ТП), имеющая распределительные устройства 110, 27,5 и 6 кВ. К районной обмотке 6 кВ подключена потребительская подстанция 6/0,4 кВ.

Параметры синхронного генератора, являющегося основой установки РГ, представлены в табл. 1.

Для изучения совместного влияния установки РГ и питающихся от нее потребителей на качество электроэнергии использовались компьютерные модели, реализованные в среде Matlab, схемы которых показаны на рис. 2–5.

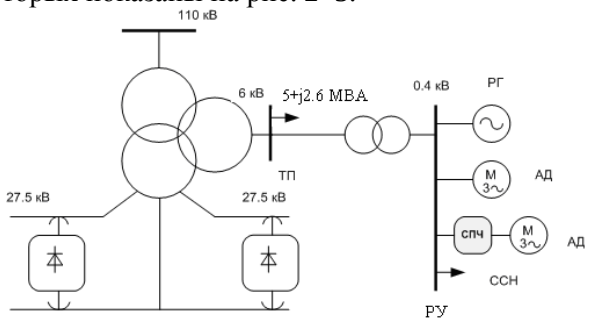


Рис. 1. Фрагмент системы электроснабжения железной дороги (СЭЖД): АД – асинхронный двигатель; СПЧ – статический преобразователь частоты; ССН – статическая симметричная нагрузка; ТП – тяговая подстанция;РУ – распределительное устройство 0,4 кВ

Таблица 1

Параметры синхронного генератора

Параметр	Значение
Мощность генератора *Pn*, кВ·А	1320
Напряжение *Un*, В	400
Частота *f*, Гц	50
Активное сопротивление статора *Rs*, о. е.	0,0132
Индуктивность рассеяния статора *LI*, о. е.	0,04
Индуктивность статора по продольной оси *Lmd*, о. е.	2,74
Индуктивность статора по поперечной оси *Lmq*, о. е.	2,01
Сопротивление обмотки возбуждения *Rf*, о. е.	0,00315
Индуктивность обмотки возбуждения ротора *LIfd*, о. е.	0,47
Сопротивление демпферной обмотки по продольной оси *Rkd'*, о. е.	0,2054
Индуктивность демпферной обмотки по продольной оси *LIkd*, о. е.	2,254
Сопротивление демпферной обмотки по поперечной оси *Rkq1*, о. е.	0,0238
Индуктивность демпферной обмотки по поперечной оси *LIkq1*, о. е.	0,1857
Момент инерции *J*, о. е.	0,3085
Коэффициент трения, о. е.	0,0117
Число пар полюсов *p*, о. е.	2

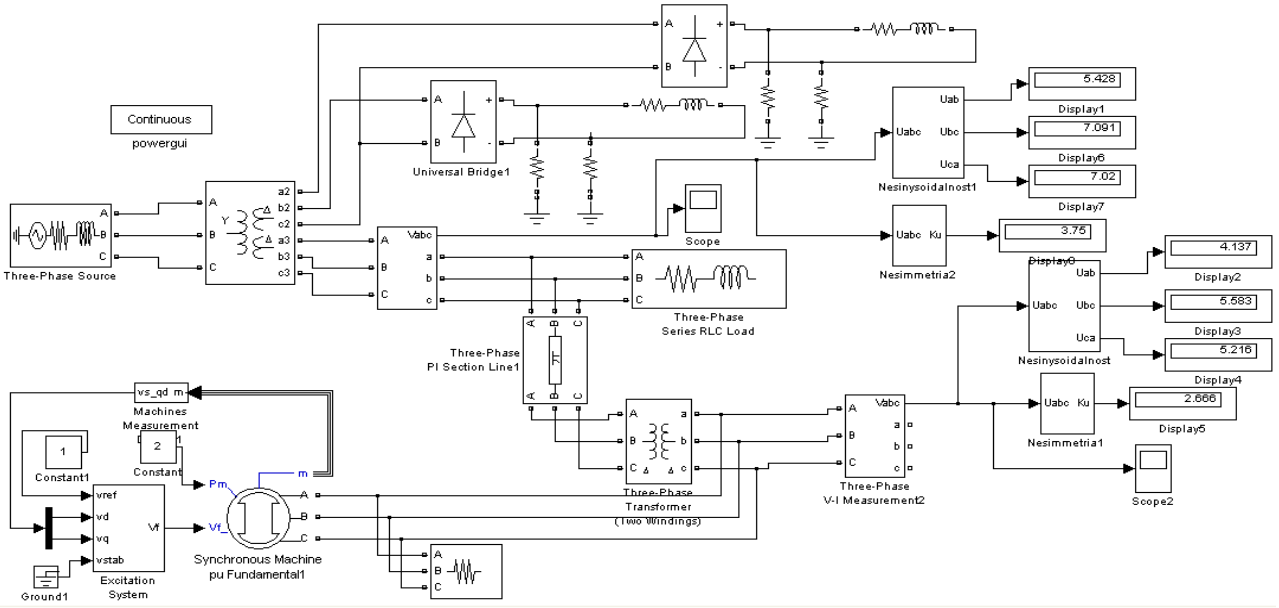


Рис. 2. Модель СЭЖД с РГ

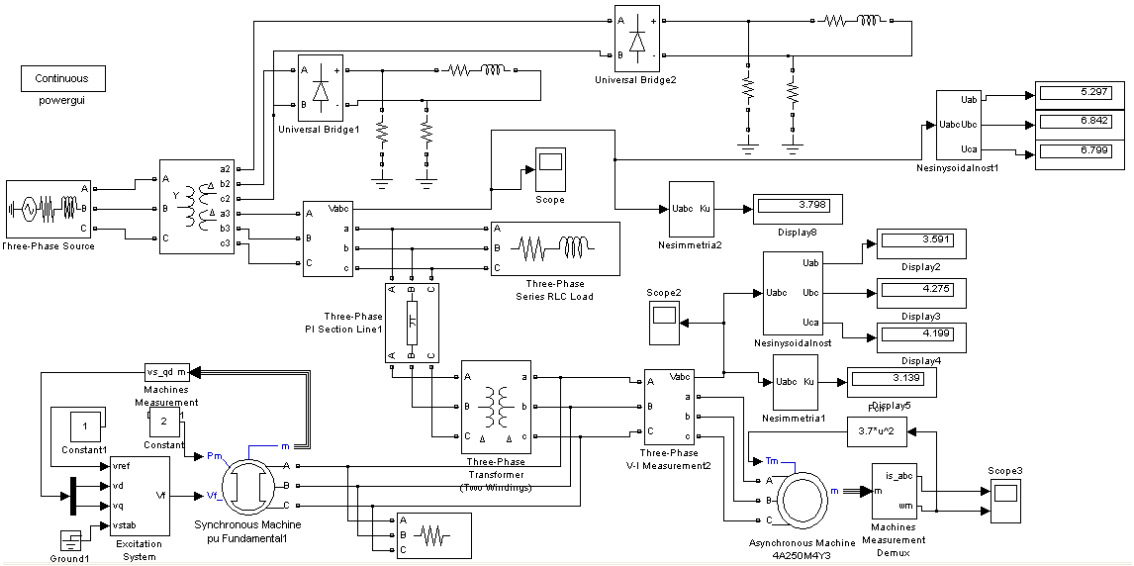


Рис. 3. Модель СЭЖД с РГ и АД

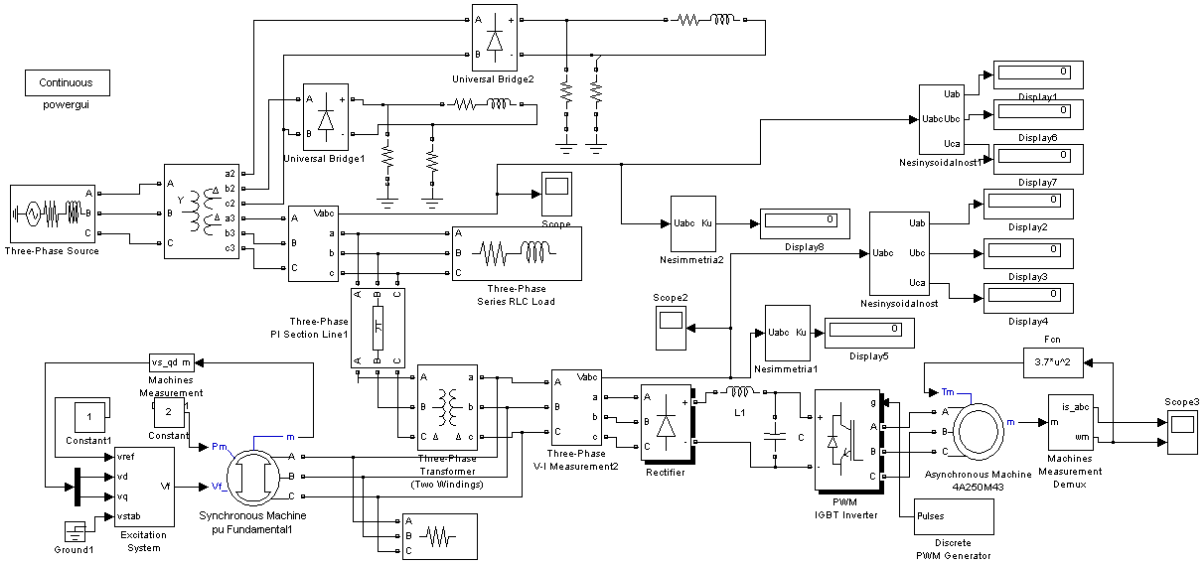


Рис. 4. Модель СЭЖД с РГ и СПЧ

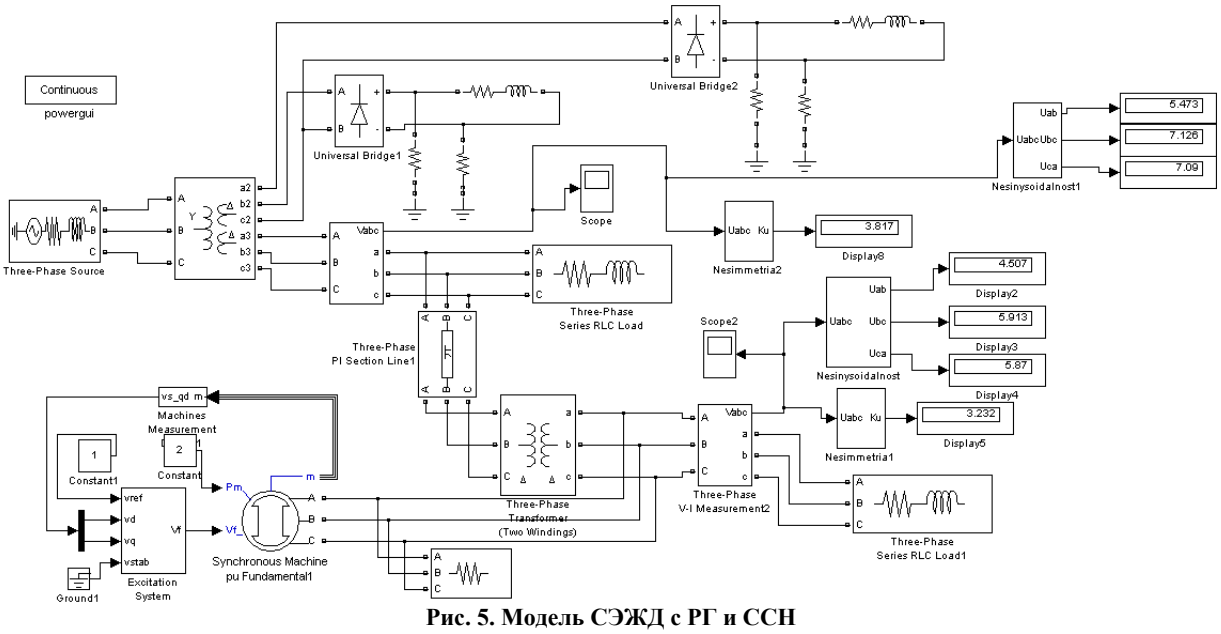


Рис. 5. Модель СЭЖД с РГ и ССН

В первой модели на шинах РУ отсутствовала нагрузка и синхронный генератор выдавал мощность в сеть высокого напряжения. Эта модель обозначена ниже «РГ». Во второй схеме к шинам 0,4 кВ РУ подключался асинхронный электродвигатель 4А250М4УЗ мощностью 90 кВт. Эта схема обозначена «РГ-АСД». В третьей схеме, обозначенной «РГ-СПЧ», этот же асинхронный электродвигатель подключался к выходным зажимам статического преобразователя частоты. В четвертой схеме («РГ-ССН») от шин 0,4 кВ питалась статическая симметричная нагрузка мощностью $90 + j41$ кВ·А.

Результаты моделирования и их обсуждение

Результаты моделирования при токах на вводах тяговой подстанции I_{ac}=300А, I_{bc}=300А и мощности генератора 1320 кВ·А представлены в табл. 2 и 3 и проиллюстрированы на рис. 6 – 11.

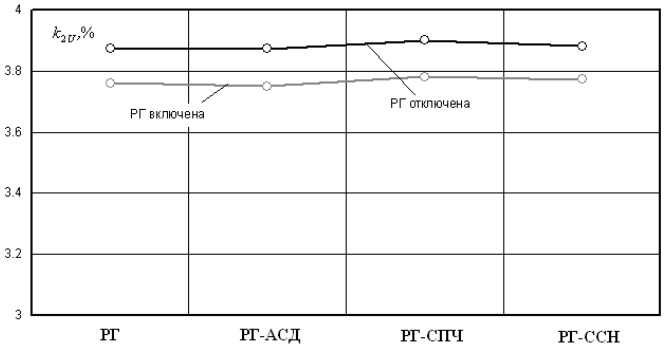


Рис. 6. Коэффициенты несимметрии по обратной последовательностина шинах 6 кВ ТП

Таблица 2

Коэффициенты несинусоидальности

Обозначение модели	Режим РГ	k_U, %					
		ТП			РУ		
		U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}
РГ	РГ отключена	5,53	7,19	7,15	5,34	6,92	6,88
	РГ включена	**5,37**	**6,99**	**6,96**	**3,60**	**4,67**	**4,70**
РГ-АСД	РГ отключена	5,35	6,91	6,87	4,38	5,29	5,21
	РГ включена	**5,27**	**6,81**	**6,77**	**3,21**	**3,73**	**3,75**
РГ-СПЧ	РГ отключена	5,66	7,44	7,40	8,45	10,21	10,33
	РГ включена	**5,37**	**7,02**	**7,01**	**6,68**	**7,33**	**7,75**
РГ-ССН	РГ отключена	5,58	7,25	7,22	5,61	7,28	7,25
	РГ включена	**5,38**	**7,03**	**7,01**	**3,71**	**5,01**	**5,07**

Таблица 3

Коэффициенты несимметрии по обратной последовательности

Обозначение модели	Режим РГ	k_{2U}, %	
		ТП	РУ
РГ	РГ отключена	3,87	3,87
	РГ включена	3,76	2,74
РГ-АД	РГ отключена	3,87	4,02
	РГ включена	3,75	2,71
РГ-СПЧ	РГ отключена	3,90	4,05
	РГ включена	3,78	2,92
РГ-ССН	РГ отключена	3,88	3,88
	РГ включена	3,77	2,86

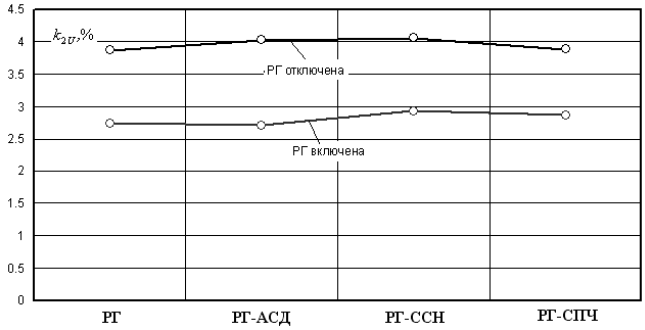
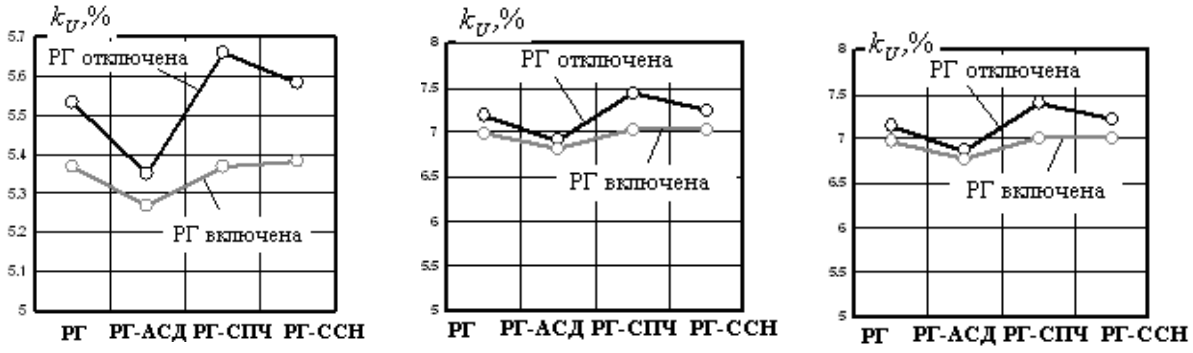


Рис. 7. Коэффициенты несимметрии по обратной последовательности на шинах 0,4 кВ РУ



а) б) с)

Рис. 8. Коэффициенты искажения синусоидальности на шинах 6 кВ ТП:а) U_{ab}; б) U_{bc}; в) U_{ca}

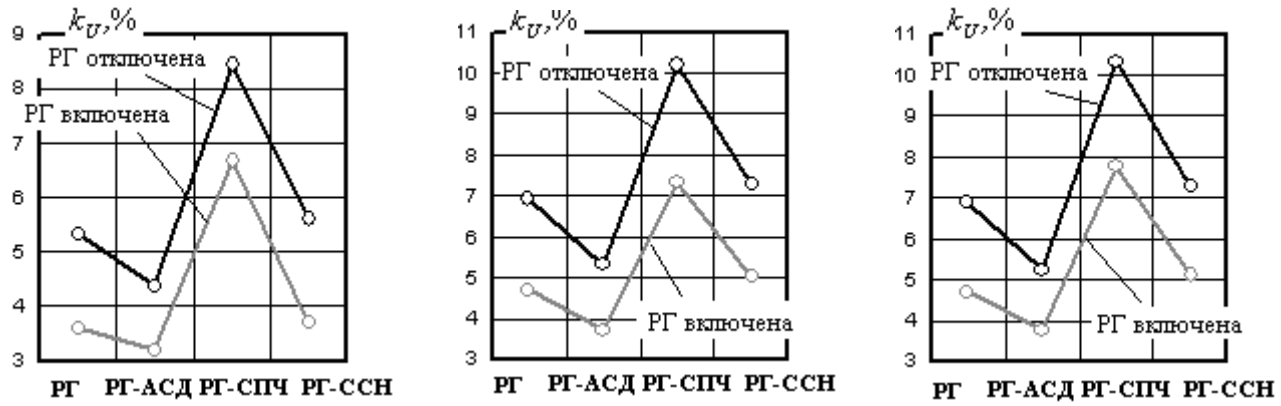


Рис. 9. Коэффициенты искажения синусоидальности на шинах 0.4 кВ РУ: а) U_{ab}; б) U_{bc}; в) U_{ca}

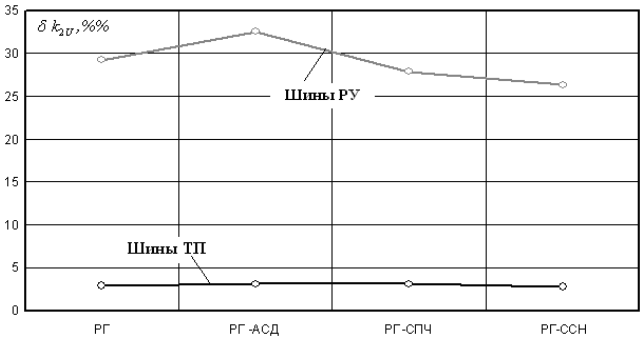


Рис. 10. Эффект РГ по несимметрии

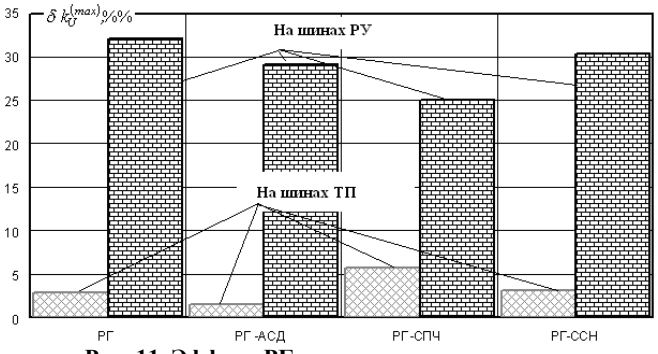


Рис. 11. Эффект РГ по несинусоидальности

Таблица 4

Эффект по снижению несимметрии δk_{2U}, %

Обозначение модели	ТП	РУ
РГ	2,8	29,2
РГ-АСД	**3,1**	**32,6**
РГ-СПЧ	3,1	27,9
РГ-ССН	2,8	26,3

Примечание. $\delta k_{2U} = \dfrac{k_{2U} - k_{2U}^{(G)}}{k_{2U}} \cdot 100$; k_{2U} – коэффициент несимметрии при отключенной установке РГ; $k_{2U}^{(G)}$ – коэффициент несимметрии при включении РГ.

Таблица 5

Эффект δk_U по снижению несинусоидальности на шинах ТП

Обозначение модели	РГ отключена	РГ включена	δk_U, %
РГ	7,2	7,0	2,8
РГ-АСД	6,9	6,8	1,5
РГ-СПЧ	7,4	7,0	**5,7**
РГ-ССН	7,3	7,0	3,0

Примечание.

1. Во втором и третьем столбцах приведены максимальные значения коэффициента искажения синусоидальности $k_U^{(\max)} = \max\left(k_U^{(ab)} \quad k_U^{(bc)} \quad k_U^{(ca)}\right)$.

2. $\delta k_U = \dfrac{k_U - k_U^{(G)}}{k_U} \cdot 100$; k_U – коэффициент искажения синусоидальности при отключенной установке РГ; $k_U^{(G)}$ – коэффициент искажения синусоидальности при включении РГ.

Таблица 6

Эффект δk_U по снижению несинусоидальности на шинах РУ

Характеристика схемы	РГ отключена	РГ включена	δk_U, %
РГ	6,9	4,7	**32,1**
РГ-АСД	5,3	3,7	29,1
РГ-СПЧ	10,3	7,7	25,0
РГ-ССН	7,3	5,1	30,4

Примечание. Во втором и третьем столбцах приведены максимальные значения коэффициента искажения синусоидальности, $k_U^{(\max)} = \max\left(k_U^{(ab)} \quad k_U^{(bc)} \quad k_U^{(ca)}\right)$.

Анализ результатов моделирования позволяет сделать следующие выводы:

- при включении установки РГ улучшаются показатели качества электроэнергии по несимметрии несинусоидальности;
- наибольшее снижение несимметрии (32 %) на шинах РУ имеет место в схеме «РГ-АСД», что

можно объяснить дополнительным симметрирующим эффектом асинхронного электродвигателя [6];

- максимальное снижение несинусоидальности (33 %) на шинах РУ наблюдается в схеме «РГ», отвечающей отсутствию нагрузки на шинах 0,4 кВ РУ;
- на шинах 6 кВ ТП несинусоидальность при включении РГ снижается наиболее существенно (на 5,6 %) в схеме «РГ-СПЧ».

Выводы

На основании результатов можно сделать вывод о возможности использования установок РГ для улучшения качества электроэнергии в системах электроснабжения железных дорог.

Степень снижения несимметрии и несинусоидальности зависит от состава потребителей, подключенных к районной обмотке тягового трансформатора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фотин В. П. Рассредоточенная энергетика [Электронный ресурс] URL: http: //www.vei.ru/ public/ public2.htm (Дата обращения 20.08.2012).
2. Крюков А. В., Закарюкин В. П., Арсентьев М. О. Свойства и характеристики систем распределенной генерации для электроэнергетики железнодорожного транспорта // Энергосбережение: технологии, приборы, оборудование : сб. науч.тр / под ред. А.В. Крюков ; Иркут. гос. ун-т путей сообщ. Иркутск, 2009. С. 5–22.
3. Крюков А. В., Закарюкин В. П., Арсентьев М. О. Использование технологий распределенной генерации на железнодорожном транспорте // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2008. № 3 (19). С. 81–87.
4. Крюков А. В., Закарюкин В. П., Арсентьев М. О. Применение технологий распределенной генерации для электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог // Вестник ИрГТУ. 2009. № 1(37). С. 190–195.
5. Закарюкин В. П., Крюков А. В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Иркутск. гос. ун-т, 2005. 273 с.
6. Крюков А. В., Ле Конг Зань. Анализ несимметричных режимов электрических сетей при наличии асинхронной нагрузки // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири : материалы Всерос. науч.-практ. конф. / Иркут. гос. техн. ун-т. Иркутск : ИрГТУ. 2012. С. 348–354.

УДК 658.012.1

Сольская Ирина Юрьевна,
д. э. н., профессор, директор Института дополнительного профессионального образования, Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС)
e-mail: irina_solskaya_@mail.ru
Власова Наталья Владимировна,
к. э. н., ИрГУПС

ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ КАПИТАЛ: ВСЕГДА ЗА БАЛАНСОМ

I.Y. Solskaya, N.V. Vlasova

HUMAN CAPITAL: OUT OF BALANCE-SHEET

Аннотация. *Рассмотрены возможности совершенствования методики составления пояснений к бухгалтерскому балансу и отчету о прибылях и убытках организации с целью повышения степени информативности финансовой отчетности организации в части оценки эффективности использования трудовых ресурсов.*

Ключевые слова: *финансовая отчетность, экономический анализ, трудовые ресурсы организации.*

Abstract. *Opportunities for book-keeping modification have been investigated. This modification must amplify financial analysis usefulness, especially to labour resources.*

Keywords: *balance-sheet, financial analysis, personnel, human capital.*

Приказ Министерства финансов № 66н от 02.07.2010 года «О формах бухгалтерской отчетности организаций» заменил понятие формы № 5 «Приложения к бухгалтерскому балансу» термином «пояснения» с приглашением организациям определять содержание данных пояснений самостоятельно.

В то же время Приложение № 3 к упомянутому приказу носит название «Пример оформления пояснений к бухгалтерскому балансу и отчету о прибылях и убытках».

Обзор отчетности нескольких десятков компаний в течение первого года применения Приказа № 66н показал практически полное совпадение приведенных в отчетности фактических пояснений и приведенных в Приложении № 3 примерных пояснений.

Объективные причины такого положения вещей очевидны: недостаточная заинтересованность собственников на фоне достаточного опыта финансовых работников в части неоднократно декларированной и впоследствии наказуемой инициативы.

Тем не менее, оговоренное изменение порядка составления пояснений позволяет значительно расширить возможности отчетности как инструмента аналитической оценки качества использования трудовых ресурсов компании, а в перспективе – реализовать в отчетности многочисленные теоретические изыскания в области человеческого капитала организации.

На сегодняшний день, несмотря на обоснование специалистов в области экономического анализа того факта, что «формирование, развитие трудовых ресурсов, повышение качества трудовой жизни, осуществляемое в рамках управления трудовыми ресурсами, является главным фактором обеспечения достижения целей предприятия и получения преимуществ в конкурентной борьбе» [1], возможности финансовой отчетности в данном вопросе практически равны нулю.

Немногие сведения в отчетности, имеющие отношение к кадровому потенциалу компании, – это сведения о расходах на оплату труда (сведения о расходах по обычным видам деятельности в пояснениях к бухгалтерскому балансу и отчету о прибылях и убытках), оттоки денежных средств связанные с оплатой труда («Отчет о движении денежных средств»), а также задолженность по оплате труда, представленная в расшифровке краткосрочной кредиторской задолженности.

Это означает, что аналитик имеет возможность рассчитать следующие показатели:

- зарплатоёмкость как отношение суммы расходов на оплату труда к величине выручки организации;

- доля расходов на оплату труда как отношение суммы расходов на оплату труда к общей величине расходов по обычным видам деятельности;

- период погашения задолженности по оплате труда как отношение произведения средней величины задолженности на продолжительность периода к выплатам по заработной плате за аналогичный период;

- доля задолженности по оплате труда в общей величине кредиторской задолженности компании.

Невысокая ценность данных показателей объясняется отсутствием основного для аналитических исследований показателя качества использования ресурсов (капитала) – отношения расходов, связанных с использованием ресурсов (привлечением капитала), к величине использованных ресурсов (привлеченного капитала), а также отношение величины доходов, полученных за счет функционирования ресурсов (капитала), к величине функционирующих ресурсов (капитала).

Кстати, хотелось бы отметить, что само по себе понятие человеческого капитала не новость: оно было сформулировано во второй половине XX века в работах американских ученых-экономистов. С тех пор понятие и методы оценки человеческого капитала неоднократно были предметом исследований и обсуждений, однако в большинстве случаев человеческий капитал рассматривается как общеэкономическое, макроэкономическое понятие.

В то же время следует отметить, что расширение трактовки понятия «капитал организации» на сегодняшний день можно считать направлением весьма популярным.

Действительно, классическая трактовка капитала как аккумулированной совокупности активов, используемых для извлечения прибыли, постоянно дополняется за счет новых классификационных признаков.

Современные экономисты, анализируя особенности постиндустриального общества, вводят в оборот все новые определения, считая, например, что «технология приобретает функции капитала».

При этом формулируется «определение технологического капитала как совокупности экономических связей, возникающих между людьми по поводу создания и использования технологии как комбинаторного ресурса, выполняющего функции капитала в постиндустриальной экономике» [2].

Таким образом, определение человеческого капитала фирмы как части активов, функциональные особенности которой обеспечивают взаимодействие капитала и оказывают прямое влияние на результативность функционирования капитала, можно считать достаточно логичным эволюционным продолжением теории капитала. Это позволит в перспективе разработать методику стоимостной оценки трудовых ресурсов, включая их в активы организации и отражая соответствующую данным активам часть капитала как человеческий (трудовой) капитал организации.

Однако цель данной статьи менее глобальна и более прагматична – увеличить ценность аналитической информации, основанной на данных публичной финансовой отчетности, путем добав-

ления в массив аналитических показателей критериев эффективности использования трудовых ресурсов компании.

В качестве первого шага можно предложить добавление в пояснения к финансовой отчетности информации о состоянии и движении трудовых ресурсов фирмы.

В самом простом варианте такие пояснения должны содержать сведения о кадровом потенциале (величине привлеченного капитала) и расходах, связанных с кадровым потенциалом (величине расходов, связанных с функционированием капитала), и могут быть названы соответственно «Наличие и движение трудовых ресурсов организации» и «Расходы, отнесенные к трудовым ресурсам организации». Такие пояснения должны содержать следующие сведения:

- списочная численность организации на начало периода, поступление и увольнение сотрудников в течение периода, численность на конец периода;

- в том числе численность работников, непосредственно занятых в производстве продукции (выполнении работ, оказании услуг);

- из них работники соответствующего профессионального образования и соответствующего уровня квалификации;

- плата за использование трудовых ресурсов и вложения в человеческий капитал за период, в том числе начисленная и выплаченная заработная плата (с выделением заработной платы работников, непосредственно занятых в производстве продукции), затраты на повышение квалификации и образовательные программы (с выделением части, приходящейся на работников, непосредственно занятых в производстве продукции), затраты на аттестационные и контролирующие мероприятия.

Следует отметить, что предлагаемые пояснения ни в коей мере не заменяют и не повторяют статистическую отчетность по форме П-4, так как имеют принципиально другую цель и направленность, а именно: отразить наиболее полно качество использования трудового потенциала, расширить аналитические возможности публичной финансовой отчетности, включив в показатели финансового анализа характеристику использования одного из важнейших ресурсов производства и одной из важнейших составляющих капитала компании.

Так как пояснения к бухгалтерскому балансу и отчету о прибылях и убытках, согласно рекомендациям, оформляются в табличной форме, предлагаемые сведения можно свести в таблицы, содержащие данные за отчетный и предыдущий периоды (табл. 1, 2).

Таблица 1

Наличие и движение трудовых ресурсов организации

Показатель	Начало года	Движение		Конец года
		поступление	выбытие	
Численность работников, всего				
в том числе рабочие				
из них высшей квалификации				
в том числе специалисты				
из них соответствующей профессиональной подготовки				
в том числе руководители				
из них соответствующей профессиональной подготовки				

Примечание. В данном случае термин «рабочие» подразумевает работников организации, непосредственно связанных с производством продукции (выполнением работ, оказанием услуг), а не работников, занятых преимущественно физическим трудом.

Таблица 2

Расходы, отнесенные к трудовым ресурсам организации

Показатель	Остаток начало периода	Начислено	Выплачено
Оплата труда, всего			
в том числе рабочие			
в том числе специалисты			
в том числе руководители			
Из расходов на оплату труда: тарифная составляющая	X		X
Из расходов на оплату труда: мотивационная составляющая	X		X
Расходы на повышение квалификации и образовательные программы, всего:	X		X
в том числе рабочие	X		X
Расходы на проведение аттестации, всего:	X		X
в том числе премирование (депремирование) по итогам аттестации (+/–)	X		X

Представленные сведения позволят рассчитать полноценный свод показателей качества использования трудовых ресурсов организации, определить качество структуры персонала и струк-

туру фонда оплаты труда, провести сопоставление динамики производительности труда и средней заработной платы, а также провести факторный анализ обобщающих показателей.

В заключение хотелось бы отметить, что предложенные дополнения в пояснения к финансовой отчетности, несомненно, не являются ни бесспорными, ни исчерпывающими. Однако представляется очевидным то, что заинтересованными пользователями финансовой отчетности такая информация будет востребована не менее, чем информация о рентабельности продаж или степени финансовой независимости, так как эффективность работы персонала – фактор, во многом определяющий перспективное значение результативных финансовых показателей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Басовский Л. Е., Лунева А. М., Басовский А. Л. Экономический анализ. М.: Инфра-М, 2008. 220 с.
2. Иванова Е. В. Технологический капитал и его системные характеристики // Экономический анализ: теория и практика. 2012. № 30 (285). С. 6–11.

УДК 658

Сурков Леонид Петрович
к. э. н., профессор,
Иркутский государственный университет путей сообщения,
тел. 8 914 943 7328

ГЕНЕЗИС МОДЕЛЕЙ РЫНКА ТРАНСПОРТНЫХ УСЛУГ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

L.P. Surkov

THE GENESIS OF THE RAILROAD TRANSPORT SERVICE MARKETING MODELS

Аннотация. *Рассмотрены принципы и проблемы формирования целевой модели рынка железнодорожных транспортных услуг. Показаны этапы трансформирования модели рынка и приведены схемы взаимодействия субъектов на рынке грузовых перевозок.*

Ключевые слова: *железнодорожный транспорт, реформирование, инфраструктура, транспортный рынок, модели, субъекты рынка.*

Abstract. *This article considers the foundations and problems of the railroad transport service destination marketing model formation. The transformation stages of the marketing model have been shown. Interaction patterns of the freight market parties have been contributed in this paper.*

Keywords: *railroad transport, reforming, infrastructure, transport market, marketing models, freight market parties.*

В настоящее время на железнодорожном транспорте проводятся крупномасштабные структурные преобразования, которые коренным образом меняют действующий механизм его функционирования, формируют новую идеологию работы отрасли, транспортный рынок и новые взаимоотношения между участниками рынка. Особенности реформирования заключаются не только в изменении форм собственности, но и в смене всей архитектуры управления компанией. Построение системы управления российскими железными дорогами в условиях их реформирования требует адекватного подхода к создаваемому хозяйственному комплексу и целевой модели рынка железнодорожных перевозок.

Если в промышленно развитых странах этот процесс был эволюционным, то странам с переходной экономикой присущи многочисленные трудности ломки общественных, экономических и организационных отношений. В настоящее время не только организация управления, но и старые традиционные методы хозяйственной деятельности должны постепенно заменяться новыми подходами, увязанными с требованиями рынка [1].

В рамках завершаемой «Программы структурной реформы железнодорожного транспорта» предусматривается реализация «целевой модели железнодорожных транспортных услуг» на третьем этапе структурной реформы. Причем реализация этой модели должна обеспечивать создание условий для развития конкуренции в сфере железнодорожных транспортных услуг и роста частных инвестиций в железнодорожную отрасль. Более того, «приоритетные направления совершенствования нормативно-правового регулирования на железнодорожном транспорте должны быть направлены на реализацию целевой модели рынка железнодорожных транспортных услуг» [4].

В 2007 году была принята целевая модель реформирования железнодорожных перевозок, и все участники рынка пришли к компромиссному варианту, что необходимо до 2010 года провести работу по выделению из ОАО «РЖД» бизнесов, которые можно выделить, и кроме того, к этому времени подойти к решению вопроса о разделении инфраструктуры и перевозок.

В начале 2011 года Минтранс России должен был представить в правительство РФ проект «Целевой модели рынка грузовых железнодорожных перевозок на период до 2015 года» [2].

Однако для эффективного моделирования на основе правильного уяснения процессов становления и функционирования российского рынка услуг железнодорожного и иных видов транспорта и создания в их сфере конкуренции, прежде всего, необходимо определить, какие проблемы остались нерешенными.

Программа структурной реформы железнодорожного транспорта позволяет выявить следующие принципы формирования отраслевой модели рынка железнодорожных транспортных услуг [4]:

- разделение функций государственного и хозяйственного управления;
- функционирование в сфере федерального железнодорожного транспорта общеотраслевого государственного хозяйствующего субъекта;
- четкое разграничение на федеральном железнодорожном транспорте естественно-монопольной и конкурентной сфер;
- единственность монопольного субъекта оказания услуг железнодорожной инфраструктуры;
- равноправный доступ к услугам инфраструктуры для компаний-перевозчиков;
- функционирование на конкурентном рынке железнодорожных услуг в качестве основного перевозчика ОАО «РЖД»;
- обеспечение конкуренции на рынке железнодорожных перевозок за счет независимых компаний-перевозчиков;
- возможность акционирования входящих в состав ОАО «РЖД» компаний-перевозчиков.

Производственные модели рынка перевозок железнодорожного транспорта общего пользования в постсоветский период базировались на принимаемых законодательных и других нормативно-правовых актах, которые от этапа к этапу трансформировали модель рынка перевозок публичного железнодорожного транспорта (табл. 1).

Согласно правительственному постановлению, структурная реформа на железнодорожном транспорте должна была завершиться в 2010 году. В настоящее время большая часть мероприятий из плана реформирования уже близка к выполнению. Произошло разделение функций государственного регулирования и хозяйственной деятельности, создано ОАО «РЖД», выведены основные непрофильные активы [3].

Осуществлены меры и в области совершенствования системы управления и формирования холдинга.

Созданы четыре филиала ОАО «РЖД»: ЦФТО, Центральная дирекция управления движением, Дирекция тяги и Дирекция по ремонту тягового подвижного состава.

Таблица 1

Генезис производственных моделей рынка транспортных услуг

Этапы	Действующие документы	Модели	Отличительные особенности моделей
До апреля 1991 года	«Устав железных дорог СССР» от 1964 года	Исходная модель сугубо государственной монопольной сферы публичных железнодорожных перевозок	Абсолютная государственная монополия МПС СССР на услуги железнодорожного транспорта общего пользования
1991–1995 годы	Закон СССР «О железнодорожном транспорте» от 15 апреля 1991 года	Модель сферы перевозок железнодорожным транспортом общего пользования	Появление в сфере перевозок негосударственных посредников – транспортных экспедиторов и агентов
1995–1998 годы	Закон РФ «О федеральном железнодорожном транспорте» от 25 августа 1995 года	Модель естественно-монопольного рынка перевозок железнодорожным транспортом общего пользования	Отправители и получатели грузов могут иметь собственные или арендованные ими вагоны и контейнеры
1998–2003 годы	Федеральный закон «Транспортный устав железных дорог Российской Федерации» от 8 января 1998 года	Модель доступного для негосударственных экономических субъектов естественно-монопольного рынка публичных железнодорожных перевозок	Появление федерального органа исполнительной власти по регулированию естественных монополий на транспорте. Иные организации могут иметь принадлежащие им вагоны, контейнеры для собственных перевозок

Продолжение таблицы 1

2003–2007 годы	Федеральные законы «О железнодорожном транспорте в Российской Федерации» от 10 января 2003 года и «Устав железнодорожного транспорта Российской Федерации» от 10 января 2003 года	Формальная модель конкурентного рынка основных услуг (перевозок и услуг инфраструктур) железнодорожного транспорта общего пользования	Возможна конкуренция на рынке транспортных услуг железнодорожного транспорта общего пользования между государственными и частными перевозчиками и владельцами инфраструктур
	Федеральные законы «О естественных монополиях» от 1995 года и «О внесении изменения и дополнений в ФЗ «О естественных монополиях» от 2003 года	Вариативная формальная модель конкурентного рынка услуг публичного железнодорожного транспорта	Какая-то часть железнодорожных перевозок реализуется на конкурентном рынке, а другая их часть осуществляется естественным монополистом, являющимся владельцем основной инфраструктуры
	Закон «Об особенностях управления и распоряжения имуществом железнодорожного транспорта» от 2003 года и «Устав ОАО «РЖД», март 2003 года	Действующая правоприменительная модель монопольного рынка публичных железнодорожных перевозок и услуг инфраструктуры	Действие монополии на перевозки и услуг инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования и ужесточение централизованного управления им
2007–2009 годы	«Концепция системы управления компании холдингового типа, образуемой в результате реформирования ОАО «РЖД», февраль 2007 года	Модель рынка грузовых железнодорожных перевозок ОАО «РЖД»	Несоответствие современным правовым и программным моделям рынка услуг железнодорожного транспорта.
		Модель рынка пассажирских железнодорожных перевозок ОАО «РЖД»	Присутствие между потребителями и перевозчиком неких «операторов вагонных парков»
	«Доклад о целевой модели рынка железнодорожных транспортных услуг на третьем этапе структурной реформы», май 2007 года	Формальная модель рынка услуг железнодорожного транспорта, сложившегося к началу третьего этапа структурной реформы. «Целевая модель рынка железнодорожных транспортных услуг на третьем этапе структурной реформы»	Конкурентный рынок услуг оперирования подвижным составом (ОАО «РЖД» и независимые операторы). Независимые операторы и владельцы инфраструктуры. Создание «ПГК», «ВГК», специализированных грузовых компаний, пригородных компаний и «ФПК» как ДЗО ОАО «РЖД»
	«Концепция реформирования железнодорожного транспорта в сфере оперирования грузовым подвижным составом в 2010–2015 годы», октябрь 2009 года	Проектируемая к формированию в 2010–2015 годы модель рынка услуг операторов железнодорожного подвижного состава	Невозможность установления взаимоотношений между грузовладельцем и перевозчиком помимо оператора. Создание СРО частных операторов подвижного состава, АО «Биржа вагонов» и рынка услуг частных операторов подвижного состава
	«Целевая модель рынка грузовых железнодорожных перевозок на период до 2015 года» ОАО «РЖД» и «McKimsey», октябрь 2009 года	«Целевая модель грузовых железнодорожных перевозок на период до 2015 года» ОАО «РЖД» и «McKimsey»	Конкуренция «за маршрут». Выделение локальных участков инфраструктуры ОАО «РЖД» и создание локальных перевозчиков. Заключение «сетевого контракта» между ОАО «РЖД» и государством
	«Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года», июнь 2008 года	Правительственная долгосрочно-программная модель рынка железнодорожных транспортных услуг после 2010 года (до 2030 года)	Функционирование ОАО «РЖД» как основного перевозчика и владельца инфраструктуры, появление частных собственников железнодорожной инфраструктуры, функционирование независимых компаний-перевозчиков

Окончание таблицы 1

2007–2009 годы	«Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года», ноябрь 2008 года	Правительственная долгосрочная программная модель структурного реформирования железнодорожного транспорта после 2010 года	Сохранение сетевого перевозчика, невозможность формирования конкурентного рынка услуг пассажирских и грузовых терминалов, неопределенность и непоследовательность формирования института владельцев железнодорожного подвижного состава
2010 г.– наст. время	Проекты документов, размещенные в июле 2010 года на официальном сайте Минтранса РФ	Модель рынка пригородных перевозок железнодорожным транспортом	«Полное выведение» из ОАО «РЖД» пригородных перевозок
		Модель рынка пассажирских перевозок дальнего следования	Наделение «ФПК» локомотивами и превращение ее в официального монопольного перевозчика
		Модель рынка грузовых железнодорожных перевозок	Продажа «ПГК» и «ВГК». Конкуренция на «маршруте». ОАО «РЖД» как монопольный потребитель на «рынке услуг операторов подвижного состава»
	«Концепция организационного развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2015 года», сентябрь 2011 года	Официальная концептуальная модель по изменению системы управления компанией в среднесрочной перспективе	Завершение формирования конкурентного рынка оперирования грузовыми вагонами и дальнейшее развитие частной собственности на ПС, формирование института локальных публичных грузовых перевозчиков и развитие конкуренции в отдельных сегментах рынка («за маршрут», «на маршруте»)

Ведутся работы по переходу железных дорог на безотделенческую структуру управления.

Приняты решения по обеспечению корпоративной и технологической координации деятельности структурных подразделений отрасли на территориальном уровне, позволяющие в период реорганизации минимизировать риски и обеспечить бесперебойное и безопасное функционирование железнодорожного транспорта.

Сформирован рынок оперирования подвижным составом, и сегодня уже свыше 60 % всего вагонного парка находится в частных руках. Созданы Первая и Вторая грузовые компании.

Вышла на рынок Федеральная пассажирская компания, а в регионах продолжается процесс создания пригородных компаний [5].

Наряду с этим остались самые сложные мероприятия, по которым возникли серьезные разногласия. В первую очередь речь идет о нормативном обеспечении реформ. Уже около года правительство не может внести в Госдуму пакет законов, состоящий из закона «О железнодорожном транспорте» и «Устава железнодорожного транспорта». Из-за неподготовленности основных законов порождается конкуренция идей и мнений о путях железнодорожной реформы, в то время как близится время ее завершения.

Имеются серьезные разногласия и по следующим вопросам:

- по принятию «Целевой модели рынка железнодорожных перевозок до 2015 года»;
- отделению перевозок от инфраструктуры, которое предусматривается в правительственном плане структурной реформы;
- формированию тарифов на услуги инфраструктуры, а также усовершенствованию тарифной системы в части унификации второго и третьего разделов Прейскуранта № 10-01 и сближению тарифов на порожний пробег вагонов;
- о возможной частной собственности на локомотивы, которая сейчас предусмотрена реформой, но против которой решительно выступает ОАО «РЖД».

При обсуждении дальнейших шагов реформирования наиболее остро стоит проблема целевой модели рынка грузовых железнодорожных перевозок [6].

Одним из базовых принципов осуществления функционирования железнодорожного транспорта РФ в период с 2003 г. по настоящее время является развитие конкуренции и становление рынка услуг железнодорожного транспорта.

В соответствии с законом РФ «О железнодорожном транспорте в Российской Федерации», с 2003 года на рынке услуг публичного железно-

дорожного транспорта РФ должна была неизбежно развиваться конкуренция между «организациями железнодорожного транспорта и выполняющими работы (услуги) на железнодорожном транспорте индивидуальными предпринимателями» как производителями этих услуг. Определено, что «деятельность в сфере железнодорожных перевозок осуществляется на конкурентной основе по единым нормам и правилам, установленным в соответствии с законодательством РФ, независимо от организационно-правовой формы участника перевозочного процесса».

Таким образом, в эти годы происходит функционирование и развитие конкурентного рынка основополагающих видов услуг инфраструктуры. И на этом рынке действуют соответствующие экономические субъекты: владелец инфраструктуры, перевозчик, оператор подвижного железнодорожного состава, грузоотправитель, грузополучатель, пассажир и другие физические и юридические лица.

Основные участники рынка грузовых железнодорожных перевозок приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные участники рынка грузовых железнодорожных перевозок

Субъект	Определение	Характеристика	Активы	Участники
Владелец инфраструктуры	• Юридическое лицо или индивидуальный предприниматель, имеющие инфраструктуру на праве собственности или на ином праве и оказывающие услуги по ее использованию на основании соответствующего договора	• Владелец инфраструктуры одновременно является перевозчиком. Инфраструктура применяется им для перевозки и для оказания услуг по ее использованию другим лицам	• Имущественные объекты, техническая, организационная и коммерческая информация	• ОАО «РЖД» • ОАО «ЖДЯ»
Перевозчик	• Юридическое лицо или индивидуальный предприниматель, принявшие на себя по договору перевозки с железнодорожным транспортом общего пользования обязанность доставить пассажира, вверенный им отправителем груз, багаж или грузобагаж из пункта отправления в пункт назначения, а также выдать груз, багаж или грузобагаж управомоченному на его получение лицу	• Перевозки грузов на сети общего пользования осуществляются на основе публичного договора по регулируемому тарифу. • Договор перевозки заключается между грузоотправителем и перевозчиком. • Другие лицензированные компании перевозочную деятельность не осуществляют из-за фактической невозможности выполнить все требования к публичному общесетевому перевозчику	• Подвижной состав, системы диспетчеризации контроля, иные объекты необходимые для обеспечения перевозочного процесса	• ОАО «РЖД» • ОАО «ЖДЯ»
Оператор	• Юридическое лицо или индивидуальный предприниматель, имеющие вагоны, контейнеры на праве собственности или на ином праве, участвующее на основе договора с перевозчиком и осуществляющее перевозочный процесс с использованием указанных вагонов, контейнеров	• Деятельность операторов недостаточно регламентирована транспортным законодательством, заключение договоров между оператором и перевозчиками фактически не осуществляется. Незначительная часть перевозок осуществляется в поездных	• Вагоны, контейнеры. • Для собственных формирований – вагоны, контейнеры и локомотивы	• ПГК, ВГК • БалтТрансСервис • Новая перевозочная компания, Трансгарант • Евросиб • ОТЭКО и др.

Субъект	Определение	Характеристика	Активы	Участники
		формированиях, состоящих из собственных вагонов и локомотивов		
Собственник подвижного состава	• Лицо, владеющее железнодорожным подвижным составом на праве собственности и предоставляющее его по договору лицам для осуществления перевозочного процесса	• Собственники подвижного состава действуют на основании гражданского законодательства. Отраслевым законодательством их деятельность не урегулирована	• Локомотивы, вагоны и др. подвижной состав	• 2200 собственников вагонов (1 млн ед.) - 18 тыс. локомотивов (600 –приватные)
Экспедитор	• Сторона договора транспортной экспедиции, обязующаяся за вознаграждение выполнить или организовать выполнение услуг, связанных с перевозкой груза	• По договору транспортной экспедиции выполняет или организует выполнение услуг, связанных с перевозкой груза. Деятельность экспедиторов достаточно подробно регламентируется	• Организационная, коммерческая информация. • Нематериальные активы	• Зачастую операторы
Грузоотправитель, получатель	• Лицо по договору перевозки, выступающее от своего имени или от имени владельца груза, багажа, грузобагажа и указанное в перевозочном документе. Лицо, уполномоченное на получение груза, багажа, грузобагажа	• Физическое или юридическое лицо, которое по договору перевозки выступает от имени своего или от имени владельца груза и указано в перевозочном документе. • Физическое или юридическое лицо, уполномоченное на получение груза, багажа	• Имущество, организационная информация, методы, способы и навыки работы	• Клиентская база ОАО «РЖД»

Принципиально новые условия формирования и функционирования услуг железнодорожного транспорта общего пользования, появление разновидных экономических субъектов рынка перевозок приводит к новым технологическим, организационным и экономическим отношениям между всеми участниками транспортного рынка. Схема взаимодействия субъектов на рынке грузовых перевозок представлена на рис. 1 и 2.

Основываясь на известных мнениях специалистов, целесообразно сформулировать следующие обнародованные недостатки Целевой модели рынка грузовых железнодорожных перевозок:

- непроработанность роли локальных перевозчиков;
- нерешенность проблемы перекрестного субсидирования (одни перевозки за счет других);
- возможный рост перевозочных тарифов при создании «ПГК» и «ВГК»;
- отсутствие условий для дерегулирования перевозочных тарифов;
- отсутствие у оператора правового статуса участника договора перевозки;
- отсутствие конкуренции или появление «новых» монополистов на локальных рынках; отсутствие полноценного института независимых перевозчиков;
- практическая ликвидация публичности железнодорожной перевозки;
- непривлекательность для частных операторов конкуренции «за маршрут»;
- недостижимость цели структурной реформы – снижения транспортной составляющей в стоимости готовой продукции;

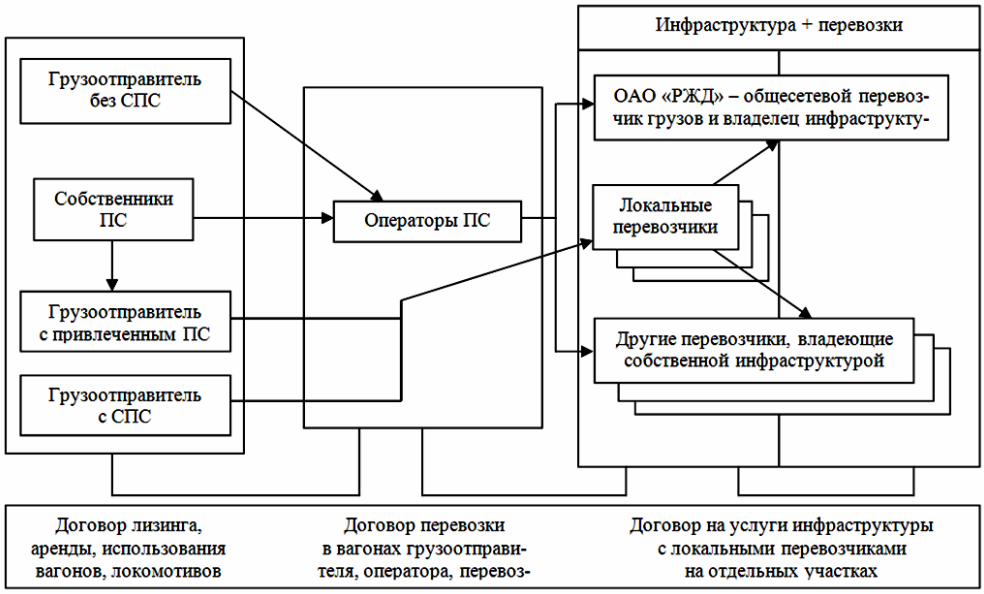


Рис. 1. Целевая схема взаимодействия субъектов на рынке грузовых перевозок

Рис. 2. Схема взаимодействия субъектов на рынке грузовых перевозок

- непривлекательность для частного бизнеса условий функционирования локального перевозчика и др.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Железнодорожная отрасль на новом этапе развития. // Экономика железных дорог. 2009. №2. С. 11–19.
2. Инфраструктура ОАО «РЖД», реформирование, развитие, управление, обслуживание : тематическая подборка. Иркутск : ДЦНТИ, 2010. 86 с.
3. Концепция развития структурной реформы железнодорожного транспорта. М : МПС, 2000. 40 с.
4. Программа структурной реформы на железнодорожном транспорте : постановление правительства РФ от 18.05.2001. №384. М. : МЦФР. 50 с.
5. Сурков Л. П., Бирюкова Н. И. Хозяйственный механизм структурных подразделений ОАО «РЖД» : на примере Восточно-Сибирской железной дороги. Иркутск : ИрГУПС, 2010. 266 с.
6. Стратегическое развитие железнодорожного транспорта: цели, задачи, мероприятия, проблемы // Экономика железных дорог. 2008. № 12. С. 12–20.

УДК 621.33

Васильев Антон Александрович,
аспирант кафедры «Электроподвижной состав»,
Иркутский государственный университет путей сообщения,
e-mail: locomotivschik@mail.ru

ПРОДЛЕНИЕ РЕСУРСА АСИНХРОННЫХ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МАШИН ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ КАПСУЛИРОВАНИЯ ЛОБОВЫХ ЧАСТЕЙ ОБМОТКИ СТАТОРА

A.A. Vasilev

THE RESOURCE PROLONGATION OF ELECTRIC TRAINS ASYNCHRONOUS AUXILIARY CARS ON THE BASIS OF CAPSULING FRONTAL PARTS OF WINDING STATOR TECHNOLOGY

Аннотация. *Статья посвящена инновационной технологии продления ресурса асинхронных вспомогательных машин электропоездов. В статье рассматривается производственная установка для реализации эффективной технологии капсулирования изоляции лобовой части обмотки статора при осциллирующем ИК-энергоподводе.*

Ключевые слова: *электрические машины, изоляция лобовой части двигателя, капсулирование изоляции обмоток, ИК-энергоподвод.*

Abstract. *The article is devoted to innovative technology of prolongation of a resource of electric trains asynchronous auxiliary cars. Industrial installation for realization of effective technology isolation encapsulation of a frontal part of a winding stator is considered at oscillate IR-energy supply.*

Keywords: *electric cars, isolation of a frontal part of the engine, encapsulating isolation, IR-energy supply.*

Надежная работа пригородного сообщения имеет большое социально-экономическое значение для страны. Электропоезд предназначен для пригородного сообщения на электрифицированных участках железных дорог, от надежности его работы зависят экономические показатели депо и в первую очередь обеспечение безопасности процесса перевозки пассажиров. Устойчивость работы электропоезда определяется надежностью его отдельных узлов и механизмов, в частности вспомогательные электрических машин, электроаппаратуры и механической части.

Наибольшее количество повреждений вспомогательных электрических машин наблюдается по причине пробоя изоляции асинхронных электродвигателей. Характерными местами повреждений, ведущих к отказу асинхронного электродвигателя, являются: - пазовая часть, лобовая часть, выход из паза, выводы. Начиная исследовать надежность электропоезда переменного тока серий ЭР9п, т и ЭД9м, мк, т, следует изучить статистику отказов и повреждений в эксплуатационных условиях, то есть проанализировать достоверную информацию об эксплуатационной надежности.

Проведен технический анализ непланового ремонта и повреждений оборудования электропоездов по Дирекции обслуживания пассажиров пригородного движения ВСЖД. Количественные данные по электрооборудованию и механической части электропоездов ВСЖД представлены в табл. 1. Анализируемый период – последние три года, а также первый квартал 2012 года. Рассчитан параметр потока отказа по оборудованию. На рис. 1 представлена гистограмма распределения внепланового ремонта оборудования МВПС ВСЖД.

Разрушение изоляции происходит в результате нагрева, механических усилий (давление, вибрация и удары), влияния влаги и агрессивных сред и других факторов. Постепенное разрушение изоляции в эксплуатационных условиях или во время профилактических испытаний обычно завершается пробоем – результатом значительного снижения электрической прочности изоляции. Кроме того, возможны повреждения изоляции, связанные с износом: продавливание, образование трещин вследствие значительных напряжений при изгибе и т. п. Такие местные дефекты часто развиваются быстро и приводят к пробою изоляции задолго до существенного ухудшения ее свойств.

В других случаях они возникают и развиваются на фоне общего старения изоляции.

К эксплуатационным воздействиям, оказывающим влияние на износ электродвигателей, относятся как климатические: температура и давление окружающей среды, влажность,– так и другие факторы эксплуатационного характера: агрессивная среда, вибрации, высокие механические и электрические нагрузки.

Таблица 1

Распределение непланового ремонта оборудования электропоездов ВСЖД

№	Год	ТЭД	Вспомогательные машины	Компрессоры	Электрическая аппаратура	Механическая часть КП	Всего
Количество повреждений, N	2009	12	14	9	14	26	75
	2010	9	21	11	19	27	87
	2011	6	24	11	17	22	80
	1 кв. 2012	2	7	4	6	9	28
Повреждения на 1 млн. км	2009	0,68	0,79	0,51	0,79	1,48	4,27
	2010	0,51	1,19	0,62	1,08	1,53	4,95
	2011	0,34	1,36	0,62	0,96	1,25	4,56
	1 кв. 2012	0,11	0,39	0,22	0,34	0,51	1,59

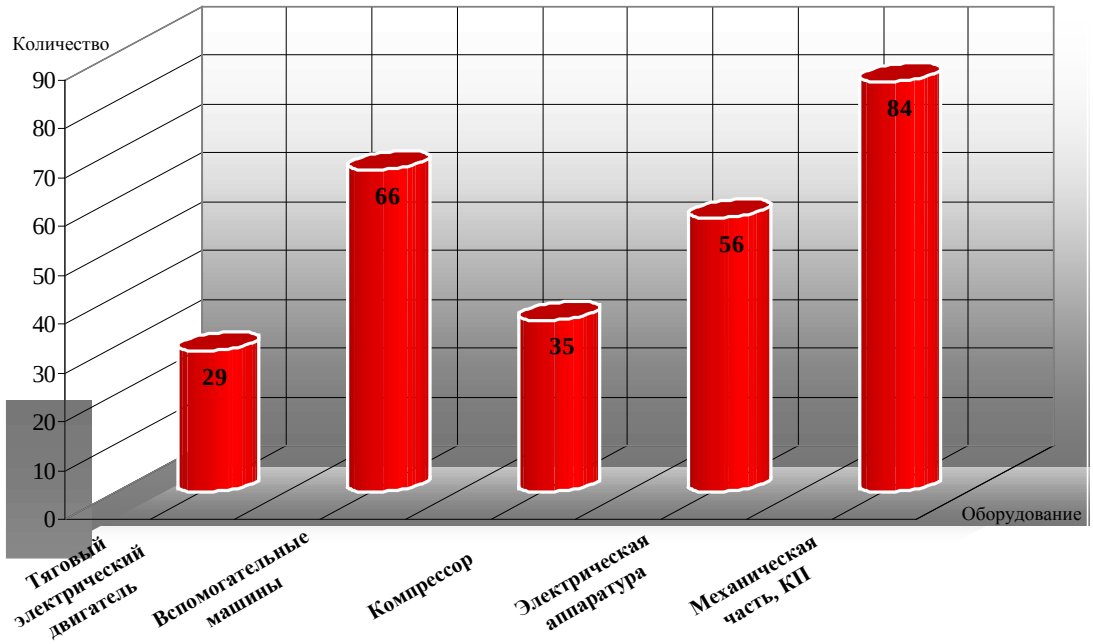


Рис. 1. Распределение непланового ремонта оборудования МВПС ВСЖД

Важнейшими факторами износа и старения изоляции являются механические и термомеханические нагрузки. К первым относятся статическое давление на изоляцию, изгибающие и скручивающие усилия, удары и вибрация. Источниками механических воздействий являются: электродинамические силы, неуравновешенность вращающихся частей, центробежные усилия (в обмотках роторов), толчки и удары, передаваемые машинам со стороны приводимых во вращение механизмов. Кроме того, в обмотках возникают механические напряжения, обусловленные периодическими изменениями температуры. Повреждения изоляции обмотки статора являются основной причиной выхода из строя асинхронных электродвигателей электропоездов. Анализ причин выхода из строя более 60 асинхронных электродвигателей вспомогательных машин позволили установить, что 90 % всех повреждений и вызывались нарушением витковой, корпусной и межфазной изоляции [1].

Собранные статистические данные показывают, что в подавляющем большинстве случаев (85–95%) отказы асинхронных электродвигателей вспомогательных машин электропоездов происходят из-за повреждения обмоток и распределяются следующим образом: межвитковые замыкания – 67,92%, пробой межфазной изоляции – 20,75 %, пробой пазовой изоляции – 11,32 %. Наибольший

процент всех повреждений приходится на изоляцию следующих асинхронных электродвигателей вспомогательных машин, в зависимости от места установки на МВПС и характера работы. Двигатель: вентилятора АОМ-32-4 – 26%, вспомогательного компрессора П-31 – 17%, насоса трансформатора – 8 %, компрессора МАК-160, АОСВ – 34 %, фаза расщепителя РФ1Д – 15 %.

Высокая повреждаемость изоляции асинхронных двигателей компрессоров МАК-160, АОСВ (60 % всех повреждений) объясняется тем, что они находятся в наиболее тяжелых условиях эксплуатации. Дефекты конструкции и изготовления изоляции, монтажа и ремонта также являются частыми причинами повреждений (14 двигателей, или 34 %), в большей степени они проявляются у приводов с тяжелыми условиями работы по механическим усилиям. По этим причинам большую повреждаемость имеют двигатели компрессоров и вентиляторов, у которых число пусков достигает 2000 в год.

Необходимо учесть комплекс требований и условий эксплуатации, обеспечивающий ресурс работы без замены изоляции на пробег до 5 млн км. Электротехнологии капсулирования лобовых частей обмоток статора вспомогательных электрических машин, необходимо рассматривать как перспективные [2].

В процессе взаимодействия энергии инфракрасного (ИК) излучения с пропиточной жидкостью выделяется значительное количество газа, который является поглощающей и излучающей средой. В этом случае точное решение уравнений переноса излучения и сохранения энергии с целью нахождения распределения температур и тепловых потоков в поглощающих и излучающих средах весьма сложно и трудоёмко. Требуется индивидуальный подход к составлению, решению и анализу уравнений переноса излучения и сохранения вещества и энергии с целью ресурсосбережения.

Была разработана технология капсулирования лобовых частей вспомогательных электрических машин, например типа АОСВ или МАК-160, путём изготовления оболочки для лобовой части обмотки статора. Тем самым повышены показатели влагостойкости и вибростойкости в ущерб увеличению токовых нагрузок, так как керамическая оболочка значительно снижает теплоотдачу.

Общий вид промышленной установки для реализации этой технологии приведен на рис. 2. Данная установка состоит из двух основных узлов: станины с пристроенным частотно-регулируемым асинхронным электроприводом с редуктором и установленной мощностью 3 кВт и передвижного сменного распылителя-облучателя, состоящего из трех импульсных керамических преобразователей излучения (с установленной мощностью 0,75 кВт) и трех автоматических пневматических распылителей высокого давления.

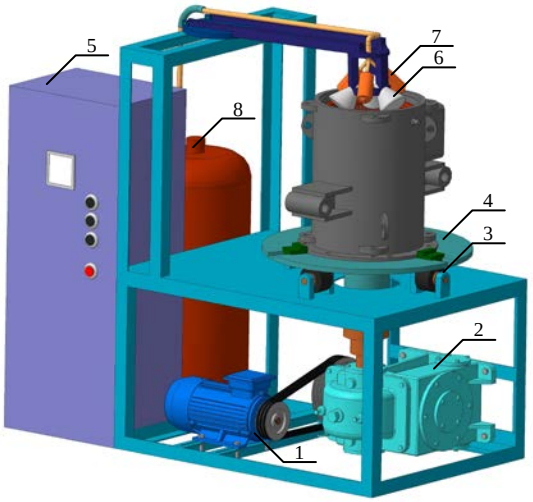


Рис. 2. Схема производственной установки для реализации эффективной технологии капсулирования изоляции лобовой части обмотки статора при осциллирующем ИК-энергоподводе: 1 – асинхронный электродвигатель с ременной передачей, 2 – понижающий редуктор, 3 – опорно-приводные ролики станины, 4 – станина для размещения статора, 5 – комплект блока управления установки, 6 – инфракрасные излучатели, 7 – распылители высокого давления, 8 – резервуар для пропиточной жидкости

Использован комплект асинхронно-частотно регулируемого электропривода, состоящего из асинхронного двигателя и частотного преобразователя фирмы ABB. Используя частотный преобразователь, выполняют плавную регулировку частоты вращения с помощью потенциометра. Станина предназначена для размещения, фиксации и обеспечения плавного вращательного движения статора вспомогательной электрической машины в широком диапазоне. Размещение и фиксация на столе осуществляется при помощи приводно-опорного и опорных резиновых роликов.

При рассмотрении вопроса внешнего лучистого теплообмена в непрерывно действующих инфракрасных установках с неравномерным полем энергетического облучения по ходу конвейера возникает необходимость определения максимально возможной длительности цикла работы излучателей, при которой обеспечивается равенство суммарного количества тепла, получаемого любым облучаемым образцом при любой скважности импульса.

При решении задач исследования по выявлению оптимальной скважности импульса работы излучателей (внутренний перенос тепла и массы)

и выработка рекомендаций по расчету максимальной продолжительности цикла осциллирования (внешний теплоперенос) позволят создать наиболее современные промышленные установки для капсулирования изоляции обмоток электрических машин и аппаратов с осциллирующим режимом ИК-энергоподвода.

Решено аналитически данное предложение по промышленной установке для капсулирования изоляции обмоток электрических машин, с помощью метода Монте-Карло (рис. 3). Проведены исследования взаимодействия системы «излучатель – материал» с помощью составления и решения дифференциальных уравнений энергетического баланса. Метод Монте-Карло заключается в статистической выборке событий для определения среднего поведения системы и базируется на теории вероятности и математической статистике.

Метод Монте-Карло несколько более труден в приложении к простейшим задачам, однако он наиболее эффективен при решении задач, в которых рассматриваются сложные геометрические конфигурации и учитываются переменные свойства. Применительно к сложным геометрическим конфигурациям преимущество метода Монте-Карло состоит в том, что путь пучка энергии описывается простыми соотношениями, в то время как в большинстве других методов требуется явное или неявное интегрирование по площадям поверхностей.

Дополнительным фактором, введенным в модель радиационного обмена между излучателем и лобовой частью, разделёнными газовой средой, является длина пути, пройденного отдельным пучком излучения прежде, чем он поглотится или покинет систему. Можно учесть переменность свойств газа вдоль пути пучка; например, искривляя пути пучков, можно учесть изменения показателя преломления среды, химический состав пропиточной жидкости. Если в процессе капсулирования сделать предположение о радиационном равновесии, то, чтобы не происходило накопления энергии, поглощение пучка средой в любой точке должно сопровождаться испусканием нового пучка в той же точке. Новый пучок можно рассматривать просто как продолжение истории поглощенного пучка до тех пор, пока не произойдет передача энергии граничной поверхности.

Для поддержания равновесия внутри системы элементарный объём dV должен испускать и поглощать одинаковый поток:

$$d^3Q_{\lambda,e} = d^3Q_{\lambda,a} = 4a_\lambda^{+}(\lambda,T,P)e_{\lambda b}(\lambda,T)dVd\lambda .$$

В одном из наиболее часто используемых способов предполагается частичное поглощение излучения в момент достижения пучком поверхности с известной поглощательной способностью. Согласно такой схеме, энергия пучка уменьшается после каждого отражения. История пучка прослеживается до тех пор, пока не произойдет достаточное число отражений, в результате которых энергия пучка станет меньше некоторого заранее заданного уровня. Этот уровень выбирается из условия, чтобы влияние пучка в последующих отражениях было незначительным.

На этом рассмотрение пучка заканчивается. Такая процедура приводит к большей точности для многих задач, так как история каждого пучка содержит в среднем значительно большее число событий, и определение средних величин при заданном числе пучков производится на основе большего числа событий.

Изучение и практическое применение актуальности темы – продления ресурса асинхронных вспомогательных машин электропоездов на основе технологии капсулирования лобовых частей обмотки статора осуществляется на базе моторвагонного депо станции Иркутск-Сортировочный. На современном этапе развития ИК-техники использование её для решения научных и практических проблем определяется выбором режимов работы современных излучателей. Такое конструктивное решение было предопределено необходимостью применения для технологии капсулирования изоляции осциллирующего (импульсного, прерывистого, импульсно-прерывистого и т. п.) режима ИК-энергоподвода с целью повышения качественных и количественных показателей процесса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Котеленец Н. Ф., Акимова Н. А., Антонов М. В. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин : учеб. для вузов. М. : ИИ «Академия», 2003. 384с.
2. Повышение ресурса тяговых электродвигателей : сб. докл. и сообщ. Науч.-техн. конф. / под общ. ред. А. Т. Осяева. М., 2004. 127.
3. Худоногов А. М., Иванов В. Н., Стецив Д. В., Оленцевич Д. А. Метод повышения ресурса изоляции обмоток электрических машин тягового подвижного состава // Безопасность регионов – основа устойчивого развития : материалы Второй науч.-практ. конф., Иркутск, 28 сент. – 01 окт. 2009. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2009. Т. 2. С. 156–160.
4. Зигель Р., Хауэл Дж. Теплообмен излучением. М. : Мир, 1975. 934 с.

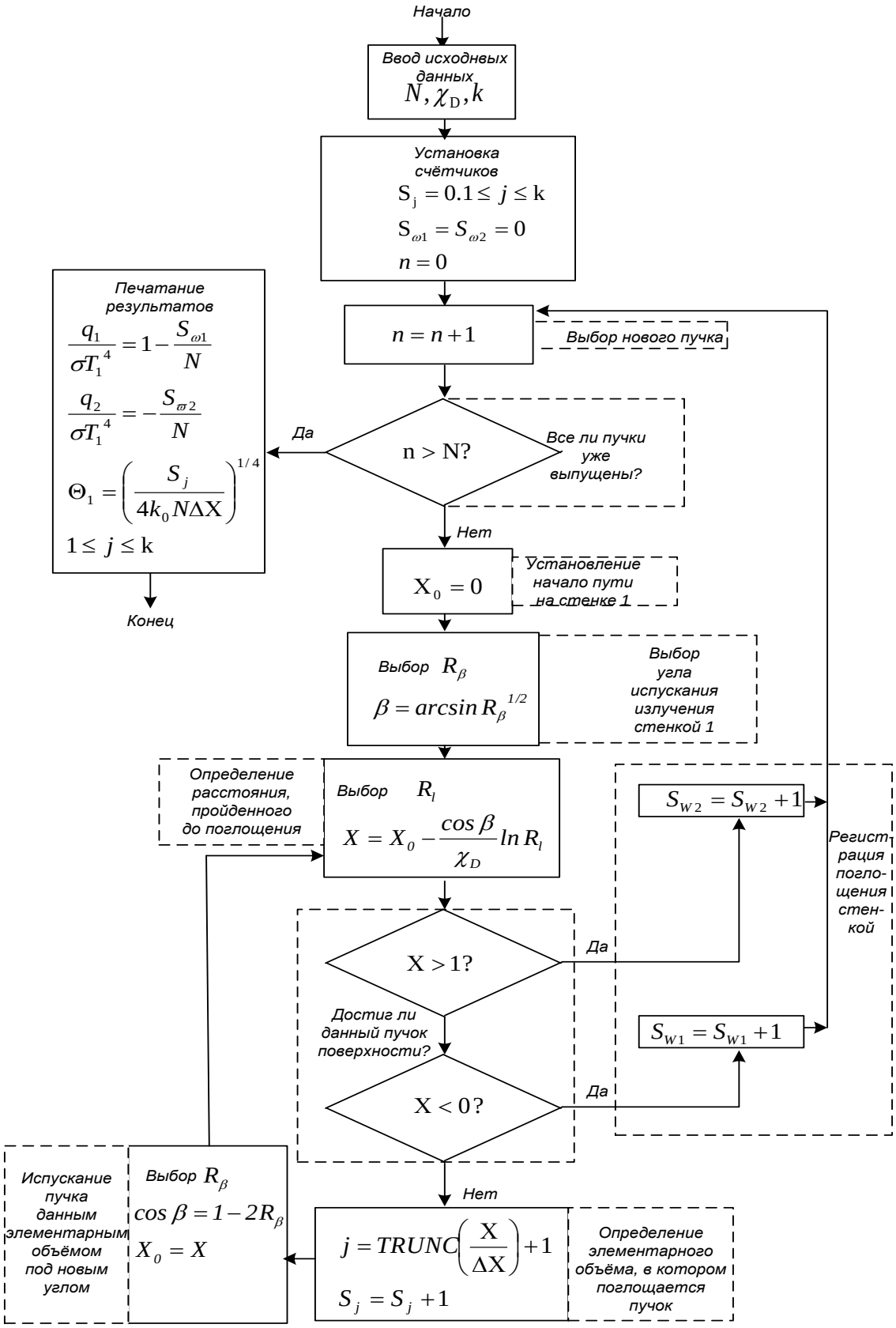


Рис. 3. Блок-схема программы расчёта методом Монте-Карло теплообмена излучением между системой «излучатель – материал»

УДК 629.488

Поздеев Александр Владимирович,
заместитель главного инженера Московской железной дороги – филиала ОАО «РЖД», г. Москва, тел. (499) 2667615, pozdeevav@mzd.ru
Кинаш Никита Жданович,
начальник конструкторского отдела Дорожного инженерного технологического центра Московской железной дороги, г. Москва, тел. (499) 2667654, n.kinash@mzd.ru
Кулаков Денис Александрович.,
заместитель генерального директора ООО «Дефконт», г. Москва, kulakov@defcont.com

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ РЕМОНТА ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

A.V. Pozdeev, H.G. Cinash, D.A. Culakov

WORKING OUT AND INCULCATING AUTOMATIC INFORMATION SYSTEM FOR REPAIRING OF CARGO CARS

Аннотация. *Рассмотрены вопросы практической реализации автоматизации процесса технической подготовки производства при выполнении деповского ремонта грузовых вагонов на базе вагоноремонтного депо Воскресенск. Показана целесообразность применения решений автоматизации контроля технологического процесса в производстве.*

Ключевые слова: *автоматизация технологических процессов, грузовой вагон, ERP-система.*

Abstract. *This paper consists the issues of practical implementation of the automation process of technical preparation of production repairing of freight cars on the basis of the car repair depot Voskresensk. The expediency of making automation process control in manufacturing is shown.*

Keywords: *automation of technological processes, freight car, ERP-systems.*

Введение

В настоящее время парк грузовых вагонов, работающих на российском рынке, на 90 % представлен подвижным составом, принадлежащим частным операторским компаниям. В данной ситуации особого внимания заслуживает вопрос поддержания в исправном техническом состоянии вагонного парка и качественного осуществления всех видов ремонта вагонов, в том числе деповских ремонтов [1, 2].

В настоящее время качество производства деповского ремонта грузовых вагонов остается насущной проблемой. Часть вагонов после прохождения деповского ремонта не отрабатывает положенного срока и преждевременно выходит из строя. Чаще всего поломки случаются в буксовом узле, автотормозном оборудовании. Предпринимаемые на предприятиях вагоноремонтных компаний – дочерних акционерных обществ ОАО «РЖД» меры по укреплению контроля за качеством ремонта, несмотря на несомненный положительный эффект, не снимают полностью существующей проблемы – обеспечения надлежащего качества ремонта грузовых вагонов и оптимизации целевого состояния деятельности депо в показателях «себестоимость – качество» [3].

В целях повышения эффективности управления деятельностью вагоноремонтного депо и роста качества ремонта грузовых вагонов на базе вагоноремонтного депо Воскресенск внедрена «Автоматизированная система управления технологическим процессом ремонта грузовых вагонов (АСУ-ТОРО В)».

Указанная система позволяет добиться решения поставленных задач за счет:

- оптимизации процесса оперативного планирования;
- паспортизации вагона и его составных узлов;
- планирования материальных ресурсов;
- пооперационного контроля технологического цикла ремонта;
- контроля списания материально-технических ресурсов на объекты ремонта;
- контроля комплектации подвижного состава и параметров его узлов;
- формирования и ведения отчетных форм;
- расчета себестоимости ремонта грузовых вагонов.

Функциональность автоматизированной системы управления технологическим процессом ремонта грузовых вагонов реализована на базе модулей ERP-системы SAP R/3.

I. Общие положения. Постановка задачи. Пути решения

В рамках настоящей статьи рассмотрен один из компонентов функциональности внедренной автоматизированной системы управления технологическим процессом ремонта вагоноремонтного депо – пооперационный контроль исполнения технологического процесса ремонта грузовых вагонов.

Контроль исполнения технологического процесса ремонта подвижного состава реализован путем пооперационного контроля следующих технологических операций ремонта подвижного состава и его составных частей:

- приемка в ремонт;
- дефектация, комплектование и передача в ремонт;
- техническое диагностирование;
- ремонт и доработка;
- сборка, монтаж;
- испытания;
- выдача из ремонта.

Указанная последовательность операций определена существующими технологическими картами на ремонт вагонов и каждого из его узлов (автосцепка, колесная пара, авторегулятор и т. д.). Строгая последовательность ввода данных и иерархическая структура подписей «запирают» ответственных сотрудников в рамки технологического процесса и позволяют контролировать процесс ремонта с рабочих мест руководителей. Упрощается система контроля над исполнением всех регламентированных действий, что, несомненно, повышает качество ремонта. Структурная схема грузового вагона в системе АСУ-ТОРО В приведена на рис. 1 на примере вагона-цементовоза.

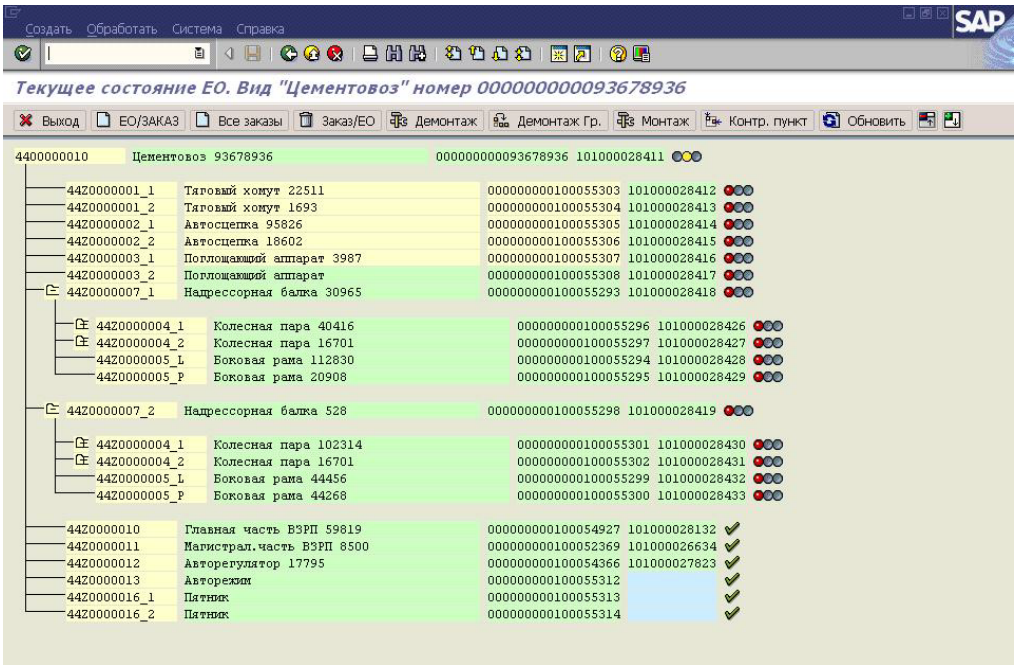


Рис. 1. Структурная схема грузового вагона

В соответствии с концептуальным проектом создания автоматизированной системы определены следующие виды деталей вагона:

- кузов вагона;
- соединительная балка;
- надрессорная балка;
- пятник;
- боковая рама;
- колесная пара;
- корпус буксового узла;
- роликовый подшипник;
- главная часть воздухораспределителя;
- магистральная часть воздухораспределителя;
- авторежим;
- авторегулятор;
- поглощающий аппарат;
- тяговый хомут;
- автосцепка.

Работа в автоматизированной системы строится на основе жизненного цикла деталей вагона и существующих технологических карт на ремонт вагона и каждого из его узлов (рис. 2).

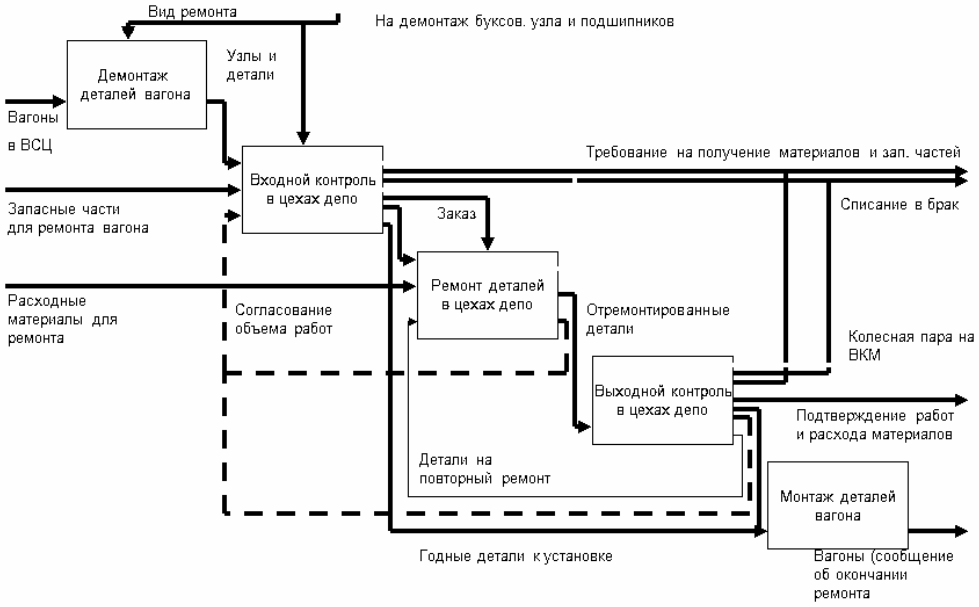


Рис. 2. Жизненный цикл ремонта деталей

В рамках перечисленных выше решений были реализованы рабочие места сотрудников вагоноремонтного депо (вагоносборочный цех, тележечный цех, ремонтно-заготовительный цех, колесно-роликовый цех, цех ремонта автотормозного оборудования, руководство) и рабочее место руководителя группы предприятий:

- рабочее место руководителя Дирекции, Центральной дирекции;
- рабочее место руководителя депо;
- рабочее место мастера/бригадира цеха (вагоно-сборочного, тележечного, ремонтно-заготовительного, колесно-роликового, ремонта автотормозного оборудования);
- рабочее место дефектоскописта (тележечного, ремонтно-заготовительного, колесно-роликового, ремонта автотормозного оборудования);
- рабочее место мастера по диагностике;
- рабочее место лаборанта колесно-роликового цеха;
- рабочее место слесаря (слесаря по ремонту подвижного состава);
- рабочее место технолога депо;
- рабочее место сотрудника отдела труда и заработной платы;
- рабочее место экономиста ТОРО депо;
- рабочее место оператора депо;
- рабочее место составителя.

Упрощенная схема взаимодействия рабочих мест представлена на рис. 3.

Пользователи автоматизированной системы выполняют операции в системе АСУ ТОРО-В на рабочих местах в соответствии с требованиями производства и штатного расписания депо. Рабочие места пользователей организованы на базе персональных компьютеров (административный персонал) и на базе производственных бесклавиатурных терминалов ввода данных. Указанное оборудование успешно эксплуатируется в неблагоприятных условиях производственных помещений, вибрации, скачков питающего напряжения, сильной запыленности и задымленности, резких перепадов температур.

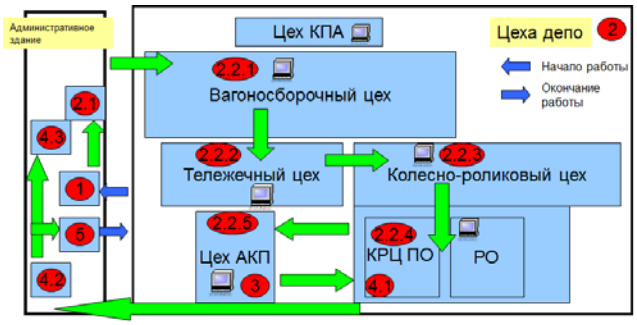


Рис. 3. Упрощенная схема взаимодействия рабочих мест: 1. Руководство депо – планирование. 2. Технологический процесс. 3. Контроль списания материалов. 4. 1. Контроль выходных параметров. 4. 2. Формирование отчетности. 4. 3. Интеграция с АСОУП (оператор). 5. Уровень руководителей депо

Использование производственных терминалов для автоматизации и контроля технологических операций непосредственно в цехах ремонта позволяет в режиме реального времени следить за соблюдением технологической дисциплины работников и перевести на более высокий качественный уровень весь производственный процесс.

Для ввода информации в реальном режиме времени на рабочих местах в производственных цехах депо и более быстрой идентификации пользователя, а также исключения доступа к системе

посторонних лиц, используются бесконтактные карты индивидуального доступа. Персональные иденти–фикационные карты обеспечивают адресную ответственность при регистрации техно–логических операций (рис. 4).

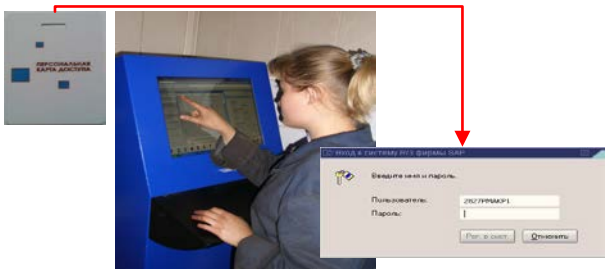


Рис. 4. Использование бесконтактных персональных идентификационных карт

Операции технологического процесса в автоматизированной системе подтверждаются «подписями» пользователей, совершающих операцию в системе. Такая подпись говорит об окончании этапа технологического процесса и подтверждает правильность и полноту данных на текущем этапе (рис. 5). Существующая иерархия состоит из девяти подписей (согласно ролям системы):

1) приемщик;
2) дефектоскопист – входной контроль;
3) бригадир/мастер – входной контроль;
4) ремонтник (рабочий);
5) дефектоскопист – выходной контроль;
6) бригадир/мастер – выходной контроль;
7) монтажник (рабочий);
8) приемщик вагонов ЦВ;
9) начальник ремонтного депо.

На основе данных, вводимых пользователями системы, формируются в автоматическом режиме и ведутся в электронном виде отчетные формы ремонтной деятельности (рис. 6).

Рис. 5. Последовательность заполнения данных для журналов и иерархия «подписей»

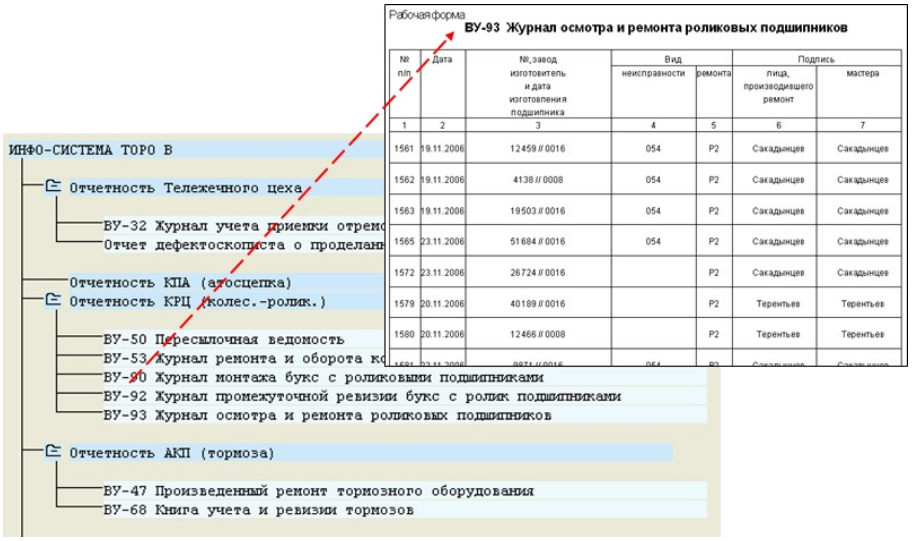


Рис. 6. Отчетные формы ремонтной деятельности

II. Особенности технологии ремонта

Процесс ремонта грузового вагона в системе АСУ ТОРО В начинается с анализа парка неисправных вагонов и планирования их в ремонт (рис. 7 и 8).

Рис. 7. Анализ парка неисправных вагонов и планирование ремонта

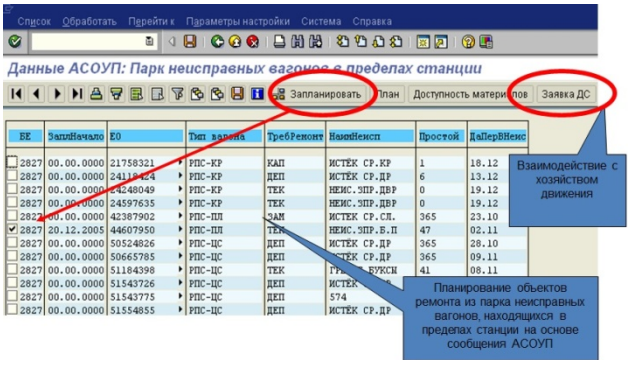


Рис. 8. Планирование объектов ремонта, выбор объектов ремонта

При разборе вагона в вагоносборочном цехе мастером или бригадиром цеха выполняется входной контроль частей вагона по паспорту. В случае несовпадения номеров деталей вагона в систему АСУ ТОРО В вносятся номера узлов по факту (рис. 9).

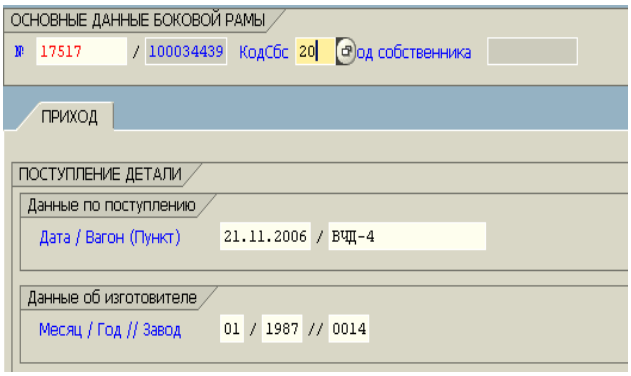


Рис. 9. Основные данные узла вагона «Боковая рама»

Мастером сборочного цеха выполняется демонтаж узлов/деталей вагона в системе АСУ ТОРО В. При этом в системе автоматически демонтированные части вагона – тележка, автосцепка, тормозное оборудование, привязываются к рабочим местам для выполнения их ремонта. Посредством монтажа/демонтажа регистрируется движение основных узлов вагона, которые отражены
в системе посредством подъединиц оборудования. Время выполнения данной операции означает начало ремонта демонтированных частей вагона. Схема технологического процесса работы вагоносборочного цеха приведена на рис. 10.

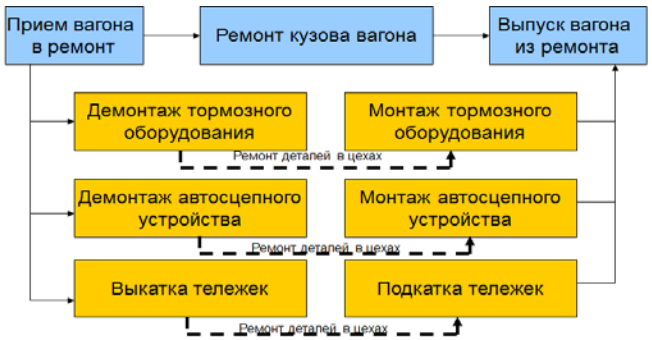


Рис. 10. Схема технологического процесса вагоносборочного цеха

После операций демонтажа и входного контроля мастера узел поступает на позицию входного контроля дефектоскопии, при этом дефектоскопист указывает следующие параметры (рис. 11):

- способ выявления (значение по умолчанию);
- код неисправности;
- зона контроля;
- величина дефекта.

При создании заказов АСУ на ремонт вагона и его частей из технологических карт, автоматически или путем выбора из списка всех возможных, в заказы АСУ копируются список операций (видов работ) и компонентов (материалов), которые необходимы для ремонта данной части вагона. Работы и материалы, относящиеся к ремонту отдельно созданного в системе оборудования вагона, создаются на заказ АСУ ремонта именно этой части вагона. Прочие работы и материалы по деталям, не созданным в системе как отдельные, относятся к заказу АСУ ремонта всего вагона.

При работе в цехах депо паспорт узла/детали наполняется данными диагностики и измерений. При этом, контролируются вводимые параметры контролируются на соответствие допустимым нормативам, в зависимости от года выпуска, видов производимого ремонта. На рис. 12 приведен внешний вид вводимой информации на выходном контроле роликового подшипника.

Система контролирует ввод параметров пользователем. При вводе ошибочных значений пользователю выдается справка (рис. 13).

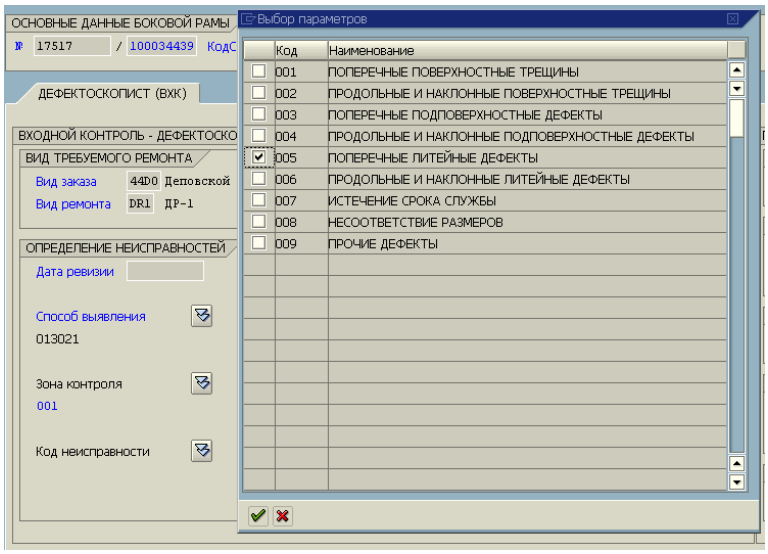


Рис. 11. Входной контроль роликового подшипника

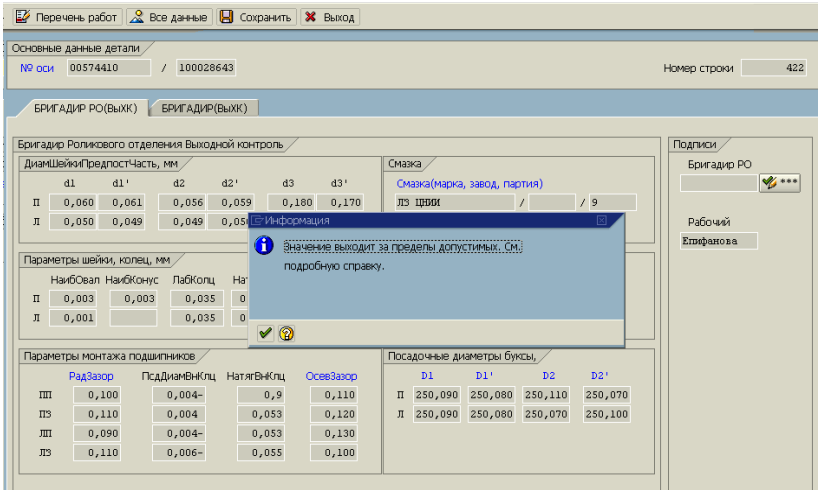


Рис. 12. Выходной контроль роликового подшипника

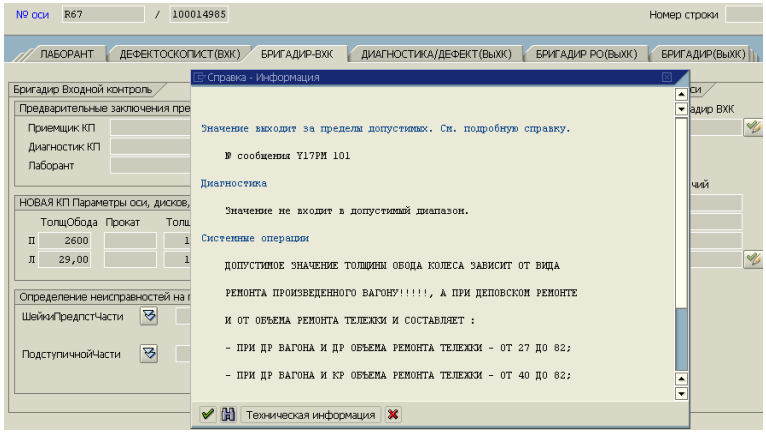


Рис. 13. Контроль выходных параметров отремонтированных деталей

Далее надрессорная балка поступает в ремонт, если он был назначен. Деталь может быть забракована либо годна и поступает на пост выпускающего из ремонта. После ремонта рабочий ставит отметку о проделанной работе (выполнено/не выполнено), после чего деталь поступает на дефектоскопирование на выходном контроле и приемку из ремонта (рис. 14 и 15). При сборке вагона мастер вагоносборочного цеха выполняет операцию монтажа в системе АСУ ТОРО В. Результатом выполнения данного пункта является новая комплектация вагона.

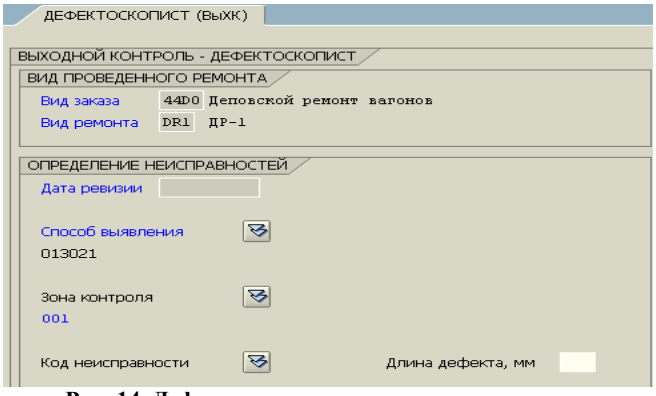


Рис. 14. Дефектоскопия на выходном контроле

В момент монтажа всех частей на вагон устанавливается статус «смонтирован» и сообщением АСОУП в АБД ПВ передается сообщение 4624 о новых составных частях вагона. При демонтаже вагона от ВЧД и монтаже его к парку исправных вагонов в АСОУП также передается соответствующее сообщение 1354 о переводе вагона в парк исправных (рис. 16).

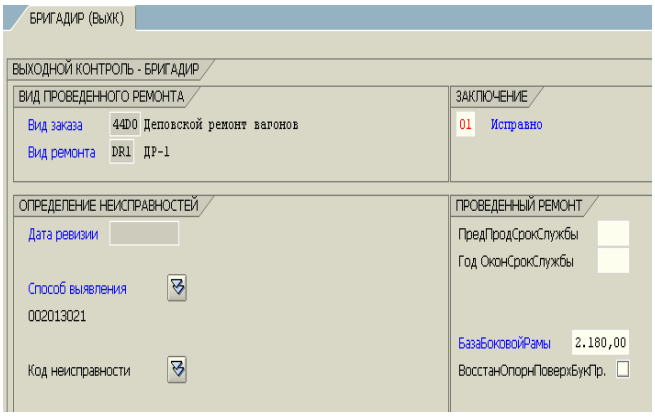


Рис. 15. Прием из ремонта

Рис. 16. Паспортизация деталей вагона

Для автоматизации ввода и контроля данных используется интеграция с контрольно-измерительной аппаратурой (КИП) депо (например, комплексом оборудования ИКР-01 для измерения параметров элементов буксового узла колёсной пары). Для получения измеренных параметров элементов буксового узла колёсной пары комплекса оборудования ИКР-01 используется рабочее место бригадира роликового отделения (рис. 17).

Комплекс оборудования ИКР-01 предназначен для измерения параметров элементов буксового узла колёсной пары. Состоит из автоматизированных установок для измерения шейки оси и внутренних колец подшипников типа УПК-01, для измерения предподступичной части и лабиринтных колец типа УПЛК-01, для измерения внутреннего диаметра букс типа УКБ-01, для измерения параметров и подбора подшипников УПП-01, УКПП-01 и УКПП-02, для подбора роликов подшипников УПР-01. Эти установки объединены в локальную сеть, по которой вся необходимая информация поступает в установку сбора данных УСД. В этой установке по команде оператора автоматически формируются протоколы по форме ВУ-90, ВУ-91, ВУ-93.

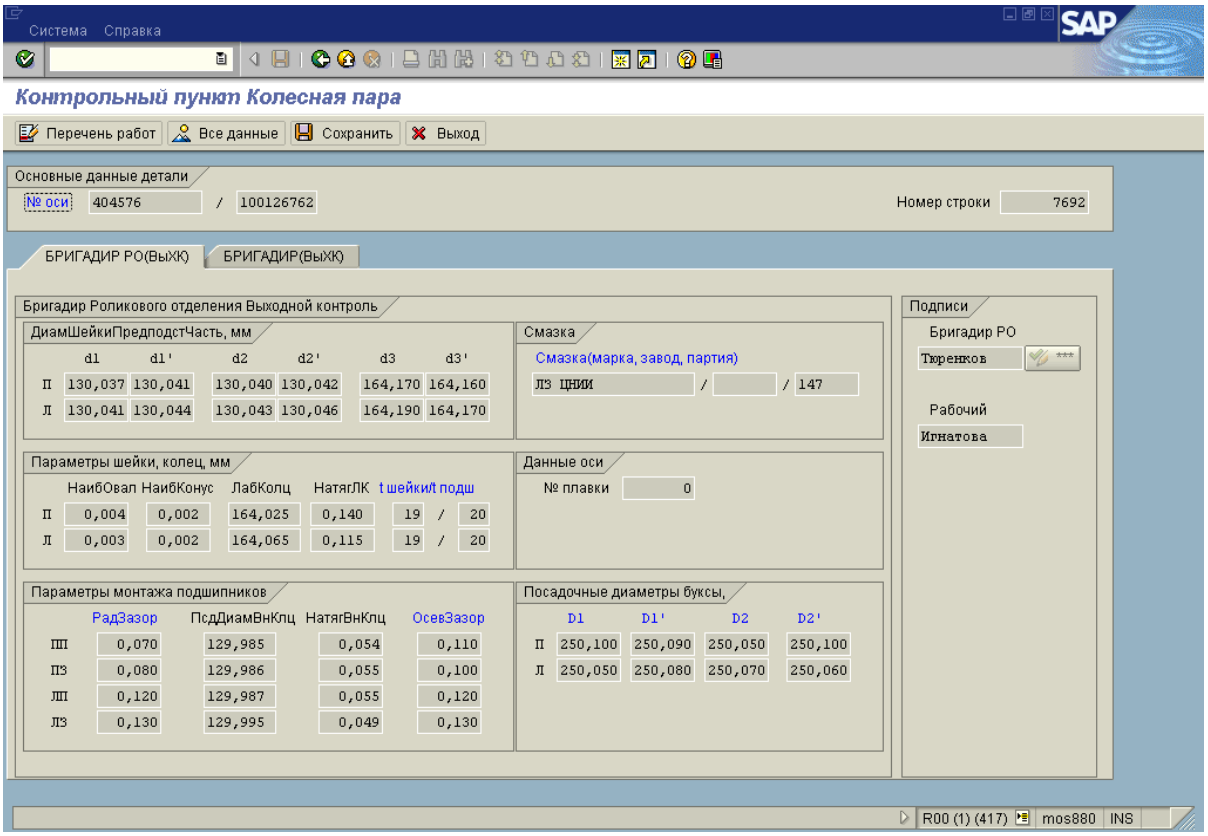


Рис. 17. Рабочее место бригадира роликового отделения

Схема взаимодействия комплекса ИКР-01 приведена на рис. 18.

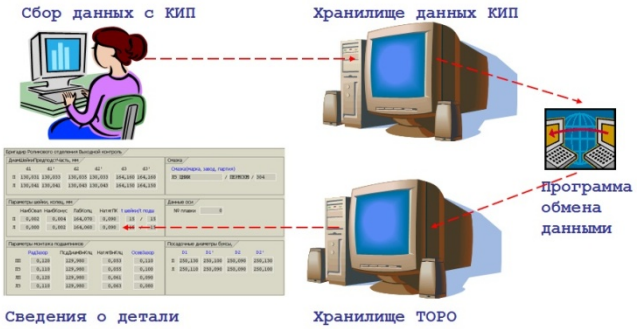


Рис. 18. Взаимодействие АСУ ТОРО В и КИП

III. Автоматизированная система управления ТОРО

Кроме всего вышеизложенного в АСУ ТОРО В для повышение эффективности принятия решений при планировании и осуществления ремонта существует блок представления информации, необходимой для принятия управленческих решений по данным АСУ (при разграничении полномочий отчетности как для отдельного ремонтного предприятия, так и для общего просмотра на уровне дирекции и центральной дирекции) (рис. 19).

Информационный блок включает в себя следующие отчеты:

- план ремонта;
- простой в ремонте;
- простой на транзакционных путях;
- обеспеченность ремонта (детали, годные к установке на вагон).

Вид отчетов по простою в ремонте и деталях годных к установке на вагон приведен на рис. 20.

Вышеперечисленные рабочие места позволяют реализовать в информационной системе технологический процесс ремонта грузовых вагонов в составе следующих функциональностей:

- взаимодействие с АСОУП в части наличия парка неисправных вагонов в пределах станции, на специализированных путях депо; АБД ПВ в части данных деталей вагона;
- планирование вагонов в ремонт с созданием поузловой модели на основе данных АБД ПВ;
- взаимодействие с ЕК АСУФР (типовое решение на ОАО «РЖД» для учета финансов и ресурсов, созданное на базе продуктов компании SAP) в части контроля обеспеченности МТР для выполнения плана ремонта;
- пооперационный контроль технологического процесса ремонта каждого узла вагона (с фиксированием времени выполнения) с вводом и контролем первичных данных, необходимых для формирования отчетных форм ВУ и отчетности уровня депо, дирекции, центральной дирекции;

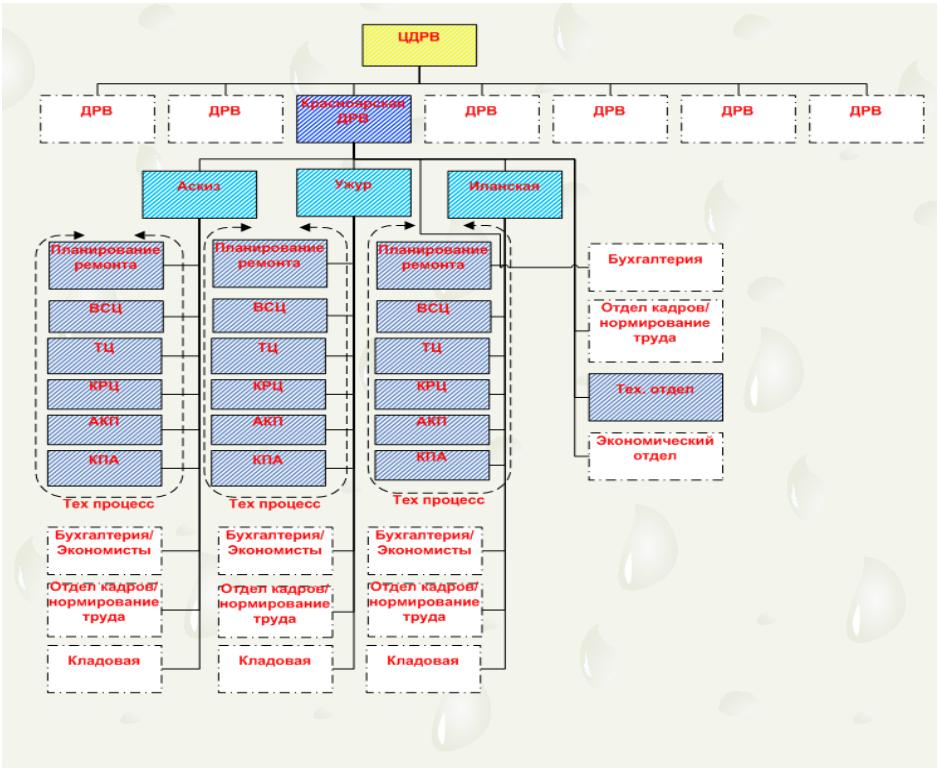


Рис. 19. Иерархия отчетности

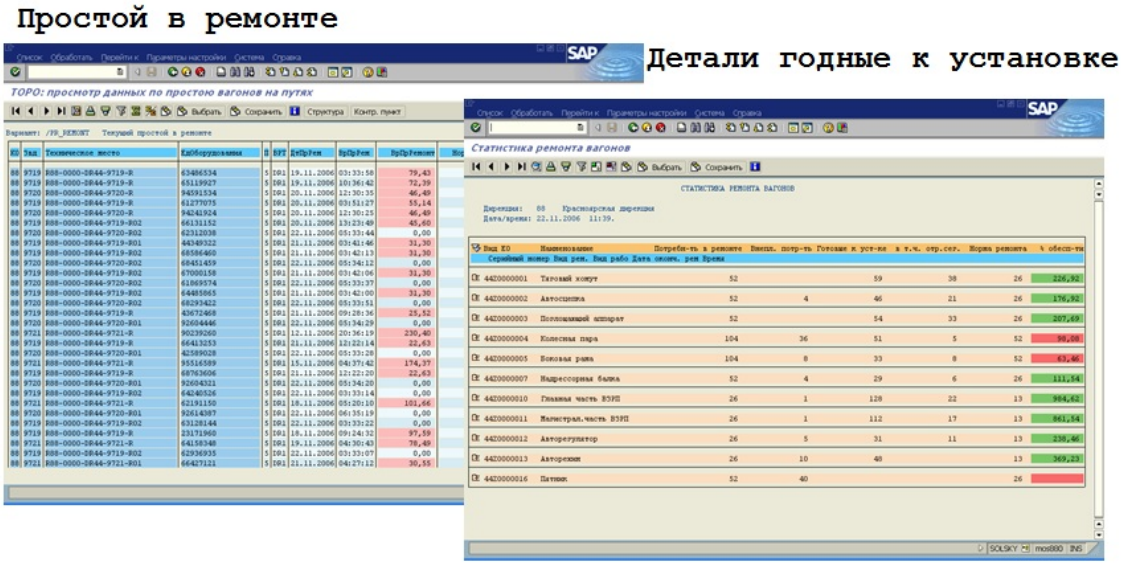


Рис. 20. Отчеты

- ведение и хранение в электронном виде (с возможностью распечатки) форм ВУ: ВУ-32, ВУ-53, ВУ-90, ВУ-92, ВУ-93, ВУ-47, ВУ-68, ВУ-31, ВУ-36, ВУ-52, ВУ-50;

- возможность формирования повременной отчетности в разрезе депо, цеха, работника;

- контроль списания материалов для нужд ремонта с взаимодействием с ЕК АСУФР в части отражения сумм затрат на ремонт грузовых вагонов в бухгалтерском учете;

- формирование поузловой себестоимости ремонта вагона в части прямых и косвенных затрат;

- ведение технологических карт ремонта (с указанием нормы расхода материалов при производстве ремонта);

- ведение расценок работ;

- взаимодействие с контрольно-измерительной аппаратурой депо.

Заключение

Реализованная в рамках автоматизированной системы управления технологическим про-

цессом ремонта грузовых вагонов функциональность по контролю исполнения технологического процесса ремонта за счет адресного назначения и контроля выполнения работ позволила повысить качество деповского ремонта грузовых вагонов, существенно сократить количество отцепок и внеплановых видов ремонта.

Система является универсальной платформой, которая позволяет выстраивать контроль технологической дисциплины, менеджмент качества и, что очень важно, планирование и контроль финансовых и материальных ресурсов в реальном времени, осуществлять точный учет затрат на ремонт конкретного вагона в точном соответствии с технологией.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рубцов А. А. Управление производством на заводах по ремонту подвижного состава железных дорог. М. : Транспорт, 1988. 262 с.
2. Совершенствование конструкции и обслуживания вагонов : сб. науч. трудов / ДИИТ. Днепропетровск, 1989. 68 с.
3. Соколов М. М. Диагностирование вагонов. М. : Транспорт, 1990. 197 с.

УДК 656.021

Банщикова Анна Анатольевна,
старший преподаватель кафедры «Управление процессами перевозок»,
Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Иркутский государственный университет путей сообщения»,
тел: 89144709415, e-mail: annabanshchikova@rambler.ru

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПРОПУСКА ИМПОРТНОГО ГРУЗА ЧЕРЕЗ ГОСУДАРСТВЕННУЮ ГРАНИЦУ

A.A. Banshchikova

IMPROVING THE SYSTEM OF CROSSING STATE BORDER FOR THE IMPORT CARGO

Аннотация. *Рассмотрено влияние деятельности государственных органов контроля и надзора на скорость пропуска импортного груза через государственную границу. Предложена принципиальная схема работы в едином информационном пространстве.*

Ключевые слова: *железнодорожный пункт пропуска, импортный груз, единое информационное пространство.*

Abstract. *The influence of the government control and supervision on the rate of import cargo crossing the state border is considered. A basic scheme to work in the common information space is proposed.*

Keywords: *state boundary, import cargo, unified information space.*

Рост внешнеторгового сотрудничества КНР и РФ ставит вопрос увеличения скорости пропуска груза через государственную границу на одном из крупнейших сухопутных пограничных переходов – железнодорожном пункте пропуска (ЖДПП) Забайкальск – Маньчжурия.

Основными причинами, вызывающими снижение скорости прохождения импортного груза на ЖДПП, являются:

1. Несоответствие объема груза и мощности технических средств по его переработке.

2. Неоднократный ввод первичной информации из перевозочных и сопроводительных документов в информационные базы каждого из участников внешнеэкономической деятельности (ВЭД), причастного к оформлению.

3. Выявление нарушений правил перевозок грузов, требующих исправления на территории РФ или возврата в сопредельное государство.

Указанные причины имеют разную природу происхождения, поэтому требуют различных подходов к решению. Для получения высокого результата необходима модернизация технических, технологических, правовых, организационных параметров. Зачастую совершенствуется техническая часть, которая, как правило, наиболее затратна.

Качественное увеличение скорости пропуска возможно при согласованной реконструкции технологии работы всех причастных структур. Для этого участники ВЭД осуществляют постоянный поиск новых форм сотрудничества в рамках действующего законодательства. Представителям

транспортного бизнеса вносить изменения в технологию работы проще, чем государственным органам контроля и надзора (Федеральные таможенная и пограничная службы, структуры Ростехнадзора – государственная фитосанитарная, карантинная, хлебная инспекции). Как правило, они обладают более гибкой структурой, цель их работы – осуществление качественной доставки груза – созвучна принципам торгово-экономического сотрудничества, в отличие от органов государственного контроля, которые призваны обеспечивать безопасность граждан и экономическую стабильность государства.

Технология работы на ЖДПП предусматривает операции государственных органов по надзору: натурный осмотр груза, контроль документов, последующее документальное оформление. На ЖДПП Забайкальск – Маньчжурия время этих процедур составляет около 30 % общей продолжительности пропуска.

Значительное увеличение технологического времени пропуска, затруднение эксплуатационной работы железнодорожной пограничной перегрузочной станции происходит при задержании импортного груза в вагоне или оформлении его на возврат. По истечении 36 часов после прибытия на ЖДПП при наличии замечаний, предъявленных государственными органами контроля и надзора или другими участниками ВЭД, груз задерживается. В случае невозможности исправить на месте – оформляется на возврат на сопредельную территорию.

Анализ данных [1] с 2000 года выявил, что задержание или возврат импортного груза в 78 % случаев происходит из-за нарушений в сфере контроля и надзора государственных органов: неверное или неполное оформление перевозочных и сопроводительных документов, запрет ветеринарных врачей, превышение радиации, веса и др.; остальное – по вине других участников ВЭД: тара не обеспечивает сохранность груза, несоблюдение особых условий перевозок, отсутствие маркировки, телеграмм об оплате, схем погрузки и др.

В среднем на ЖДПП Забайкальск – Маньчжурия число задержанных вагонов с импортным грузом составляет 15 %, оформленных на возврат – 3 %. При увеличении объема импортного груза задержка времени пропуска может достигать пяти суток.

Необходимость модернизации работы государственных органов контроля и надзора в системе пропуска очевидна. Однако важно, чтобы в результате не ослабли их функции.

Для определения шагов по совершенствованию выполним расчет интегральной оценки (рейтинга) степени влияния деятельности государственных органов контроля на скорость пропуска. В качестве примера рассмотрим импортный контейнеропоток на ЖДПП Забайкальск – Маньчжурия.

Оценка производится на основе однокритериального анализа важнейших характеристик деятельности этих структур по максимальному значению оказываемого воздействия. В качестве исходных материалов использованы аналитические отчеты, результаты обследования, экспертные оценки специалистов – участников ВЭД. Критерием, определяющим степень влияния, выступает интегральная оценка A_{U_k} (рейтинг) [2]. Для каждой U_k –ой структуры определяется:

$$A_{U_k} = \sum_{i=1}^{n} w_i a_{iU_k} , \qquad (1)$$

где w_i – весовой коэффициент для M_i–го показателя, учитывающий степень его воздействия на интегральную оценку; a_{iU_i} – баллы для M_i–го показателя и U_k–й структуры.

Прямая связь между операциями, проводимыми государственными органами контроля и скоростью пропуска импортного контейнеропотока не выявлена. Для расчета весового коэффициента выбрана нелинейная зависимость:

$$w_i = \Delta_x \exp(-x_i) , \qquad (2)$$

где x_i – середина i -го интервала, i = 1, 2,…, N; Δ_x – интервал, определенный с учетом количества показателей и размаха значений x; Δ_x = 0,5.

Деятельность Федеральной пограничной службы нацелена на обеспечение безопасности граждан, предусматривает наружный осмотр без длительного и трудоемкого оформления документов, в расчетах не учтена.

Введем следующие обозначения: федеральная таможенная служба (U_1), государственная фитосанитарная (U_2), карантинная (U_3), хлебная (U_4) инспекции.

В их работе выделены следующие показатели (M_i). Количественные:

1. Задержанные импортные контейнеры (M_1), %.

2. Контейнеры, оформленные на возврат (M_2), %. Числовые значения показателей определены в среднем за период с 2000 по 2011 год.

3. Время обработки контейнерного поезда (M_3), мин. Включает в себя натурный осмотр и оформление документов каждой из структур [3, 4].

Качественные:

1. Сложность документального оформления (M_4).

2. Сложность операций по контролю (M_5).

Уровень сложности операций определен на основе экспертной оценки специалистов по времени и трудоемкости их проведения.

Исходные данные показателей работы государственных органов контроля сведены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели работы государственных органов контроля и надзора

Структуры (U_k)	Показатели (M_i)				
	количественные			качественные	
	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5
U_1	66	15	90	очень сложный	умеренный
U_2	6	0,4	60	умеренный	сложный
U_3	4	0,2	60	умеренный	сложный
U_4.	2	0,09	60	умеренный	сложный

Для показателей определены ранги по степени их влияния. Ранжирование выполнено методом парных сравнений путем заполнения матрицы M_{ij}, элементы которой определены по формуле:

$$\begin{cases} M_{ij} = 1, \text{если } x_i = x_j, \\ M_{ij} = 0, \text{если } x_i < x_j, \\ M_{ij} = 2, \text{если } x_i > x_j. \end{cases} \quad (3)$$

Знаки равенства, «меньше», «больше» соответствуют равнозначности критериев, меньшей или большей значимости одного критерия по сравнению с другим.

Например, при сравнении показателей 1 и 2 «Задержанные импортные контейнеры» и «Контейнеры, оформленные на возврат» большее влияние на скорость пропуска оказывает последний ввиду сложности механизма процедур.

Показатель 3 «Время обработки контейнерного поезда» имеет большее значение, чем показатель 4 «Сложность документального оформления», т. к. за отведенное технологическим процессом время необходимо произвести осмотр, проверить и оформить перевозочные документы, а также отобразить данные в информационных базах. При этом важно четкое соблюдение технологической продолжительности каждой операции из-за непосредственного влияния на оперативность работы смежных служб.

Следуя аналогичной процедуре попеременного сравнения, заполняют все элементы матрицы (табл. 2).

Сумма баллов, определяющая ранг каждого из показателей, распределена неравномерно, поэтому весовые коэффициенты w_i рассчитаны по нелинейной зависимости (формула 2).

Таблица 2

Матрица парных сравнений

x_i / x_j	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	$\sum_{i=1}^{5} x_{ij}$	Ранг
M_1	1	0	2	2	2	7	2
M_2	2	1	2	2	2	9	1
M_3	0	0	1	2	2	5	3
M_4	0	0	0	1	0	1	5
M_5	0	0	0	2	1	3	4

Для показателя 2 «Контейнеры, оформленные на возврат» (ранг 1) середина интервала от 0 до 0,5 равна 0,25. Находится при $x_1 = 0,25$, следовательно, $w_2 = 0,5 \cdot e^{-0,25} = 0,389$.

Для показателя 1 «Задержанные импортные контейнеры», имеющего ранг 2, $x_2 = 0,75$, $w_1 = 0,5 \cdot e^{-0,75} = 0,236$.

Далее соответственно $x_3 = 1,25$, $w_3 = 0,143$; $x_4 = 1,75$, $w_5 = 0,087$; $x_5 = 2,25$, $w_4 = 0,0527$.

Обработка количественных показателей производится по методам квалиметрии. При выборе в качестве эталонного максимального значения показателя баллы остальных определяются:

$$a_{iU_k} = \frac{M_{iU_k}}{M_{iU_k \max}}. \quad (4)$$

При выборе в качестве эталонного минимального значения показателя баллы остальных показателей определяются:

$$a_{iU_k} = \frac{M_{iU_k \min}}{M_{iU_k}}, \quad (5)$$

где M_{iU_k} – значение M_i-го показателя U_k–й структуры; $M_{iU_k \max,\min}$ – соответственно максимальное, минимальное значение M_i–го показателя U_k–й структуры.

Чем больше значение показателя 2, тем оказывает большее негативное воздействие факт наличия контейнеров, оформляемых на возврат, на скорость пропуска грузопотока из-за возникновения заторов в эксплуатационной работе станции, нарушении синхронности обработки документов, имеющихся в наличии и поступающих вновь. В этой связи за эталонное выбирается максимальное значение показателя 2 среди всех рассматриваемых

структур. Для Федеральной таможенной службы (ФТС) (U_1) он равен 15 %, значит $M_{1U_1 \max} = 15\,\%$.

Баллы данного показателя для U_2: $a_{2U_2} = \frac{0,4}{15} = 0,027$. Интегральная оценка с учетом веса ($w_2 = 0,389$): $A_{2U_2} = 0,389 \cdot 0,027 = 0,011$.

Для остальных показателей расчет произведен аналогично.

При определении баллов для качественных показателей использована функция желательности Харрингтона [2]. Согласно ей, баллы для показателя 4 «Сложность документального оформления» структуры U_1 равны $a_{4U_1} = 0,033$, с учетом веса интегральная оценка: $A_{4U_1} = 0,0527 \cdot 0,033 = 0,002$.

Баллы показателя 4 для структур U_2, U_3, U_4 равны $a_{4U_2,U_3,U_4} = 0,53$. Интегральная оценка с учетом веса: $A_{4U_2,U_3,U_4} = 0,0527 \cdot 0,53 = 0,028$. Остальные интегральные оценки показателей рассчитаны аналогично (табл. 3).

Таблица 3

Расчет рейтинговой оценки степени влияния работы государственных органов контроля на скорость пропуска груза

Показатели (M_i)	Вес	Эталон	Структуры (U_k)			
			U_1	U_2	U_3	U_4
Количественная оценка						
M_1	0,236	66 % (max)	$\frac{1}{0,236}$	$\frac{0,091}{0,021}$	$\frac{0,061}{0,014}$	$\frac{0,03}{0,007}$
M_2	0,389	15 % (max)	$\frac{1}{0,389}$	$\frac{0,027}{0,011}$	$\frac{0,013}{0,005}$	$\frac{0,006}{0,002}$
M_3	0,143	60 (min)	$\frac{0,666}{0,095}$	$\frac{1}{0,143}$	$\frac{1}{0,143}$	$\frac{1}{0,143}$
Суммарная оценка с учетом веса			0,72	0,175	0,162	0,152
Качественная оценка						
M_4	0,0527	-	$\frac{0,033}{0,002}$	$\frac{0,53}{0,028}$	$\frac{0,53}{0,028}$	$\frac{0,53}{0,028}$
M_5	0,087	-	$\frac{0,53}{0,046}$	$\frac{0,285}{0,025}$	$\frac{0,285}{0,025}$	$\frac{0,285}{0,025}$
Суммарная оценка с учетом веса			0,048	0,053	0,053	0,053
Интегральная оценка			0,768	0,288	0,215	0,205
Рейтинг			1	2	3	4

*в числителе – оценки, рассчитанные с учетом эталонных значений, в знаменателе – с учетом весовых коэффициентов.

Согласно проведенному исследованию, наибольшее влияние на скорость пропуска оказывает ФТС. Значительную долю времени ее работы на ЖДПП составляют технологические операции по досмотру и документальному оформлению. Кратное его увеличение происходит при выявлении нарушений в сфере таможенного законодательства в результате неточности заполнения перевозочных и сопроводительных документов.

Далее в порядке убывания по степени влияния на скорость пропуска выступают: государственная фитосанитарная, карантинная, хлебная инспекции Ростехнадзора. Таким образом, основной упор совершенствования работы государственных органов контроля в системе пропуска импортного груза необходимо сделать на работе ФТС.

Для сокращения технологического времени на таможенные операции, а также минимизации нарушений законодательства, видится целесообразной организация межведомственного взаимодействия путем информационного обмена федеральных органов исполнительной власти в процессе пограничного, таможенного и иных видов контроля, осуществляемых в пунктах пропуска. Требуется разработка новых сквозных информационных технологий в рамках Федеральной целевой программы «Государственная граница РФ 2012–2017 гг.».

Одним из вариантов может быть формирование Единого информационного пространства (ЕИП) – виртуального поля деятельности и сотрудничества участников ВЭД по доставке внешнеторговых грузов, в том числе государственных органов контроля и надзора, грузовладельцев с ограниченными для повсеместного доступа секторами.

Для организации работы в ЕИП при перевозке грузов должны быть:

- подписаны международные соглашения между заинтересованными организациями, в том числе представителями таможенных органов государств, по порядку оформления и пропуска грузов;
- заключены договоры по информационному обмену данными, где бы оговаривались перечень, формат и регламент их передачи, обязанности и ответственность сторон;
- проведены соответствующие технические и технологические мероприятия.

Работа в ЕИП строится на принципах полного учета грузов, пересекающих государственную границу, оперативной передаче информации об их состоянии в пути следования.

Первым шагом для организации перевозки импортного груза в ЕИП является получение перевозчиком заявки в объеме передаточной ведомости, по отдельным видам – международной товаротранспортной накладной от грузоотправителя или представительства компании-оператора за рубежом. В качестве первичного источника информации о грузе могут также выступать перевозчики

и их агенты, брокеры, экспедиторы, крупные торговые фирмы (как российские, так и иностранные).

Далее в ЕИП на ЖДПП выполняется перевод информации с иностранного языка и ее проверка специальными службами на предмет возможности ввоза груза. При получении грузовладельцем положительного решения по предварительной заявке формируется окончательный пакет перевозочных и сопроводительных документов. Происходит отправление груза на территорию РФ (рис. 1).

Для проверки данных о предполагаемой перевозке в ЕИП необходимо обеспечение информационного взаимодействия между структурными подразделениями таможенных органов (отделы таможенного оформления и контроля, платежей, по борьбе с контрабандой и т. д.), с государственными контролирующими органами, банками.

Поступление информации в электронном виде позволяет сразу пополнить компьютерную базу учета грузов, прибывающих на территорию РФ. Из этих же полей формируются документ контроля доставки и грузовая таможенная декларация на импорт с заранее определенной правомерностью данного режима. Это значительно быстрее, чем процедура бумажного оформления, и надежней с точки зрения достоверности информации.

При передаче сведений заблаговременно таможня помимо оформления документов до прибытия груза на границу может передать информацию в досмотровую группу.

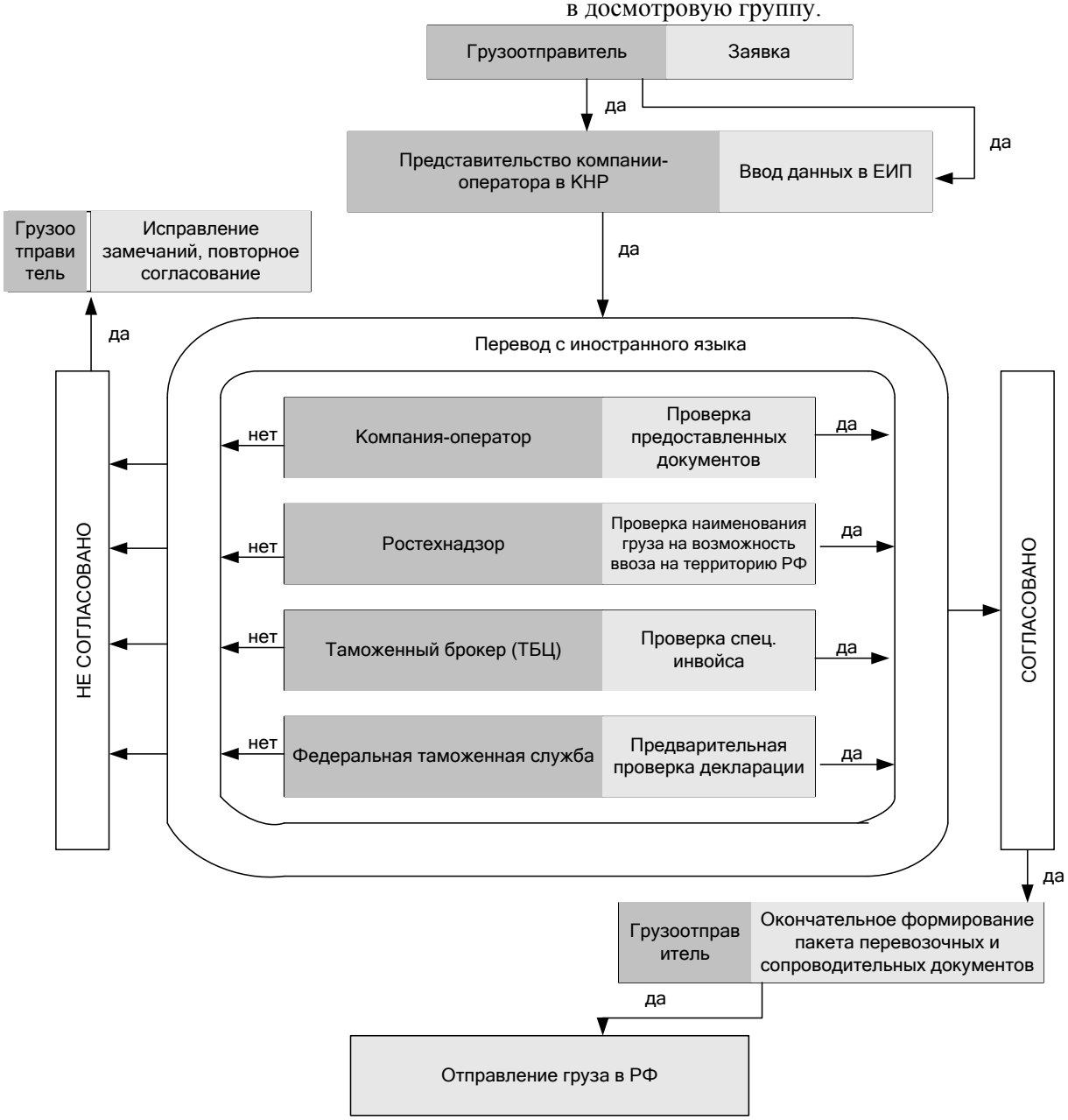


Рис. 1. Принципиальная схема согласованной перевозки импортного груза в ЕИП

На основании данных возможна подготовка решения на досмотр груза и определение стратегии его проведения. Таким образом, сокращается технологическое время на таможенные процедуры. После выполнения формальностей информация по оформленным грузам передается в таможню назначения, где ставится на контроль.

В то же время на ЖДПП для сокращения времени пропуска работа в ЕИП предусматривает однократный ввод первичной информации о грузе из перевозочных и сопроводительных документов, которая затем передается для многократного использования причастным при оформлении структурам.

Работа в ЕИП рождает вопросы технического, правового характера, такие как: выбор системы защиты информации, разработка концепции и техническое сопровождение регламентации доступа к информационным сетям и базам данных ЕИП, обеспечение параметров совместимости и сопряженность уровней технического оснащения различных функциональных звеньев информационных систем, обеспечение возможностей приема и передачи данных в форматах, принятых в международной практике, в частности – EDIFACT.

Правовой аспект заключается в использовании для декларирования информации, получаемой от зарубежных источников. По российскому таможенному законодательству правом декларирования пользуются лишь российские юридические лица. В настоящее время в технологические схемы доставки груза вводятся участники, опосредующие деятельность иностранных фирм, что не всегда идет на пользу качества информации.

Использование ЕИП для электронного взаимодействия участников ВЭД при перевозке внешнеторговых грузов обеспечивает:

- сокращение времени документального оформления (за счет уменьшения доли вагонов, оформляемых на возврат по причине неточности внесенной в перевозочные и сопроводительные документы информации);
- своевременный подвод порожнего подвижного состава под перегруз;
- ускорение и упрощение процедур оформления грузов в таможенных и других органах государственного контроля на пограничных станциях и в местах оформления грузов (за счет предварительного согласования перевозки между грузоотправителем и перевозчиком, а также их работы по принципу рамочных стандартов);
- заслон на пути контрабандных поставок;
- сокращение потерь грузов в пути следования и своевременную доставку;
- пополнение государственного бюджета (за счет более полного и качественного декларирования грузов).

При работе в ЕИП пропуск импортного контейнеропотока на ЖДПП Забайкальск – Маньчжурия возрастает в 2,5 раза, с 3 до 7,5 контейнерных поездов в сутки.

Обязательным условием внедрения ЕИП является необходимая нормативная правовая база.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аналитические отчеты Службы международных связей Забайкальской железной дороги – филиала ОАО «РЖД».
2. Лукинский В. С. Модели и методы теории логистики : учеб. пособие. 2-е изд. СПб. : Питер, 2007. 448с.
3. Технологический процесс работы железнодорожной пограничной перегрузочной станции Забайкальск Забайкальской железной дороги – филиала ОАО «РЖД».
4. Технологический процесс работы АКП Забайкальск ОАО «ТрансКонтейнер» на Забайкальской железной дороге – филиале ОАО «РЖД».

УДК 338.24

Ивановская Екатерина Анатольевна,
аспирант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВПО ИрГУПС), тел: 8 (950) 1322-512, e-mail: love2@bk.ru

АНАЛИЗ И РАЗВИТИЕ МЕХАНИЗМА ФИНАНСОВОГО УПРАВЛЕНИЯ В ХОЛДИНГЕ ОАО «РЖД»

E. A. Ivanovskaia

ANALYSIS AND DEVELOPMENT OF FINANCIAL MANAGEMENT IN THE HOLDING OF JSC «RUSSIAN RAILWAYS»

Аннотация. *Рассмотрены финансовые механизмы, в том числе применительно к Российским железным дорогам до и после реформирования железнодорожного транспорта. Проанализировано наличие инструментов после реформирования железнодорожного транспорта, выявлено, что инструмента, регулирующего отношения между дочерними обществами внутри холдинга после реформирования, не имеется, и предложен такой инструмент в виде участия в уставном капитале ДЗО, а также проведен анализ применения данного инструмента.*

Ключевые слова: *холдинг, финансовый инструмент, участие в уставном капитале, железнодорожный транспорт, ценообразование, бюджетирование.*

Abstract. *Financing mechanisms, including applicable to the Russian railways before and after the reform of the railway are considered. The availability of tools after the reform of rail transport and it was found that the instrument are analyzed for governing relations between subsidiaries within the holding after the reform is not available. As a tool, participation in the authorized capital of the subsidiary is offered, as well as an analysis of the use of this tool is given.*

Keywords: *holding, financial instrument, participation in the authorized capital, railway transport, pricing, budgeting.*

В свете произошедших в России в 90-х годах прошлого века радикальных экономических и политических перемен, в результате которых стремительно развивающаяся экономика страны столкнулась с рядом серьезных диспропорций в развитии железных дорог, стал вопрос о реформировании железнодорожного транспорта. Ключевой проблемой стал значительный дефицит инвестиционных ресурсов, повлекший за собой существенное сокращение возможностей для развития инфраструктурных мощностей железных дорог, обеспечивающих все возрастающие объемы перевозок. Именно на его преодоление прежде всего направлена реализация структурной реформы на железнодорожном транспорте

Создаваемая корпоративная схема должна была учитывать механизм финансовых взаимоотношений материнского и дочернего предприятий. Руководство должно располагать эффективными инструментами перераспределения прибылей и капиталов между материнской и дочерней компаниями. В теории в качестве механизма перераспределения выступают договоры о совместной деятельности, внутрифирменное кредитование в рамках общества взаимного кредитования, перекрестные капиталовложения, трансфертные поставки продукции или иные способы.

В общем случае управление финансами осуществляется через финансовый механизм – систему управления финансовыми отношениями организации через набор финансовых показателей, которые оказывают влияние на хозяйственную деятельность организации, с помощью финансовых инструментов.

Однако когда мы рассматриваем финансовые отношения в холдинге, к финансовым отношениям организации, которые справедливы и для холдинга, необходимо добавить еще существенные отношения, которые при управлении финансами одной организации не рассматриваются, а именно отношения между участниками холдинга.

Если рассматривать холдинг как объединение отдельных юридических лиц, то возникает необходимость и в специализированном наборе финансовых инструментов, использование которых при управлении финансами одной организации либо нецелесообразно, либо вообще невозможно. К таким финансовым инструментам, присущим холдингам, можно отнести:

– трансфертное ценообразование;

– заимствования между участниками холдинга;

– финансирование путем участия в капитале [1].

Возможности перераспределения ресурсов между участниками холдинга ограниченны.

Одним из самых распространенных способов перераспределения прибыли в пользу одной из компаний холдинга является трансфертное ценообразование. Трансфертная цена – это принципиально не рыночная цена, она формируется не для достижения коммерческой прибыли, а для уменьшения издержек и налоговых расходов. Трансфертные цены выступают как цены передачи товаров, продукции, работ, услуг в системе холдинга.

Трансфертное ценообразование (в некоторых источниках [2] используют понятие «внутрифирменное ценообразование») представляет собой инструмент, используемый как особый вид ценовой дискриминации, если он применяется для установления различных цен на промежуточные товары подразделений фирмы с целью максимизации совокупной прибыли фирмы в целом. Иными словами, в данном случае в качестве дискриминируемых потребителей выступают отдельные подразделения фирмы. Здесь можно выделить два случая трансфертного ценообразования как института ценовой дискриминации, в зависимости от наличия или отсутствия внешнего рынка для промежуточного продукта подразделения фирмы.

Также выделяются отдельно инструменты бюджетирования. Первый из инструментов бюджетирования финансового взаимодействия основного и дочернего общества – централизованный механизм, который предполагает, что все подконтрольные организации осуществляют свою деятельность на основе единого консолидированного бюджета, утверждаемого основным обществом. Независимо от финансовых результатов того или иного дочернего общества их финансирование осуществляется на основе одинаковых базовых нормативов. Бюджетный процесс при подобном варианте финансового механизма в холдинге основан на периодическом обсуждении финансовых заявок дочерних обществ, то есть доходы всего холдинга консолидируются в едином учетном центре и, по решению руководства основного общества, распределяются между участниками холдинга. Этот вариант финансового планирования предполагает высокий уровень финансово-бухгалтерских технологий и менеджмента участников холдинга.

Второй, децентрализованный, способ организации финансового взаимодействия между основным и дочерними обществами основывается на принципе оперативной самостоятельности дочерних обществ в пределах, установленных основным обществом. В этом случае подконтрольные организации холдинга имеют собственный бюджет, в значительной степени зависящий от результатов их работы. Уровень самостоятельности дочерних обществ определяется долей доходов, которой они могут распоряжаться без согласования с основным обществом. Этот способ движения финансовых потоков влечет за собой возможность центробежных тенденций со стороны дочерних обществ.

Система финансовых отношений выражается в распределении функций управления (анализ, планирование, организация, контроль и регулирование производственных и других экономических процессов) и ответственности между головной и дочерними компаниями. К этим функциям можно отнести:

- стратегическое финансовое планирование по холдингу в целом, разработку и утверждение стратегических планов каждого участника группы;
- разработку инвестиционной, кредитной, налоговой политики холдинга;
- регулирование финансовых потоков группы;
- разработку перспективных финансовых планов, утверждение текущих и оперативных планов;
- разработку системы бюджетирования в группе;
- определение системы внутреннего ценообразования;
- утверждение инвестиционных проектов и контроль над эффективностью использования инвестиций;
- разработку учетной политики для целей бухгалтерского, налогового и управленческого учета;
- осуществление консолидированного учета в группе;
- утверждение направлений расходования прибыли;
- контроль над финансовой деятельностью участников холдинга.

Распределение перечисленных функций по уровням головной и дочерней компаний обусловливает вид управления со стороны головной компании и, как следствие, степень осуществления контроля над финансовой деятельностью других участников, входящих в структуру холдинга.

Процесс поэтапного реформирования отечественного железнодорожного транспорта сопровождается постепенным формированием рыночных отношений и конкурентной среды по видам деятельности в составе ОАО «РЖД» в качестве

основного (материнского) общества, переходом в соответствии с целевой моделью к образованию холдинга «РЖД» и дальнейшим его развитием по периодам стратегии до 2015 и 2030 гг. [4].

Целевой моделью для ОАО «РЖД» является модель стратегического холдинга, который управляет портфелем синергетически-связанных бизнесов, и в котором корпоративный центр выполняет функции стратегического целеполагания, контроля и координации развития видов бизнеса с целью максимизации синергетического эффекта.

Стратегический холдинг «РЖД» ориентирован на повышение собственной стоимости, главным образом за счет развития эффекта синергии бизнесов, входящих в его портфель. Корпоративный центр холдинга «добавляет стоимость» за счет эффективного управления портфелем бизнесов и создания дополнительной стоимости за счет оказания бизнес-единицам эффективных общекорпоративных услуг. Корпоративный центр холдинга реализует управленческие функции по формированию портфеля бизнесов и распределению инвестиций между ними.

Главной особенностью холдинга является то, что, с одной стороны, он является совокупностью нескольких юридических лиц, а с другой – единым целым, и именно эта особенность оказывает наиболее существенное влияние на систему финансового менеджмента в холдинге. Финансовый менеджмент - это процесс управления денежным оборотом, формированием и использованием финансовых ресурсов организации. Под финансовыми ресурсами понимаются денежные средства, имеющиеся в распоряжении предприятия и предназначенные для обеспечения его эффективной деятельности, для выполнения финансовых обязательств и экономического стимулирования работающих.

Конкретные формы и методы реализации функций и решения задач финансового менеджмента определяются финансовой политикой предприятия (организации). В рамках единой финансовой политики, разрабатываемой на высшем уровне управления, определяются в глобальном масштабе источники финансовых ресурсов и их распределение в рамках фирмы. В современных условиях главная особенность финансовой политики фирм состоит в комплексном использовании финансовых инструментов, причем в зависимости от конкретных условий преобладающее значение в отдельные периоды может придаваться тому или иному инструменту.

Выделяют три основные категории финансовых инструментов:

– денежные средства (средства в кассе и на расчетном счете, валюта);

– кредитные инструменты (облигации, форвардные контракты, фьючерсы, опционы и др.);

– способы участия в уставном капитале (акции и паи).

Создаваемая корпоративная схема должна учитывать механизм финансовых взаимоотношений материнского и дочернего предприятий, и руководство должно располагать эффективными инструментами управления компанией.

До начала процесса реформирования система управления железными дорогами в России носила территориально-отраслевой характер (так называемая 4-уровневая система, которая, по мнению российских разработчиков, является недостаточно эффективной).

При данной системе все финансовые инструменты управления филиалами (денежные и кредитные) были сосредоточены на уровне дороги, а именно:

– на уровне дороги функционировал единый расчетный счет для всех;

– взаиморасчеты за выполненные работы, оказанные услуги между этим филиалами происходили на внутреннем хозяйственном расчете;

– заказы для подразделений и филиалов дороги всегда были гарантированны;

– финансово-экономический механизм представлял собой централизацию всех функций управления, планирование, оплату труда, ценообразование, финансирование, учет, контроль, анализ.

По замыслу программы реформирования 4-уровневая система РЖД преобразована в 3-уровневую систему, в которой само понятие «железная дорога» ликвидируется. Региональные представительства не должны заниматься непосредственным оперативным управлением хозяйственной деятельностью. В их функции входит взаимодействие с местными органами власти, представителями бизнеса и СМИ, обеспечение реализации инвестиционных проектов, анализ и прогнозирование спроса, разработка региональной маркетинговой стратегии и путей достижения конкурентных преимуществ, трансграничное сотрудничество, единая кадровая политика, решение социальных вопросов, организация антитеррористической деятельности и др. [3].

В связи с необходимостью повышения конкурентоспособности на внутреннем и внешнем рынках падение объема перевозок и отсутствие достаточных источников для содержания инфраструктуры требуют не только принятия экстенсивных мер по сокращению расходов, но и повышения эффективности по каждому виду бизнеса ОАО «РЖД». Для достижения этого результата

было проведено выделение из состава ОАО «РЖД» ряда дирекций – дочерних филиалов компании с самостоятельным балансом, бюджетом и структурой внутреннего управления.

В соответствии с программой развития железнодорожного транспорта до 2030 года, утвержденной распоряжением Правительства РФ от 17.06.2008 г № 877-р, дочерние и зависимые организации должны быть экономически заинтересованы в улучшении результатов собственной деятельности, нести за нее экономическую ответственность, обеспечивать управление активами для повышения рентабельности деятельности. В связи с этим следует выделить отдельно задачи дочерних структур, осуществляющих прочие виды деятельности, способствующие реализации целей транспортного холдинга:

- увеличение предложения объема подрядных услуг и продукции прочих видов деятельности предприятиями, входящими в ОАО «РЖД»;
- оптимизация структуры собственного производства продукции и приобретение ее на рынке для максимизации эффективности;
- повышение эффективности деятельности холдинга в привлекательных и перспективных сегментах рынка прочих видов деятельности для реализации своих потенциальных возможностей;
- оптимизация цен на услуги, оказываемые участникам холдинга в соответствии с требованиями единой политики и стратегических задач его развития [4].

Вследствие данных преобразований дороги были лишены своих денежных и кредитных финансовых инструментов управления вновь созданными ДЗО. Однако малая часть содержания финансового инструмента осталась в виде ежегодного составления инвестиционной программы с выделением денежных средств для выполнения работ и оказания услуг для нужд ОАО «РЖД» созданными ДЗО и регулированием ценообразования в виде утверждения индексов для расчета стоимости выполняемых работ и оказываемых услуг ДЗО для нужд ОАО «РЖД».

Из анализа нормативной базы холдинга ОАО «РЖД» и анализа финансовых взаимоотношений головной компании с ДЗО можно сделать вывод, что инструментом финансового управления является бюджетирование. Данный инструмент позволяет планировать и контролировать экономический результат деятельности ДЗО и холдинга в целом в непосредственной увязке с принципами и методами российского бухгалтерского учета. Помимо того, что консолидация деятельности даёт собственнику холдинга явные преимущества, она создаёт сложности в управлении ими. В то же время существует возможность решения вопросов финансового обеспечения деятельности одних структур за счёт временно свободных ресурсов других.

Однако существующий механизм составления и исполнения бюджетов холдинговых компаний не позволяет в полной мере решать поставленные задачи.

Это в основном связано с различными проявлениями отрицательного эффекта масштаба бизнеса, который заключается в снижении управляемости, в том числе в части финансовых потоков.

Такой финансовый инструмент, как участие в уставном капитале ДЗО, появился только на уровне головной компании. Таким образом, в результате реформирования большая часть финансовых инструментов перешла непосредственно во вновь созданные ДЗО.

Обеспечение капиталом дочерних предприятий со стороны владельцев группы компаний является главным инструментом финансового управления.

Как правило, при построении холдинговой интегрированной структуры головная организация участвует в капиталах дочерних и зависимых обществ. Именно участие головной компании в капитале дочерней организации собственным капиталом характеризует ее непосредственный долгосрочный вклад в финансирование этой организации. Кроме того, и другие участники группы также участвуют в капитале друг друга. В ряде случаев целесообразно перекрестное участие в капиталах организаций. Тогда отношения между участниками холдинга, которые владеют акциями других участников холдинга, могут строиться по следующей схеме: взамен полагающихся дивидендов по акциям ДЗО будет оказать услуги или поставлять товаров другому ДЗО по стоимость данных услуг не на рыночном уровне, а с заранее оговоренным дисконтом, не менее 15 % от стоимости выполняемых работ, указанным в договоре купли-продаже акций, что приведет, в свою очередь, к снижению затрат.

Для применения данного инструмента необходимо провести дополнительную эмиссию ценных бумаг с выпуском именных акций для взаимного обмена данными акциями между ДЗО.

Анализ экономической эффективности применения финансового инструмента «взаимное участие» в уставном капитале ДЗО проведем на основе последних отчетных данных за 2010 год.

Общим собранием акционеров, состоявшимся 24.06.2011 г., было принято решение о распределении чистой прибыли Общества по итогам работы в 2010 году в сумме 1 469 313 тыс руб.

Так, при выпуске дополнительных обыкновенных акций в размере 1000 акций дивиденды на акцию составили бы 967,02 руб.

Одним из контрагентов, оказывающих услуги для ОАО «Росжелдорпроект», является сибирское отделение «ВНИИЖТ» – филиал ОАО «РЖД», который выполняет работы по договору субподряда.

Таблица 1

Направления использования чистой прибыли 2010 года

Назначение	Размер
Нераспределенную прибыль 2010 года	1 469 313 тыс. руб
Дивиденды за 2010 год	1 322 371 тыс. руб
Количество акций	1 366 467 шт.
Дивиденды на 1 обыкновенную акцию, 2010 год	967,73 руб

Сумма работ, выполненных в 2010 году по договору субподряда, составляет 8 060,723 тыс руб.

При условии выделения «ВНИИЖТ» из состава ОАО «РЖД» в качестве ДЗО и применения инструмента «взаимного участие» в уставном капитале между ОАО «Росжелдорпроект» и «ВНИИЖТ» с указанием дисконта в размере 15 % сумма дивидендов составила бы для «ВНИИЖТ» 967 730 руб. в год. Тогда, в соответствии с условием применения данного инструмента, стоимость субподрядных работ составила бы 6 851,614 тыс. руб. При применении данного инструмента экономия составила бы 1 209,108 тыс. руб.

Однако нельзя забывать, что в строку экономии будут входить еще сокращение транзакционных издержек, к которым относят затраты организации по определению и защите прав собственности на продукцию, издержки оценки риска проводимой коммерческой операции. При этом если решение вопросов защиты прав собственности регламентируется существующей институциональной средой и представляет собой целый свод законов и обычаев (хотя ни одно законодательство не дает стопроцентной защиты прав собственности во всех случаях), то оценка риска – это более сложная проблема.

Оценивая эффективность инструмента взаимного участия в уставном капитале, следует отметить, что помимо экономии и снижения транзакционных издержек, в случае отсутствия взаимных работ в текущем году, у ДЗО с меньшими экономическими показателями за текущий период возможно улучшение отдельных экономических показателей, за счет разницы в полученных и выплаченных дивидендов.

Так, внедрение финансового инструмента обеспечивает улучшение показателей, отражающих платежеспособность и финансовую устойчивость предприятия, что подтверждает целесообразность применения финансового инструмента взаимного участия в уставном капитале ДЗО.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андронаки Т. А. Организация государственного регулирования корпоративного сектора российской экономики : дисс. … канд. экон. наук. М., 2001.
2. Белова А. Г. Вопросы управления железнодорожным транспортом в период реформирования // Экономика железных дорог. 2002. № 11. С. 10–18.
3. Гурьев А. От видов деятельности – к бизнес-единицам, от четырех уровней к трем с половиной // РЖД-Партнер. 2008. № 18. С. 6–18.
4. Программа развития железнодорожного транспорта до 2030 года : распоряжение правительства РФ № 877-р от 17.06.2008 г. // Собрание законодательства РФ. 2008. № 29, ч. II. Ст. 3537.

УДК 681.5

Евсевлеева Лариса Геннадьевна,
к. х. н., доцент кафедры «Высшая математика»,
Ангарская государственная техническая академия (АГТА),
тел(8-3955) 51-29-50

МЕТОДОЛОГИЯ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА В ТЕОРИИ НЕПРЕРЫВНЫХ ПРОТОЧНЫХ СИСТЕМ

L.G. Evsevleeva

METHODOLOGY OF SYSTEM ANALYSIS IN THE THEORY OF CONTINUOUS FLOW SYSTEMS

Аннотация. *Изложены методологические основы исследования непрерывных проточных реакторов, основанные на рассмотрении энергетического состояния гомогенной реакционной системы, реализующейся в условиях ламинарного потока. Совокупность процессов, определяющих стационарное состояние в проточном аппарате, предложено описывать с помощью заимствованного из неравновесной термодинамики понятия о скорости производства энтропии σ_S, величина которой может быть оценена по восходящему участку пика сигнала аналитического прибора, соответствующего образованию продукта реакции.*

Ключевые слова: *системный подход, сложные системы, объект, внешние и внутренние факторы, проточная система.*

Annotation. *Methodological research foundations of continuous flow reactors are based on energy conditions of homogeneous reaction systems in laminar flow. The authors suggest that the whole set of processes defining the stationary state in continuous flow apparatus should be described with the help of the non-equilibrium thermodynamics concept which deals with the speed of entropy σ_S. Its value can be measured with ascending part of signal peak of analytical instrument that corresponds to formation of reaction product.*

Keywords: *system approach, complex systems, object, external and internal factors, continuous flow system.*

Непрерывные проточные реакторы представляют собой сложные системы, включающие несколько операций, каждая из которых является отдельным объектом исследования. Например, дозирование, инжекция, смешивание реактантов, собственно реакция, детектирование, прием продуктов реакции.

Традиционные разработки, как правило, ориентируются на описание физического размывания пробы образца в потоке (дисперсия), моделирование параметров гидравлических коммуникаций, влияющих на дисперсию и изучение сходных физических явлений, практически без учета специфических особенностей протекания реакций в этих условиях [1]. В работах [1–2] рассмотрены отдельные вопросы теории проточных систем; известно, однако, что за формирование аналитического сигнала, отвечающего концентрации продукта реакции ответственны все процессы, протекающие не только в потоке, но и в цепях передачи информации. Таким образом, исследования отдельных объектов или процессов непрерывных проточных систем нарушает принцип системности. При изучении непрерывных проточных реакторов необходимо учитывать, что они являются сложной системой и включают большое количество элементов, находящихся в развитых связях.

Один из наиболее эффективных методов создания и исследования химико-технологических процессов основан на системном подходе, предполагающем разработку части с учетом целого. Такой подход предполагает рассмотрение объекта разработки, в качестве некоторой системы, на нескольких взаимообусловленных уровнях, логическим следствием чего и является структура исследуемого объекта. Поэтому данный подход называют системно-структурным [3]. Суть системного подхода состоит в том, чтобы, опираясь на понимание системы как комплекса взаимосвязанных элементов, найти совокупность законов, объясняющих функционирование и развитие различных систем. Системный подход характеризуется стремлением построить целостную картину изучаемого объекта. Конкретно это выражается в следующем [4]:

- при исследовании объекта как системы описание одного из элементов не является самодостаточным, поскольку элемент описывается не как таковой, а с точки зрения его места в системе;
- в системном исследовании один и тот же элемент может одновременно выступать обладающим различными параметрами, характеристиками, функциями и даже принципами строения;
- исследование системы должно быть неотделимым от условий ее функционирования;

- спецификой системного подхода является взаимное порождение и переход свойств целого и свойств элементов друг в друга;

- для системного исследования недостаточно только причинного объяснения функционирования заданного объекта. В частности, для большого класса систем характерна целесообразность как неотъемлемая особенность их поведения;

- источник преобразования системы лежит в самой системе, поскольку все это связано с целесообразностью ее поведения. Наиболее существенной чертой многих системных объектов является их самоорганизуемость. С этой особенностью тесно связана и другая отличительная черта: для системы или ее элементов обязательно допускается наличие некоторого множества индивидуальных характеристик и степеней свободы.

Системный подход позволяет рассматривать различные по своей природе и схожие объекты с единой системной точки зрения, выявляя важнейшие характерные черты функционирования системы и учитывая наиболее существенные для всей системы факторы.

Системный подход обеспечивает основу для определения внешних и внутренних факторов в виде интегрированного целого, он дает возможность определить функции, как систем, так и подсистем.

Деление объекта на элементы имеет смысл до тех пор, пока у элементов сохраняется «системное качество», описывающее свойство объекта как системы. Этот последний носитель данного качества системы является ее неделимым элементом.

Как показывают проведенные ранее исследования [5], при прочих равных условиях на непрерывную проточную систему наибольшее влияние оказывает непосредственно химическая реакция. Конечно, подразумеваются достаточная скорость химической реакции – она должна быть существенно больше скорости размывания пробы и ее диффузии в движущейся пробке образца – и устойчивость образующегося продукта реакции. При проведении химико-технологического процесса в условиях потока рабочие среды находятся в неравновесном состоянии. Эти сложные процессы рассматриваются с таким учетом распределения движущих сил во времени и пространстве, при котором необратимость процесса в целом, оцениваемая диссипацией энергии (производством энтропии) была бы минимальна [6, 7]. Это – принципиальное отличие от состояния равновесия, когда скорость производства энтропии равна нулю. Таким образом, знание величины этого теоретического параметра позволит охарактеризовать степень приближения стационарного состояния к равновесному и, следовательно, полноту использования реакции в условиях стационарного потока. Применение к проточной системе основных принципов линейной неравновесной термодинамики [8] исходит из ее основного уравнения, связывающего диссипативную функцию $\sigma_S T$ с химическим сродством A и скоростью реакции во всей системе ω:

$$\sigma_S T = A\omega, \qquad (1)$$

где σ_S – скорость производства энтропии в системе, T – температура.

Наполнение этого выражения химическим смыслом, выполненное на основе применения обобщенной субстанции к образующемуся продукту реакции, учета термодинамического потока, вызванного химическим сродством A как термодинамической силой, а также роли диффузии и перемещения зоны образца в «пробке» носителя позволили связать величину σ_S и параметры проточной системы в виде уравнения:

$$\sigma = -R \cdot D \cdot V \cdot \nu_i^{-1} \cdot k^{-1} \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \cdot \ln \frac{h}{h_{\max}}, \qquad (2)$$

где R – универсальная газовая постоянная; ν – стехиометрический коэффициент; D – коэффициент дисперсии; V – объем пробы; k – коэффициент, пропорциональный градуировочной зависимости для высоты пика; h – текущее значение силы сигнала, $h_{\max}$ – максимум сигнала, отвечающий 100 %-ному завершению реакции.

Для реакций первого порядка, реализующихся в непрерывных проточных системах, когда концентрацию одного из реактантов можно считать постоянной, можно записать следующее выражение для $h_{\max}$:

$$h_{\max} = K'c(ML)c(M)\xi k, \qquad (3)$$

где K' – условная константа суммарного равновесия реакции комплексообразования: $M + L \rightarrow ML$; $c(M)$, $c(ML)$ – концентрации металла комплексообразователя и образовавшегося комплекса соответственно; ξ – степень протекания реакции. Применительно к непрерывным проточным системам ξ может быть определено экспериментально [9], как отношение ξ, достигаемое в стационарном и равновесных состояниях:

$$\xi = \frac{\xi_{стац}}{\xi_{равн}} = \frac{h_{стац}}{h_{равн}}, \qquad (4)$$

где $h_{стац}$ и $h_{равн}$ – соответствующие высоте пиков сигналы детектора в стационарном и равновесном состоянии (рис. 1).

Величина K' в (3) может быть найдена по следующей обобщающей формуле [9]:

$$\lg K' = \left\{\lg \beta(ML) - \lg \alpha(M,OH) - \lg \alpha(L,H)\right\}, \qquad (5)$$

где $\beta(ML)$, $\alpha(M,OH)$, $\alpha(L,H)$ – константы устой-

чивости комплекса, гидролиза металла и протонирования комплексоната.

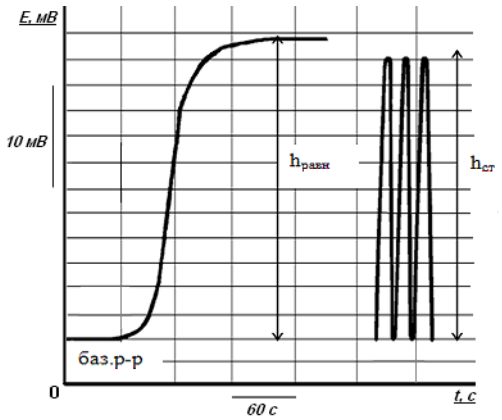


Рис. 1. Результаты детектирования образовавшегося комплексного соединения в равновесном и стационарных состояниях. $h_{ст}$, $h_{равн}$ – стационарные и равновесные сигналы соответственно. Рабочий цикл: 1 – установка базовой линии раствора носителя, 2 – сканирование сигнала при установке потенциала, 3 – регистрация пиков для неравновесного процесса

Величины, входящие в зависимости (1)–(5), описывают протекание процесса, происходящего в рабочем пространстве непрерывного проточного реактора.

Рассматриваемая система относится к динамическим, то есть зависит от времени. Изменение системы во времени отражается в ее состоянии, характеризующейся внутренним параметром. Внутренняя характеристика определяет текущее значение выходных величин – параметров эффекта. Согласно принятой гипотезе, параметры эффекта оптимизируемого процесса выводятся из энергетического состояния проточной системы. На рис. 2 изображена структура математической модели непрерывного проточного реактора, которая состоит собственно из систем математических моделей, необходимых для проведения оптимизации, и тесно связанной с этой моделью базой данных.

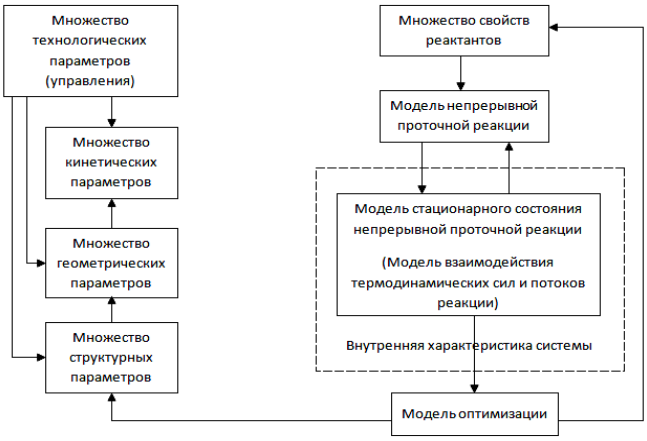


Рис. 2. Структура математической модели непрерывного проточного реактора

Основу базы данных составляет множество термодинамических параметров процесса комплексообразования, являющихся в данном случае управляемыми [10].

Множество термодинамических параметров процесса сформулировано из термодинамических требований к процессу.

Таким образом, методология, основанная на применении принципов системного анализа к непрерывным проточным реакторам, позволяет разработать нетрадиционные подходы к оценке степени совершенствования стационарного состояния по величине скорости производства энтропии, сопровождающей формирование продукта реакции в условиях потока, и получать новую информацию о выполнении конкретного технологического процесса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kolev S.P. Flow Injection Analysis : Theoretical Basis: World Sci., 1996. 250 p.
2. Trajanowicz M. Flow Injection Analysis. Instrumentation and Applications World Sci., 1999. 500 p.
3. Klir G. Architecture of System Solving N. Y. Plenum, 1985. 460 p.
4. Половинкин А. И. Основы инженерного творчества. М. : Машиностроение, 1988. 456 с.
5. Евсевлеева Л. Г., Добрынина Н. Н., Корчевин Н. А. Энтропийные характеристики комплексообразования на границе раздела фаз // Изв. вузов. Сер. Химия и химическая технология. 2007. Т. 50. Вып. 8. С. 83–85.
6. Булатов Н. Н., Лундин А. Б. Термодинамика неравновесных физико-химических процессов. М. : Химия, 1984. 336 с.
7. Цирлин А. И., Миронова В. А., Амелькин С. А. Процессы минимальной диссипации // ТОХ. 1997. Т. 31. № 6. С. 649–658.
8. Еремин Е. Н. Основы химической термодинамики. М. : Высш. шк., 1978. 391 с.
9. Евсевлеева Л. Г., Кирик М. С. База данных для реакции вытеснения, реализующихся в условиях потока с последующим ионометрическим детектированием // Изв. вузов. Сер.: Химия и химическая технология. 2011. Т. 54. Вып. 2. С. 18–20.
10. Евселеева Л. Г., Гозбенко В. Е., Кирик М. С. Использование интеллектуальной компьютерной системы для прогнозирования аналитических свойств проточного анализа при косвенном определении металлов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 2. С. 166-170.

УДК 625.111

Мамитко Андрей Александрович,
аспирант кафедры «Изыскания, проектирование, постройка железных дорог и управление недвижимостью» ИрГУПС,
тел: 8 914 8956450, e-mail: mamitko@yandex.ru

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ОЧЕРТАНИЯ ПУТИ ПО ДАННЫМ СЪЕМКИ СТРЕЛ ВАГОНОМ-ПУТЕИЗМЕРИТЕЛЕМ

A.A. Mamitko

RAILWAY TRACK SPATIAL OUTLINE RECONSTRUCTION BASED ON RAIL MEASURING VEHICLE DATA

Аннотация. *В статье рассматриваются предпосылки к созданию, принцип и этапы работы метода восстановления пространственного очертания линии железнодорожного пути в плане на основе хордово-стреловой съемки по данным вагона-путеизмерителя. В рамках разработанного метода поставленная задача решается «как есть» – находится в определенном смысле наиболее вероятная из линий на плоскости, удовлетворяющая исходным данным съемки. Разработка метода выполнена по заказу компании – производителя путеизмерительного оборудования с целью заменить устаревшее решение, используемое в ее продукции.*

Ключевые слова: *хордово-стреловые методы съемки, съемка железнодорожного пути, положение пути в плане, данные вагона-путеизмерителя.*

Abstract. *This paper describes development background and common principles and stages of execution of new developed method aimed at railway track outline reconstruction being based on measuring vehicle data represented with sag values survey. Within developed method the problem of line reconstruction is being solved "as-is" in meaning of finding the most probable shape of line satisfying original survey measurements. Described method was developed on request for railway track measuring equipment supplier company in order to replace existing solution.*

Keywords: *chords and sags survey, railway track survey, track horizontal alignment, track measuring vehicle data.*

В настоящее время при организации изыскательских и проектных работ на железной дороге происходит или уже произошел переход к координатным способам определения и закрепления положения пути в плане [1].

С одной стороны, необходимость применения координатных технологий обусловлена возрастающими требованиями к обеспечению геометрической правильности в очертаниях кривых большого радиуса и протяжённых прямых участков, что, в свою очередь, продиктовано организацией скоростного и высокоскоростного движения [2].

С другой стороны, использование координатных и, в частности, спутниковых технологий значительно ускоряет съемку плана железнодорожного пути [3], а возрастающая доступность этих технологий и необходимость повышения эффективности изыскательских работ делают их применение неизбежным.

Координатные способы съемки (GPS/ГЛОНАСС, геодезическая съемка) дают сопоставимые величины ошибки определения пространственного положения пути в каждой отдельной точке, мало зависящие или независящие вовсе от расстояния между ними. В то же время из-за относительно большой (сантиметры) ошибки определения пространственного положения, взаимное расположение близко лежащих точек определяется не вполне достоверно, вследствие чего возможности координатных способов съемки в определении локальной кривизны пути существенно уступают традиционным стреловым способам съемки [4, 5].

Кроме того, несмотря на переход к координатным технологиям при выполнении реконструкции, текущее обследование и содержание пути в плане по-прежнему часто, и даже в основном, выполняется с использованием методов, основанных на хордах и измерении стрел прогиба [6], как ручным способом, так и с применением путеизмерительной техники.

При обработке данных о стрелах, полученных в результате проезда вагона-путеизмерителя, традиционно используется подход, основанный на представлении изменения величины измеренной стрелы как процесса с той особенностью, что вме-

сто параметра времени выступает пикетажная координата на оси пути. Это позволяет использовать подходы и методы теории автоматического управления (ТАУ): предобразование Лапласа, передаточные функции, амплитудно-частотные характеристики и пр. [6, 7].

Среди преимуществ такого подхода стоит отметить, что аппарат ТАУ хорошо проработан и давно и широко используется в различных областях техники; реализация методов не требовательна к вычислительным ресурсам вплоть до того, что может быть выполнена без применения микропроцессорной вычислительной техники вовсе.

Принципиальная особенность моделирования очертания пути с помощью передаточной функции заключается в том, что в соответствии с принципами ТАУ изменение стрелы принимается как параметр процесса, т. е. величина, зависящая от времени.

С одной стороны, в определенных случаях в теоретической физике время рассматривается как полноценная координата наравне с пространственными координатами. С другой стороны, в ее прикладных разделах, и тем более в инженерных дисциплинах, имеет смысл выделять параметр времени. Формально его отличие от пространственных координат заключается уже в том, что на настоящем этапе развития науки и техники невозможно влиять на перемещение вдоль этой координаты, или, иными словами, недоступно сколько-нибудь существенно изменять скорость и недоступно вовсе изменять направление течения времени.

На практике для рассматриваемого вопроса о представлении линии пути как процесса изменения величины стрелы прогиба при прохождении по пути вагона-путеизмерителя это обстоятельство приводит к тому, что обратная последовательность замеров стрел (соответствующая обратному движению) не даст представления об очертании пути, идентичного прямой последовательности. Такая особенность моделирования пути «как процесса» является комплексным следствием еще одного допущения, неявно принятого при выборе подхода, о чем будет сказано далее.

Измерение стрелы прогиба имеет целью получить величину кривизны пути в точке и некоторой ее окрестности. Набор таких промеров, полученный при проезде вагона-путеизмерителя, даст представление о кривизне линии пути в каждой его точке.

Если отказаться от использования передаточных функций для моделирования линии пути в пользу некоторой гладкой линии на плоскости, имея достаточно густо распределённую последовательность промеров кривизны для этой линии, можно в соответствующей степени достоверно восстановить ее пространственное очертание.

К сожалению, при таком подходе неявно делаются два серьезных допущения.

Первое заключается в том, что при измерении кривизны как величины стрелы прогиба линия пути в зоне измерения представляется дугой окружности, на которую опирается измерительная хорда [7], т.к. только в этом случае величину, определенную в результате замера, можно достоверно считать кривизной линии в точке замера (рис. 1).

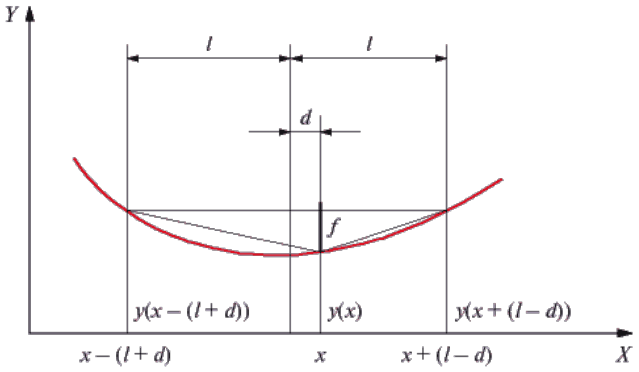


Рис. 1. Расчетная схема измерительной системы с несимметричной хордой

На практике следствием этого допущения является искажение очертаний и, в особенности, положений границ элементов переменной и нулевой кривизны (переходных кривых и прямых вставок соответственно), «потеря» коротких прямых вставок в S-образных кривых.

Второе допущение хоть и вытекает из первого, но имеет свое практическое следствие. Его суть заключается в том, что упускается из виду факт того, что на определяемую величину стрелы прогиба влияет не только неровность пути в точки измерения стрелы, но и неровности в местах опирания хорды. Следствием этого является искажение информации о положении и величинах неровностей пути.

Идея использования некоторой гладкой линии на плоскости как модели пространственного очертания линии железнодорожного пути в плане очевидна.

Если для определения формы этой линии попытаться отказаться от каких-либо существенных допущений, задача восстановления ее очертания по набору промеров стрел, выполненных вагоном-путеизмерителем, представляется в следующем виде.

Необходимо найти наиболее вероятную среди всех возможных гладкую линию на плоскости, такую чтобы она соответствовала каждому замеру стрел прогиба с учетом местоположения замера,

величины стрелы прогиба, длины хорды и смещения относительно ее середины в случае использования несимметричной схемы. Под соответствием понимается то, что для каждого замера при опирании его хорды расстояние от точки замера на искомой линии до соответствующей точки на хорде будет равно величине стрелы этого замера.

В качестве «наиболее вероятной линии» автору представляется целесообразным принять линию, имеющую наименьшее количество изгибов и неровностей, позволяющих ей соответствовать промерам стрел.

Суть этого предложения заключается в том, чтобы исключить «домысливание» неровностей пути, о существовании которых нет прямых сведений. Формально это требование можно представить как необходимость минимизации «суммарного» (интегрального) изменения кривизны искомой линии от точки к точке.

Функционал такого вида традиционно используется при построении гладких линий, удовлетворяющих каким-либо условиям к их пространственному положению и очертанию [8].

Полученная линия, удовлетворяющая этим требованиям, будет являться хорошей моделью линии железнодорожного пути в плане, а вероятно, и лучшей среди тех, которые возможно восстановить по набору стрел прогиба, полученному при проезде вагона-путеизмерителя.

Аналитическое решение вышеописанной задачи (нахождения такой линии) если и существует, то является чрезвычайно сложным и, во всяком случае, автору неизвестно.

Кроме того, не исключены изменения или дополнения требований к искомой линии, такие как дополнительные данные съемки, сведения об ошибках измерения и пр., что потребовало бы серьезных, если не коренных, переработок аналитического метода решения.

По этим причинам вместо попыток получения такого метода, рискованных с точки зрения гарантированности результатов, автор нашел целесообразным направить усилия на разработку численного метода решения задачи.

На начальном этапе разработанного метода выполняется построение первого приближения линии пути. Операция выполняется на основе данных промеров стрел.

Каждый промер представляется «жесткой конструкцией» – треугольником с двумя вершинами на концах измерительной дуги и одной в точке «конца стрелы, лежащего на линии пути» (в случае нулевой стрелы треугольник вырождается в отрезок прямой).

Далее такие треугольники последовательно «собираются в цепочку», такую что вершины трех соседних треугольников в последовательности оказываются на некоторой гладкой линии. Этим достигается то, что и через вершины всех треугольников в последовательности можно провести линию, гладкую достаточно, чтобы считать ее приемлемым начальным решением в рамках разработанного метода.

В целом процесс построения первоначального решения не представляет исследовательских или технических трудностей, однако содержит деталь, на которой, по мнению автора, стоит заострить внимание.

Алгоритм построения линии должен обладать симметричностью относительно последовательности входных данных. Иными словами, обратная последовательность промеров стрел прогиба (представляемых в виде треугольников) должна дать то же самое решение. Необходимость соблюдения этого условия вытекает из того очевидного факта, что форма линии пути не зависит от направления проезда вагона. Реализация соблюдения этого условия заключается в удовлетворении определенных требований к способу взаимного расположения каждой из последовательных троек треугольников в цепочке.

Забегая вперед, отметим, что на начальных этапах при реализации метода корректность его работы проверялась на синтетических моделях линии пути, построенных на основе проектных характеристик его элементов. Вычислительные эксперименты с использованием этих моделей показали, что при правильном выборе способа построения троек треугольников в цепочке первоначальное приближение линии пути уже является неплохим решением в том смысле, что позволяет достаточно точно определить очертание линии с точностью до положений границ элементов плана и значений их параметров.

К сожалению, при работе с реальными данными в работу алгоритма «вмешиваются» короткие неровности линии пути [9], микронеровности рельсов [6], а также, вероятно, ошибки измерительной аппаратуры.

Не лишено смысла утверждение о том, что в некоторых случаях такие изгибы и неровности рельсов не представляют ценности при определении очертания линии пути [9, 10], однако в данном случае они уже «содержатся» в измеренных величинах стрел прогиба, и при обработке данных съемки с ними приходится считаться. Это одна из причин, по которым начальное решение, каким бы удачным оно ни было, должно быть улучшено.

На втором этапе работы метода выполняется процедура – аналог оптимизации. Аналогия заключается в том, что производится последовательное улучшение первоначального решения с точки зрения его удовлетворения ранее сформулированному требованию о гладкости при сохранении соответствия каждому из промеров стрел. Оптимизацией в полной мере выполняемую процедуру назвать нельзя, т. к. нет формальных гарантий того, что найденное в итоге решение будет доставлять глобальный минимум целевому функционалу [11].

Кроме того, использовать термин «оптимизация» в данном случае автору представляется неконструктивным в том смысле, что известные общие принципы разнообразных методов оптимизации не отражают содержания выполняемой операции.

В отличие от традиционно принятого выделения параметров управляемого («оптимизируемого») объекта и того или иного способа их изменения с целью достижения оптимального состояния в данном случае целесообразнее говорить о непосредственном изменении самого объекта, временно оставив за рамками обсуждения способ реализации этих изменений, как несущественный с точки зрения принципов и целей выполняемой операции.

Суть операции заключается в последовательном улучшении очертания линии, полученной на начальном этапе, с целью повышения ее гладкости и обеспечения соответствия измеренным стрелам прогиба. Интуитивно эту операцию легко представить как поперечную «рихтовку» линии в отдельных точках, такую что исключается возможность создания новой неровности в точке «приложения воздействия». Способ улучшения очертания некоторой линии посредством ее постепенного и плавного «выгибания» в направлении требуемой формы очевиден. Такой же принцип, только для улучшения модели проектного положения линии пути, был с успехом использован В.А. Бучкиным в диссертационной работе, посвященной автоматизированному проектированию реконструкции плана и профиля железных дорог [1].

Геометрическая реализация описанной «рихтовки» как элементарного шага операции связана с расчетами и геометрическими построениями, не представляющими сложности, но объемными.

Кроме того, очевидно, что конкретный способ, использованный автором в настоящей работе, не является единственно возможным или даже наиболее удачным, хоть и выполняет свою функцию. По этим причинам (а также из-за ограниченности объема статьи) описание геометрической реализации рихтовки оставлено за пределами настоящей публикации.

Стоит отметить лишь, что операция реализована так, что затрагивает только небольшую окрестность точки рихтовки.

На практике это имеет два существенных положительных следствия.

Первое заключатся в том, что вычислительная сложность алгоритма близка (или даже соответствует) линейной, что означает лишь пропорциональное увеличение потребности в вычислительном времени и ресурсах при увеличении длины обрабатываемого участка.

Второе следствие заключается в том, что обработка участка может выполняться в нескольких вычислительных потоках параллельно с пропорциональным увеличением производительности [12], что особенно актуально при обработке больших объемов данных, а также при необходимости получения информации в режиме реального времени (непосредственно при проезде вагона-путеизмерителя).

Улучшающие рихтовки линии выполняются для каждой точки замера стрелы, при этом за один «проход» выполняется сдвиг точки на величину, как можно меньшую в теории, а на практике достаточно малую, чтобы не привести к существенным изменениям формы линии, но достаточно большую, чтобы выполнение всего этапа метода укладывалось в приемлемый интервал времени.

Соображения здравого смысла подсказывают, а вычислительные эксперименты подтвердили, что величина «оптимизирующего» сдвига должна определяться расстоянием между точками замера стрел и составлять некоторую долю от него (в программной реализации использована величина 1/10).

По мере приближения очертания линии к искомому величина сдвига за одну итерацию уменьшается для каждой из точек.

Искомое состояние линии считается достигнутым, когда ни одну из точек нельзя сместить на величину, большую, чем некоторое пороговое значение, не ухудшив при этом состояние линии.

Порог выбирается как величина практически разумной и доступной точности определения очертания линии пути (в реализации использована 1,0–0,1 мм − в зависимости от источника данных и необходимой оперативности обработки).

«Схождение» метода обеспечивается тем, что каждая элементарная операция, улучшая линию в точке своего приложения, не ухудшает ее в целом.

Полученная в итоге линия считается моделью линии пути в плане, восстановленной по имеющимся данным стреловой съемки.

Описанный метод был разработан и реализован автором в программном обеспечении по заказу компании – производителя железнодорожной путеизмерительной техники, в частности вагонов-путеизмерителей.

В процессе разработки проверка метода на адекватность результатов выполнялась с использованием как синтетических моделей линии пути, построенных по проектным параметрам, так и на основе реальных данных, полученных вагонами-путеизмерителями.

При проверке на синтетических моделях метод показал полную идентичность восстановленной линии плана относительной исходной, включая воспроизведение положения границ элементов плана и значения их параметров.

Один из этапов проверки метода на пригодность для обработки данных реальных измерений выглядел следующим образом.

По данным промеров стрел на несимметричной хорде 21,5 м производилось восстановление очертания линии пути, а затем по восстановленному очертанию «предсказывались» значения стрел прогиба на хорде 17,5 м (рис. 2).

Для того чтобы исключить вероятность «подгонки» особенностей работы метода под желаемый результат, тестирование выполнялось на стороне заказчика.

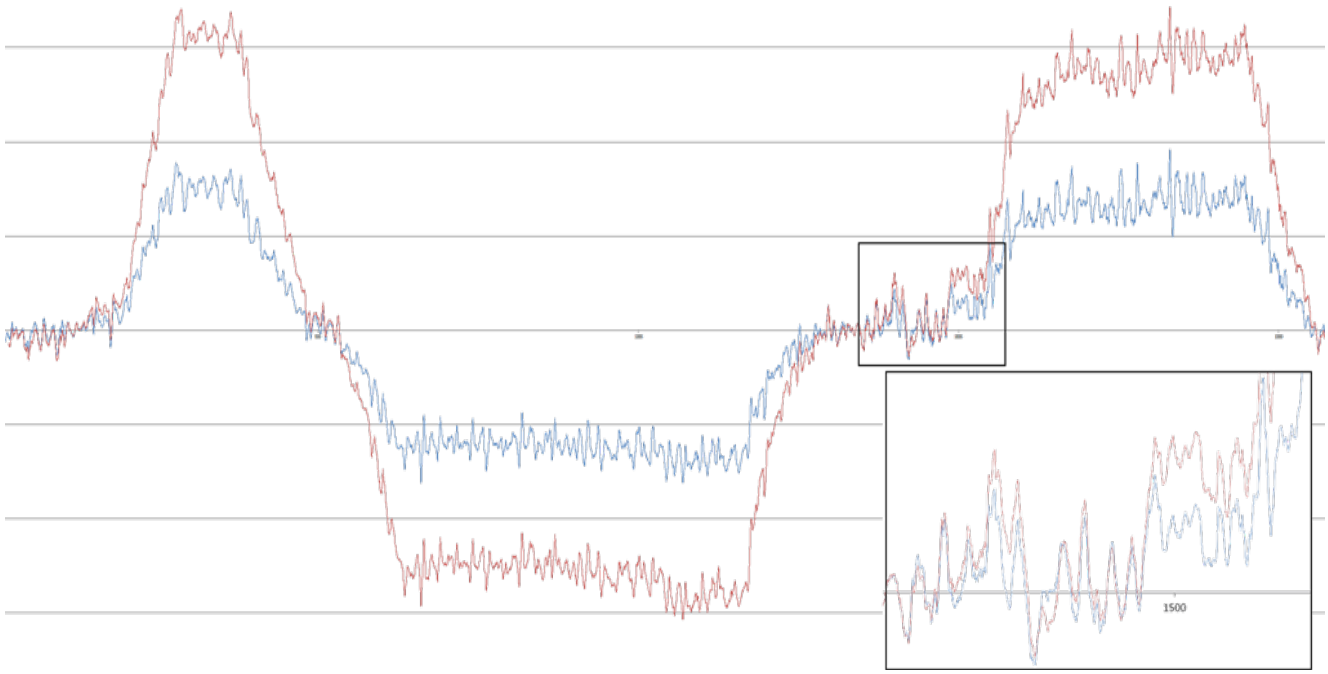


Рис. 2. Результат пересчета стрел прогиба на несимметричной хорде 21,5 м к стрелам на хорде 17,5 м

Согласно требованиям компании-заказчика, разрабатываемый метод должен был заменить решение, используемое в продукции компании. По результатам тестирования разработка получила высокую как сравнительную, так и абсолютную оценку представителей компании.

Анализируя выполненную работу и полученный результат, одним из вероятных недостатков разработанного метода автор видит недостаточную теоретическую обоснованность некоторых моментов выполняемых операций (вероятно, это общая для области и подходов проблема; на положительный практический «вычислительный опыт» как на критерий истинности ссылаются и другие авторы [1]).

В ряду достоинств полученного решения следует выделить устойчивость к ошибкам измерений, возможность работы с замерами стрел как на симметричных, так и на несимметричных хордах любой длины, в том числе и в рамках съемки одного участка.

Кроме того, благодаря своей интуитивной простоте и использованию численного метода – аналога оптимизации предлагаемый автором метод предоставляет возможности для своей модификации с учетом новых сведений о существующем состоянии линии пути.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методология автоматизированного проектирования рекострукции плана и профиля железных дорог / Бучкин В. А. : дис. … докт. техн. наук. М. : МГУПС, 2001. 47 с.

2. Нормы допускаемых скоростей движения электропоездов ЭВС «Сапсан» по железнодорожным путям колеи 1520мм. / Минтранс России. Утв. приказом от 10 дек. 2009 г. № 229.
3. Попов Г. Н. Сравнительный анализ съемки II пути на ст. Облепиха (ВСЖД ПЧ-2) путеизмерительной тележкой, оборудованной ГНСС приемником, и электронным тахеометром, с отвязкой от рабочей геодезической сети (РГС) // Особенности проектирования и строительства железных дорог в условиях Дальнего Востока : межвуз. сб. науч. трудов. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2012. С. 121−128.
4. Корженевич И. П. Влияние точности съемки методом стрел на результаты рихтовки // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта : материалы науч.-техн. конф., посвящ. 125-летию Свердловской железной дороги. Екатеринбург. – Екатеринбург: УрУГПС.
5. Мамитко А. А., Подвербный В. А. Комбинирование стреловых и координатных методов съемки железнодорожного пути с целью повышения точности определения пространственных очертаний плана пути // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 1 (33). С.274–278.
6. Боронахин А. М. Гупалов В.И., Филипеня Н.С. К вопросу о синтезе путеизмерительных комплексов нового поколения // Железные дороги мира. 2004 – Вып. №8 – С 44-52.
7. Коган А.Я. Петуховский С.В. К вопросу о расчете положения пути в плане // Вестник ВНИИЖТ. 2002. Вып. 1.
8. Шикин Е. В., Плис Л. И. Кривые и поверхности на экране компью-тера. Руководство по сплайнам. М. : ДИАЛОГ-МИФИ, 1996. 240 с.
9. ЦПТ–46/2. Положение по оценке фактических параметров устройства кри-вых пути вагонами путеизмерителями, расчету рациональных параметров устройства кривых для их паспортизации, 19 марта 2009 г. М. : ОАО «РЖД», 2009.
10. Петуховский С. В. Оптимизация сдвигов при рихтовке железнодорожного пути. М. 2003.
11. Большая Советская Энциклопедия [Электронный сайт] URL : http://bse.sci-lib.com/ (Дата обращения 27.09.2012).
12. Freeman A. Pro. NET 4 Parallel Programming in C#. New York, 2010. 410c.

УДК 621.396

Скрыпник Олег Николаевич,
д. т. н., профессор,
заместитель директора ИФ МГТУ ГА по учебно-научной работе
Ерохин Вячеслав Владимирович,
к. т. н., доцент, доцент кафедры АРЭО ИФ МГТУ ГА

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОЧЕГО СОЗВЕЗДИЯ ГЛОНАСС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ УСЛОВИЙ НАВИГАЦИОННОГО СЕАНСА

O.N. Skrypnik, V.V. Erokhin

MATHEMATIC MODEL OF GLONASS WORKING CONSTELLATION FOR RESEARCH OF NAVIGATIONAL SESSION CONDITIONS

Аннотация. *На основе разработанной математической модели движения спутников орбитальной группировки ГЛОНАСС исследовано влияние угла маски на значение геометрического фактора системы и количество наблюдаемых спутников.*

Ключевые слова: *ГЛОНАСС, угол маски, моделирование, геометрический фактор, орбитальная группировка.*

Abstract. *A mathematical model of satellite traffic in GLONASS orbital grouping according to the system almanac is developed. Influence of mask angle on geometrical factor value of the system and number of satellites monitored is researched.*

Keywords: *GLONASS, mask angle, modeling, geometrical factor, orbital grouping.*

Спутниковые навигационные системы (СНС) представляют собой комплекс взаимодействующих радиоэлектронных средств, расположенных на навигационных спутниках (НС), потребителях и наземных пунктах и предназначенных для определения местоположения и скорости объектов, ошибки синхронизации относительно системной шкалы времени.

НС излучают сигналы, содержащие информацию о собственных координатах и параметрах движения (эфемериды), по которым потребители определяют свое местоположение в геодезической системе координат (широту, долготу и высоту) и время.

Известно [1], что возможность решения навигационной задачи и точность навигационно-временных определений в СНС в значительной степени зависят от условий навигационного сеанса – количества НС, находящихся в зоне радиовидимости, и их пространственного положения относительно определяющегося объекта.

Исходя из этого, возникает задача исследования условий навигационного сеанса в задаваемой точке на земной поверхности на задаваемом интервале времени. Это требует создания простой и удобной для применения математической модели движения спутников ГЛОНАСС по орбитам, соответствующей их реальному движению, а также алгоритма выбора рабочего созвездия НС.

Элементами орбиты НС являются: A – большая полуось эллиптической орбиты; $e_к$ – эксцентриситет орбиты; Ω – долгота восходящего узла орбиты; ω – аргумент перигея; i – наклон плоскости орбиты к плоскости экватора. Элементы кеплеровой орбиты меняются во времени и должны быть известны на момент позиционирования [1, 2].

Для эллиптической орбиты получаем алгоритм вычислений координат НС на эпоху t [2]:

1. Вычисление средней аномалии M по формулам:

$$M = \omega_c (t - t_n),$$

$$\omega_c = \frac{2\pi}{T},$$

$$T = \frac{2\pi A^{1.5}}{(fM_3)^{0.5}},$$

где ω_c – угловая скорость обращения спутника на орбите, T – период обращения, t_n – время прохождения через перигей.

2. Вычисление итерациями эксцентрической аномалии E:

$$E - e_k \sin(E) = M.$$

3. Определение радиус-вектора R:

$$R = A(1 - e_k \cos(E)).$$

4. Вычисление истинной аномалии v, аргумента широты и долготы восходящего узла относительно гринвичского меридиана l по формулам:

$$\operatorname{tg}\left(\frac{v}{2}\right) = \left(\frac{1+e_k}{1-e_k}\right)^{0.5} \operatorname{tg}\left(\frac{E}{2}\right),$$

$$u = v + \omega,$$

$$l = \Omega - \omega_3 t.$$

5. Определение прямоугольных геоцентрических координат спутника:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} \cos(u)\cos(l) - \sin(u)\cos(i)\sin(l) \\ \cos(u)\sin(l) + \sin(u)\cos(i)\cos(l) \\ \sin(u)\sin(i) \end{pmatrix}$$

Для круговых орбит ($e_к = 0$) радиус-вектор $R = A$, аргумент широты $u = M = \omega_c(t - t_o) + M_o$, где M_o – угол, образуемый радиусом-вектором с направлением на восходящий узел орбиты в начальный момент $t = t_c$.

Прямоугольные геоцентрические координаты пересчитывают в геодезические [2]. Они взаимосвязаны соотношениями:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} (N+H)\cos(B)\cos(L)\cos(u)\cos(l) - \sin(u)\cos(i)\sin(l) \\ (N+H)\cos(B)\sin(L) \\ (N+H-e^2N)\sin(B) \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} B \\ L \\ H \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} arctg[(Z + e^2 N\, sin(B))/D] \\ arctg(Y/X) \\ \sqrt{D^2 + (Z + e^2 N\, sin(B))^2} - N \end{pmatrix},$$

$$D^2 = X^2 + Y^2,$$

$$N = a / (1 - e^2 \sin(B))^{1/2}$$

$$e^2 = (2 - \alpha)\alpha,$$

где N – радиус кривизны первого вертикала, a – большая полуось, α – сжатие эллипсоида. Широта B вычисляется последовательными приближениями.

На основе приведенного алгоритма разработана математическая модель орбитального движения спутников ГЛОНАСС, которая позволяет определять координаты всех НС в прямоугольной геоцентрической системе координат в любой момент времени.

Для реализации алгоритма моделирования орбитального движения всей сети НС необходимо располагать данными альманаха системы – рассчитанными значениями параметров для заданного момента времени: T_Ω – время прохождения восходящего узла, $T_{об}$ – период обращения, e – эксцентриситет, i – наклонение орбиты, Ω – долгота восходящего узла, ω – аргумент перигея и т. д. Эти данные на текущие сутки можно получить на сайте Информационно-аналитического центра (ИАЦ)

ГЛОНАСС [3] и использовать в качестве исходных данных модели.

Модель орбитального движения сети НС ГЛОНАСС дополнена алгоритмом определения НС, находящихся в зоне радиовидимости (т. е. НС, находящихся выше плоскости, касательной к поверхности земного эллипсоида в точке расположения определяющегося объекта) и алгоритмом выбора рабочего созвездия из четырех НС. Предложен простой и требующий незначительных вычислительных затрат алгоритм, согласно которому в рабочее созвездие в качестве зенитного включается НС, дальность до которого от потребителя минимальна. В качестве горизонтных выбираются четыре НС, дальность до которых от потребителя максимальна, и в рабочее созвездие включаются три из них, дальности между которыми максимальны.

Для оценки соответствия предлагаемой модели реальному движению НС ГЛОНАСС по орбитам были проведены эксперименты на базе измерительного пункта, оборудованного навигационным приемником МНП-3, сопряженным с персональным компьютером. Результаты, полученные путем проведения эксперимента в период с 03 час. 28 мин. до 10 час. 08 мин. московского времени 20.01.2011 г. и моделирования, приведены в табл. 1.

Адекватность математической модели оценивалась по совпадению интервалов нахождения спутников в зоне видимости для точки с координатами 52˚16′32,8″ с. ш., 104˚17′22,2″ в. д. (г. Иркутск), полученных по данным сайта ИАЦ ГЛОНАСС, данным натурного эксперимента (приемник МНП-3) и результатам моделирования.

Таблица 1

Результаты экспериментальных наблюдений 20.01.2011 г.

UTC (время)	Номера видимых НС	Количество видимых НС	GDOP	PDOP
00.28.10	1, 2, 8, 14, 15, 16, 18, 24	8	2,4	2,53
07.08.45	5, 6, 13, 14, 15, 20, 21	7	2,35	2,09

Представленные на рис. 1 результаты моделирования с приемлемой точностью совпадают с реальными наблюдениями и данными интернет-портала ИАЦ ГЛОНАСС, расхождение моментов времени наступления событий составляет от 1 до 15 мин., что является вполне приемлемым для суточных измерений.

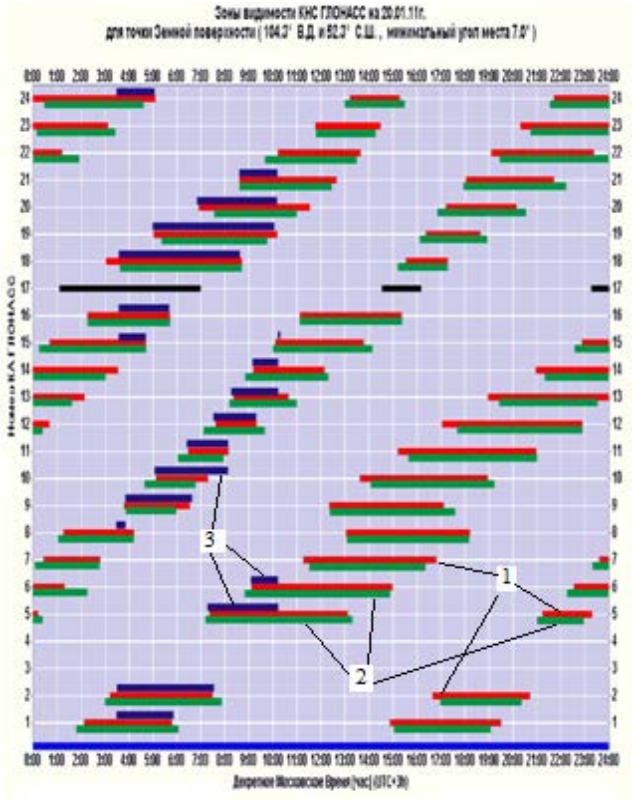


Рис. 1. Интервалы наблюдения спутников в заданной точке в течение суток: 1 – данные ИАНЦ ГЛОНАСС; 2 – результат моделирования; 3 – результат натурного эксперимента

На рис. 2 показаны графики расчётных и экспериментальных значений геометрического фактора (ГФ) в пункте наблюдения.

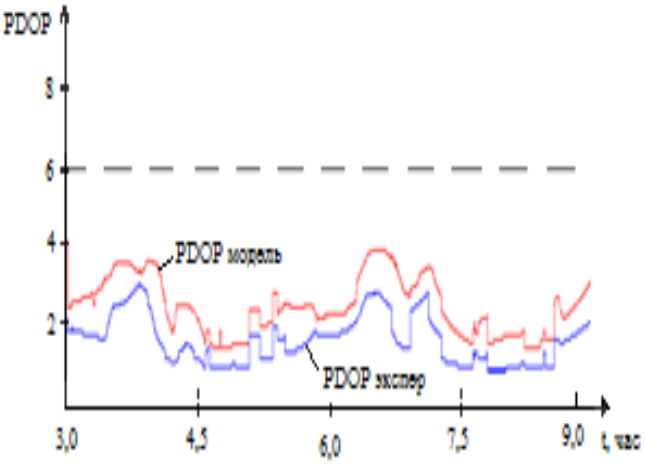


Рис. 2. Расчётные и наблюдаемые значения геометрического фактора

Сравнение расчётных и наблюдаемых (полученных при реальных измерениях) значений ГФ также показывает достоверность разработанной модели (расхождение составляет десятые доли). Расхождение значений обусловлено тем, что в модели использован квазиоптимальный алгоритм

выбора рабочего созвездия НС. Следовательно, разработанную модель можно использовать для проведения исследований характеристик СНС ГЛОНАСС, характеризующих условия навигационного сеанса (количества НС, находящихся в зоне видимости, геометрического фактора).

Результаты экспериментов, опубликованных в [4], показывают, что имеет место ярко выраженная зависимость вероятности фазового сбоя от зенитного угла θ_{HC} НС. В программном обеспечении приемников спутниковой навигации существует запрет на использование при решении навигационной задачи тех НС, для которых зенитный угол $\theta_{HC} < 5^o \div 7^o$. Данное значение зенитного угла называется углом маски НС. В некоторых работах, например [4], рекомендовано для повышения стабильности работы навигационных приемников СНС увеличить угол маски НС до 20º.

Путем математического моделирования были проведены исследования зависимости условий навигационного сеанса приемника СНС ГЛОНАСС от угла маски НС.

На рис. 3 и 4 представлены результаты исследования зависимости количества наблюдаемых спутников в заданной точке пространства от угла маски. Исследования показали, что при угле маски 20º и более в течение суток имеются интервалы времени, когда в зоне видимости будет менее 4 спутников, что делает невозможным решение навигационной задачи. При углах маски менее 20º в зоне видимости всегда находятся 4 и более НС, что является необходимым условием для определения трех пространственных координат и времени.

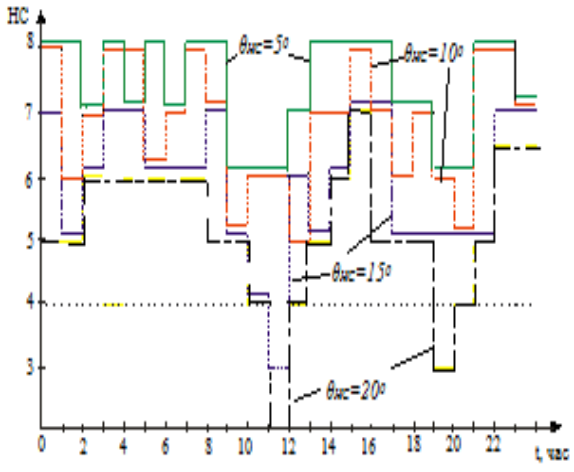


Рис. 3. Число наблюдаемых спутников при углах маски 5, 10, 15, 20º

Таким образом, повышение качества и стабильности приема сигналов НС путем увеличения угла маски приводит к уменьшению количества наблюдаемых спутников и, соответственно, к ухудшению условий навигационного сеанса. В случаях, когда количество наблюдаемых спутников меньше 4, решение навигационной задачи без принятия соответствующих мер невозможно.

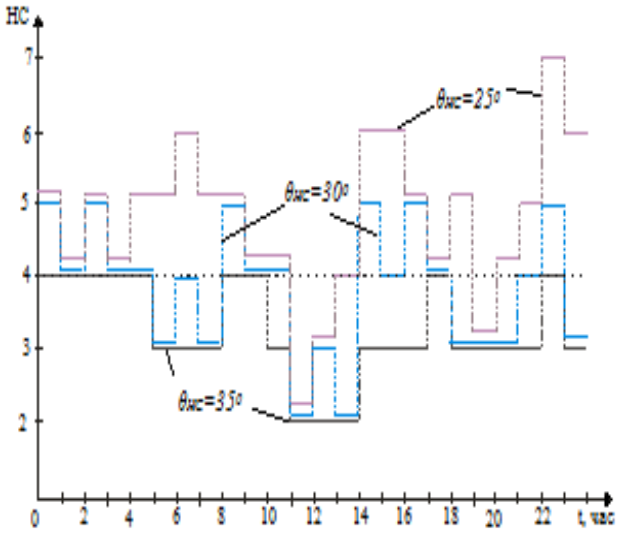


Рис. 4. Число наблюдаемых спутников при углах маски больше 20º

Условия навигационного сеанса характеризуются прежде всего геометрическим фактором. Поэтому возникает задача исследования влияния угла маски на изменение геометрического фактора.

На рис. 5 представлены результаты исследования изменения значений пространственного (PDOP) и горизонтального (HDOP) ГФ в заданной точке пространства (рис. 5, *а*) и числа наблюдаемых НС (рис. 5, *б*) в зависимости от угла маски в течение суток. Анализ полученных результатов показывает, что при угле маски 7º в течение суток PDOP не превышает значение 6, следовательно, навигационно-временные определения можно выполнять непрерывно и с хорошим качеством.

При угле маски 20º в течение суток имеются достаточно продолжительные интервалы времени, когда в зоне видимости находятся менее 4 НС (рис. 6, *б*). При этом PDOP на значительных интервалах времени превышает значение 6 (рис. 6, *а*). Следовательно, при угле маски 20º навигационно-временные определения невозможно выполнять непрерывно, причем их качество снижается существенно.

Полученные результаты моделирования совпадают с данными ИАЦ ГЛОНАСС, представленными на рис. 7 (расхождение составляет 10 мин.). По этим данным в течение 2 ч. 10 мин. наблюдается менее четырёх спутников в заданной точке пространства.

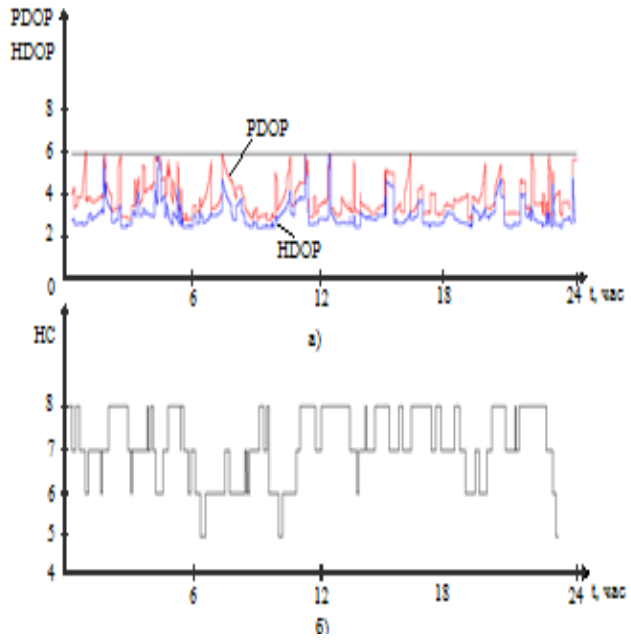


Рис. 5. а) суточные значения PDOP и HDOP; б) количество наблюдаемых НС по результатам моделирования для угла маски 7°

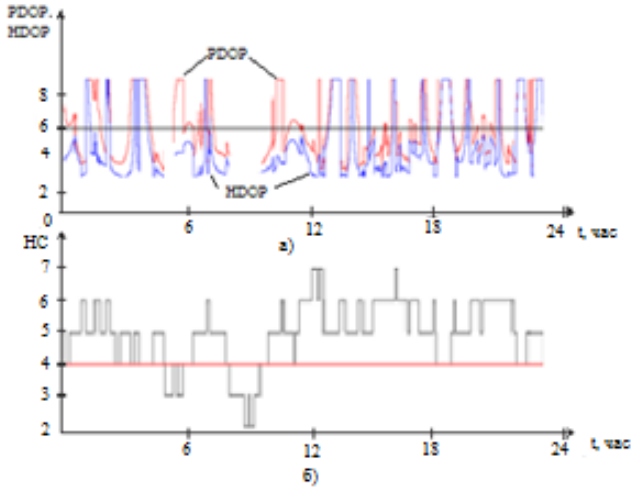


Рис. 6. а) суточные значения PDOP и HDOP; б) количество наблюдаемых спутников по результатам моделирования для угла маски 20°

Полученные результаты показывают, что для формирования рекомендаций по выбору оптимального значения угла маски для приемника ГЛОНАСС необходимо учитывать его влияние на геометрический фактор системы и количество наблюдаемых спутников рабочего созвездия. Очевидно, что при существующем составе орбитальной группировки ГЛОНАСС угол маски не следует выбирать больше 10–15˚.

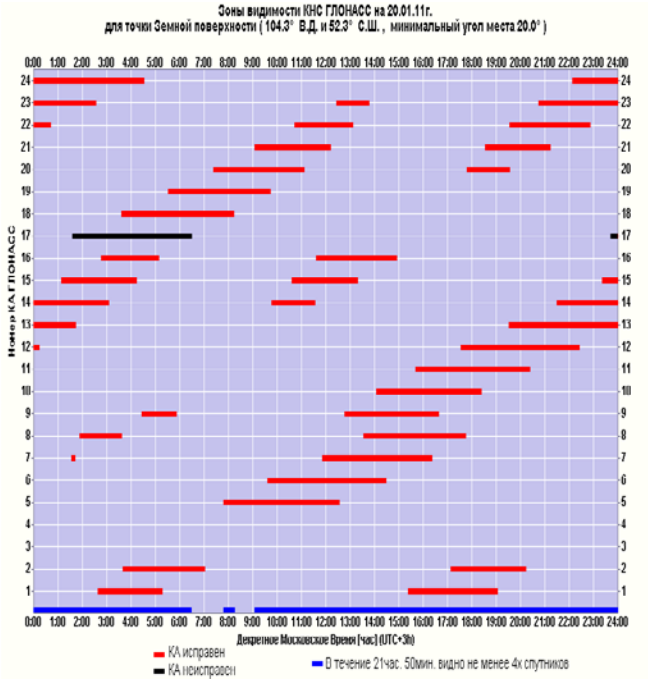


Рис. 7. Результаты расчёта по данным ИАЦ ГЛОНАСС для угла маски 20°

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сетевые спутниковые радионавигационные системы/ В. С. Шебшаевич, П. П. Дмитриев, Н. В. Иванцевич и др.; под ред. В. С. Шебшаевича. М.: Радио и связь, 1993.
2. Глобальная спутниковая навигационная система ГЛОНАСС : [интерфейс. контрол. док.]. Ред. 5.1. М. : КНИЦ, 2008.
3. Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения ЦНИИмаш. E-mail:glonass-ianc@mcc.rsa.ru.
4. О. А. Горбачев, В. Б. Иванов, П. В. Рябков, Д. В. Хазанов. Статистика фазовых сбоев сигналов GPS по измерениям на одночастотных приемниках. Науч. вестник МГТУ ГА. Сер.: Радиофизика и радиотехника, 2010.

УДК 66.021

Рыжов Станислав Олегович,
аспирант кафедры машин и аппаратов химических производств
Ангарской государственной технической академии,
e-mail: clericne@mail.ru
Бальчугов Алексей Валерьевич,
д. т. н., доцент, заведующий кафедрой машин и аппаратов химических производств
Ангарской государственной технической академии,
e-mail: balchug@mail.ru
Кузора Игорь Евгеньевич,
к. т. н., главный технолог ОАО «Ангарская нефтехимическая компания»,
e-mail: balchug@mail.ru

МАССООБМЕН В ДЕСОРБЕРЕ С НОВОЙ ЦЕПНОЙ НАСАДКОЙ

S.O. Rizshov, A.V. Balchugov, I.E. Kuzora

MASS TRANSFER IN THE DESORBER NEW CHAIN WITH A PACKING

Аннотация. *Разработана цепная насадка для проведения тепло- и массообменных процессов в газожидкостных системах. Исследована зависимость объемного коэффициента массоотдачи на предложенной насадке от F-фактора и плотности орошения. Показано, что цепная насадка может быть рекомендована к применению в производстве.*

Ключевые слова: *десорбция, массоперенос, газ, жидкость.*

Annotation. *The chain packing for heat and mass transfer processes in gas-liquid systems is designed. The dependence of the volumetric mass-transfer coefficient in the nozzle of the proposed F-factor and density of irrigation is investigated. It is shown that the chain attachment can be recommended for use in production.*

Keywords: *desorption, mass transfer, gas, liquid.*

Абсорбционные и десорбционные процессы широко используются в химической промышленности, в частности в процессах очистки промышленных газов. В промышленных аппаратах применяются контактные устройства – насадки, увеличивающие площадь контакта фаз и определяющие интенсивность массообмена. Таким образом, насадки играют ключевую роль в массообменных процессах в промышленности, а создание новых эффективных насадок является важной задачей промышленной безопасности.

В ходе научных исследований нами была предложена новая насадка, состоящая из вертикально подвешенных круглозвенных цепей [1]. Жидкость, стекающая по насадке, образует пленку в каждом звене цепи. Данный эффект дополнительно увеличивает удельную поверхность насадки. Цепи изготовляются в настоящее время в промышленных масштабах, следовательно, не требуется отдельного производства для создания насадки, что значительно снижает ее стоимость. Создание цепной насадки с заданными характеристиками и из требуемого материала возможно также на имеющихся производствах.

Ранее нами было исследовано гидравлическое сопротивление цепных насадок двух модификаций с разной плотностью упаковки, а также колец Рашига и сетчатой насадки [2]. Эксперименты проводились с различными плотностями орошения и различными скоростями газа, вплоть до режима захлебывания. Результаты экспериментов показали существенное преимущество новой насадки, так как ее гидравлическое сопротивление оказалось значительно ниже сопротивления насадки из колец Рашига и сетчатой насадки. Сравнение с литературными данными по гидравлическому сопротивлению других насадок (колец Палля) также свидетельствует о преимуществе цепной насадки.

Целью настоящей работы является исследование эффективности массообмена на цепной насадке. Исследование проводилось на системе вода – углекислый газ при десорбции газа из воды в поток инертного газа (воздуха). Для осуществления данных экспериментов была создана лабораторная установка. На рис. 1 представлено схематичное изображение установки для исследования эффективности массообмена.

Колонна 1, диаметром 150 мм и высотой 2,3 м заполнена насадкой 2, состоящей из верти-

кально подвешенных круглозвенных цепей, выполненных из проволоки диаметром 2 мм. Высота слоя насадки составляет 1,35 м, расстояние между осями цепей равняется 6,4 мм. При данных параметрах насадка имеет характеристики, представленные в табл. 1.

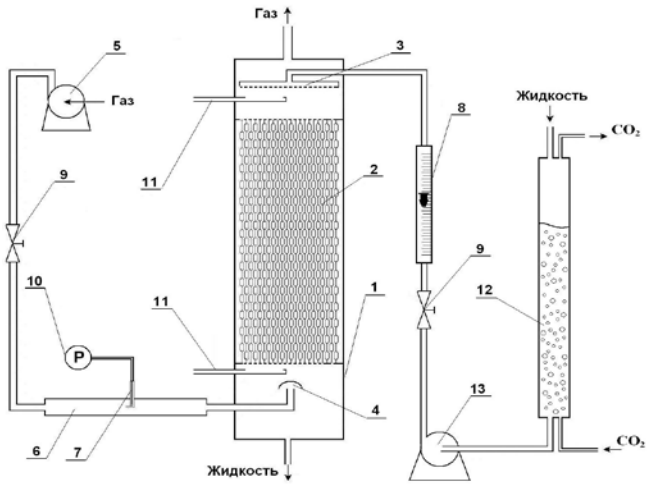


Рис. 1. Лабораторная установка

Таблица 1

Насадка	Удельная поверхность, $м^{-1}$	Свободный объем	Эквивалентный диаметр, м
Цепная	433,35	0,7833	0,00723

Методика эксперимента заключается в следующем. Дистиллированная вода, применяемая в качестве абсорбента, подается сверху в абсорбер 12, представляющий собой пластиковую вертикальную колонну диаметром 100 мм и высотой 2 м. В нижнюю часть абсорбционной колонны через пористые распределительные устройства подается углекислый газ. При этом происходит интенсивный барботаж и насыщение абсорбента углекислым газом. Газ и абсорбент движутся навстречу друг другу. Не поглотившийся углекислый газ выходит из абсорбера в верхней его части. Насыщенный абсорбент из нижней части абсорбера подается центробежным насосом 13 в десорбционную колонну 1 через распределительное устройство 3. Количество подаваемого абсорбента регулируется с помощью вентиля 9, а измеряется ротаметром 8. Для выделения углекислого газа из абсорбента в нижнюю часть колонны 1 подается инертный газ (воздух) с помощью воздуходувки 5. Количество инертного газа, поступающего в колонну, определяется с помощью измерительной трубы 6, трубки Пито 7 и микроманометра 10. Расход газа регулируется вентилем 9. Распределитель газа 4 служит для более равномерного распределения газа по сечению колонны и предотвращения заливания подающей трубы потоком стекающего абсорбента. Отбор проб абсорбента осуществляется непосредственно перед насадкой и после нее с помощью пробоотборников 11. Между отбором верхней и нижней проб проводится задержка по времени 4 секунды. Это время, необходимое для прохождения жидкости по насадке.

Оценить эффективность массопереноса и самой насадки можно, узнав изменение концентрации углекислого газа в воде при прохождении ее через насадку. Концентрация CO_2 в воде определялась путем прямого титрования проб, отобранных из пробоотборников. Концентрацию углекислого газа в воде определяли титрованием 0,1н раствором гидроксида натрия в присутствии фенолфталеина до получения розовой окраски раствора, соответствующей окраске стандартного раствора, pH которого по фенолфталеину равно 8,4. Титрование обеих проб проводится одновременно, сократив до минимума возможные потери углекислого газа в атмосферу.

Концентрацию углекислого газа в воде рассчитывали по формуле

$$X = \frac{V_1 \cdot N \cdot Mr \cdot 1000}{V_2}, \qquad (1)$$

где V_1 – объем раствора NaOH, пошедший на титрование, мл; V_2 – объем исследуемого раствора, взятый для титрования, мл; N – нормальность раствора NaOH, моль/л; Mr – молекулярная масса CO_2, кг/кмоль; X – концентрация углекислого газа в воде, мг/л.

В исследуемой газожидкостной системе (CO_2 – воздух – вода) основное сопротивление массопередаче сосредоточено в жидкой фазе. Объемный коэффициент массоотдачи в жидкой фазе определяли по уравнению

$$\beta_L a = \frac{M}{\Delta C \cdot V_H}, \qquad (2)$$

где $\beta_L a$ – объемный коэффициент массоотдачи в жидкой фазе, $ч^{-1}$; M – количество вещества, перешедшего через границу раздела фаз, моль/ч; ΔC – средняя движущая сила процесса, моль/$м^3$; V_H – объем насадки, $м^3$.

Часто при описании работы насадок используется понятие F-фактора [3], который рассчитывают по формуле:

$$F = w\sqrt{\rho_Г}, \qquad (3)$$

где w – приведенная скорость газа в аппарате, м/с; $\rho_Г$ – плотность газа, кг/$м^3$.

Результаты экспериментов частично представлены на рис. 2 и 3. На рис. 2 приведена зависимость коэффициента массоотдачи на цепной насадке (кривая 1) от F-фактора при постоянной

плотности орошения 111 $м^3/м^2ч$, кривая 2 соответствует коэффициенту массоотдачи на насадке «Инталокс» (50 мм) по литературным данным [3]. Видно, что в значительном диапазоне изменения F-фактора объемный коэффициент массоотдачи на цепной насадке превышает коэффициент массоотдачи на насадке «Инталокс».

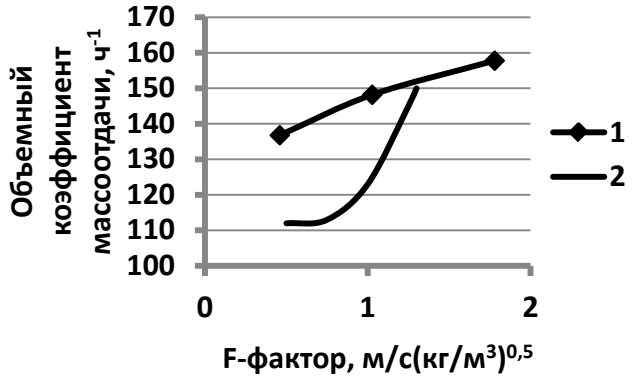


Рис. 2. Зависимость объемного коэффициента массоотдачи от F-фактора

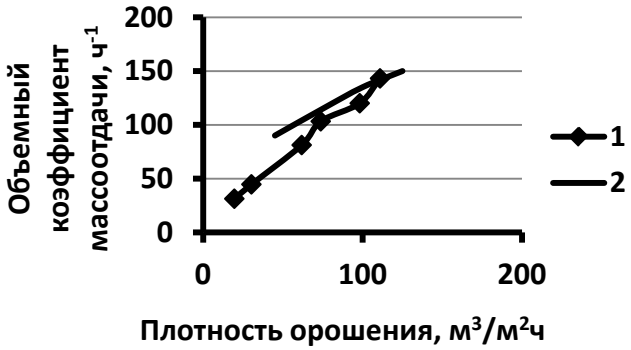


Рис. 3. Зависимость объемного коэффициента массоотдачи от плотности орошения

На рис. 3 представлена зависимость коэффициента массоотдачи на указанных насадках от плотности орошения при постоянном F-факторе, равном 1,45 $м/с(кг/м^3)^{0,5}$. На данном рисунке обозначения кривых те же, что и на рис. 2. Наблюдается незначительная разница в коэффициентах массоотдачи цепной насадки и насадки «Инталокс» в исследованном диапазоне плотностей орошения.

Принимая во внимание, что цепная насадка обладает значительно меньшим гидравлическим сопротивлением в сравнении с такими насадками, как кольца Палля, кольца Рашига и сеточная насадка, учитывая также, что в результате настоящих экспериментов установлена достаточно высокая эффективность массообмена на цепной насадке, можем рекомендовать предложенную насадку для широкого применения на предприятиях химической, нефтеперерабатывающей и пищевой промышленности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Насадочный аппарат для массообменных процессов : пат. 2465957 РФ., МПК B01J19/32 / Бальчугов А.В., Рыжов С.О., Кузора И.Е. №2011141617/05 ; заявл. 13.10.2011 ; опубл. 10.11.2012.
2. Рыжов С. О., Бальчугов А. В., Кузора И. Е. Технология газожидкостных процессов на цепной насадке. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 1(33). С. 64–68.
3. Каган А. М., Юдина Л. А., Пушнов А. С. Нерегулярная металлическая насадка ГИАП-НЗ и некоторые аспекты ее промышленного использования // Химическая промышленность. 2001. №5. С. 43–46.

УДК 004.94:631.53.04

Асалханов Пётр Георгиевич,
старший преподаватель кафедры информатики
и математического моделирования Иркутской государственной
сельскохозяйственной академии,
тел: 89500621107, e-mail: asalkhanov@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СРОКОВ АГРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ В РАЗЛИЧНЫХ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

P.G. Asalkhanov

FEATURES OF AGROTECHNOLOGICAL OPERATIONS TERMS FORECASTING MODELS IN VARIOUS CLIMATIC CONDITIONS

Аннотация. *В статье рассмотрены особенности моделей прогнозирования сроков агротехнологических операций в различных природно-климатических условиях. Приведена классификация алгоритмов прогнозирования дат технологических операций на основе корреляционно-регрессионного анализа. Разработанная методика прогнозирования расчетных дат посевов зерновых культур реализована для трех районов Иркутской области. Определена точность этих моделей. Показано, что точность прогнозирования моделей в южных районах выше, чем в северных. Разработанные алгоритмы позволяют управлять процессами возделывания сельскохозяйственных культур в условиях значительной изменчивости природных параметров.*

Ключевые слова: *модель, корреляционно-регрессионный анализ, прогноз, агроклиматические параметры, оптимальная дата посева, сельскохозяйственная культура.*

Abstract. *In the article, features of agrotechnological operations terms forecasting models in various climatic conditions are considered. Classification of algorithms of forecasting dates of technological operations on the basis of the correlation and regression analysis is given. The developed technique of forecasting settlement dates of grain crops is realized for 3 regions of the Irkutsk region. Accuracy of these models is defined. It is shown that accuracy of forecasting models in the southern areas is higher than in the northern ones. The developed algorithms allow to operate processes of cultivation of crops in the conditions of considerable variability of natural parameters.*

Keywords: *model, correlation and regression analysis, forecast, agroclimatic parameters, optimum date of crops, crop.*

Планирование в растениеводстве основано на технологических картах. Большое значение при их расчете имеет определение сроков начала операций. Важно, чтобы эти сроки были оптимальными с точки зрения наилучшего прорастания культур и получения качественного и высокого урожая.

При составлении технологических карт даты начала операций определяются в основном в соответствии с нормами, установленными для каждой культуры и климатической зоны возделывания. Однако рекомендуемые даты агротехнологических операций для одной и той же культуры и сельскохозяйственного предприятия за многолетний период колеблются в значительных пределах. Это связано с изменчивостью природно-климатических условий, влияющих на произрастание сельскохозяйственных культур и сроки их возделывания.

Поэтому необходима разработка и реализация прогностических моделей определения сроков технологических операций, учитывающих агроклиматические условия аграрного производства.

Несмотря на обилие материалов в агроклиматологии, посвященных воздействию почвенно-климатических и погодных факторов на развитие сельскохозяйственных культур, недостаточное внимание уделено влиянию природных факторов на сроки их возделывания. В частности, в работах [1, 2] рассматривается множество моделей зависимости урожайности от природно-климатических факторов.

Каждая сельскохозяйственная культура имеет свои требования к теплу и влаге, которые необходимы для ее выращивания. В разные периоды вегетации требования к температуре почвы различны. Особое значение имеет температурный режим на начальных стадиях развития культур – в период прорастания семян. В табл. 1 приведены

минимальные температуры почвы, необходимые для прорастания, и оптимальные температуры появления всходов различных культур [4, 5].

Сроки посевов устанавливаются исходя из оптимальной температуры появления всходов и агроклиматических условий территории возделывания. Осуществлять посев рекомендуется, когда почва на глубине заделки семян (обычно 5 см) достигает определенного значения температуры t_d, которое устанавливается опытным путем для каждой природно-климатической зоны.

Таблица 1

Минимальные и оптимальные температуры прорастания семян различных культур

Культура	Минимальная температура для прорастания, °С	Оптимальная температура появления всходов, °С
Пшеница	1–2	12–15
Ячмень	1–2	14–18
Овес	1–2	14–15
Рожь	1–2	8–12
Картофель	5–8	15–20
Горох	1–6	16–20
Фасоль	6–14	20–25
Морковь	4–5	15–19
Свекла	8	10–11
Капуста	2–3	18–20

Для зерновых культур, возделываемых на территории Восточной Сибири t_d = 10–12 °С. Колебание рекомендуемых дат посевов для предприятий агропромышленного комплекса (АПК) региона может быть значительным, начиная от 2-й или 3-й декады апреля и заканчивая 1-й или 2-й декадой июня.

В работе [3] рассмотрено влияние некоторых агроклиматических параметров на сроки начала посевных операций. Проведён корреляционно-регрессионный анализ рядов относительных дат y (рис. 1) прогрева почвы на глубине заделки до оптимальной температуры t_d и параметров тепла и увлажнения. Использовались данные г. Иркутска за 1989-2010 гг. Выявлена зависимость рекомендуемой даты посева зерновых культур от параметров тепла и увлажнения, к которым относятся сумма среднесуточных температур и сумма осадков за предшествующую продолжительность $k = T_y - T_0$, где T_0, T_y – начало и окончание периода суммирования параметров, T_i ,T_n – даты прогрева почвы, ежегодная и самая ранняя за многолетний период.

На рис. 1 показаны расчетные даты и периоды, по которым суммируются параметры температуры и осадков.

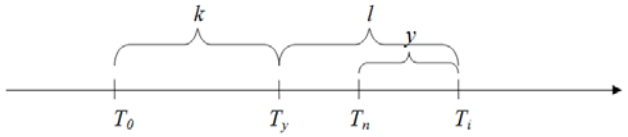


Рис. 1. Схема расположения расчетных дат и периодов на оси времени

На схеме l представляет собой заблаговременность (количество дней от окончания периода суммирования параметров тепла и увлажнения до рекомендуемой даты посева).

Продолжительность периода k может колебаться от нескольких суток до нескольких десятков суток, причем дату начала периода T_0 предложено определять на месяц ранее усредненной даты посевов.

Построены одно- и многофакторные уравнения регрессии зависимости дат начала посевных работ от параметров тепла и увлажнения, с помощью которых можно осуществить прогноз рекомендуемой даты посева на текущий год.

Общий вид уравнений регрессии выглядит следующим образом:

$$y_i = a_0 + a_1 \sum_{j=1}^{k} t_{ji}\,, \qquad (1)$$

$$y_i = a_0 + a_1 \sum_{j=1}^{k} t_{ji} + a_2 \sum_{j=1}^{k} q_{ji}\,, \qquad (2)$$

где y_i – результативный признак, a_0, a_1, a_2 – коэффициенты регрессии, t_{ji} – средняя температура воздуха за j-е сутки в i-й год, q_{ji} – осадки за j-е сутки в i-й год, k – продолжительность расчетного периода, по которому суммируются параметры факторов, изменяющаяся в заданных пределах ($k \in K$).

Построенные уравнения по эмпирическим данным для различных природно-климатических зон обладают разной точностью, которая зависит от рассматриваемого пункта и параметров, включённых в модель: тип и количество факторов, расчетный период, многолетняя продолжительность, критерий оптимальности посева и др.

Для прогнозирования рекомендуемых дат агротехнологических операций на основе корреляционно-регрессионного анализа разработаны различные алгоритмы, классификация которых приведена на рис. 2.

В зависимости от природно-климатических особенностей адекватно описывать связи сроков посевов с факторами можно с помощью как однофакторных, так и многофакторных уравнений регрессии. В однофакторных уравнениях в качестве фактора предлагается рассматривать суммы сред-

несуточных температур воздуха. В многофакторных (двухфакторных) уравнениях в качестве дополнительного фактора наряду с суммой температур используются суммы осадков за предшествующие периоды.

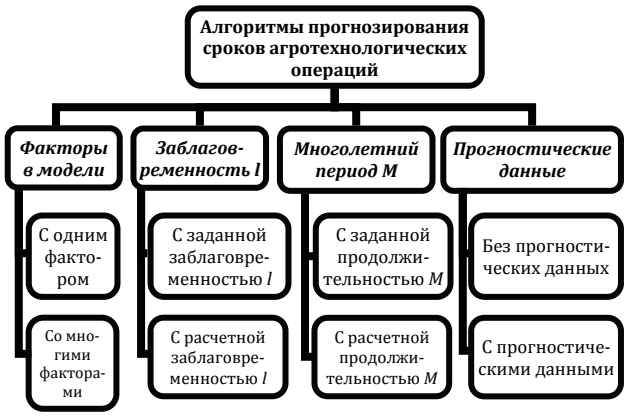


Рис. 2. Классификация алгоритмов прогнозирования сроков агротехнологических операций

Для прогнозирования рекомендуемой даты посева при определении периода суммирования необходимо учитывать некоторую заблаговременность *l*. При этом для предприятия вполне достаточно 7–10 дней для своевременной и полноценной подготовки к посевным работам.

Период суммирования параметров *k* и заблаговременность *l* связаны: чем больше *k*, тем меньше *l* при неизменных T_0 и T_i.

В качестве заданной продолжительности периода *k* могут использоваться фиксированные значения, принятые в агроклиматологии, кратные 10 суткам. Однако не всегда связи, получаемые для этих периодов, являются наилучшими. При этом оптимальная заблаговременность *l* также может быть разной. Поэтому целесообразно использовать переменные продолжительности периодов оценки параметров *k* и *l*.

В качестве начальной даты T_0 для предприятий Иркутской области использовалось 1 апреля, как дата, предшествующая 30 суткам усредненной даты фактических посевов. Чтобы максимально исключить отрицательные температуры при минимальном изменении периода *k*, предлагается в качестве T_0 использовать дату перехода среднесуточной температуры воздуха через 0 ºС.

Большое значение при построении уравнения регрессии (1) или (2) имеет выбор рассматриваемого многолетнего периода *M*. В зависимости от его продолжительности коэффициенты уравнений регрессии могут изменяться, как и точность модели. Вместе с тем существует проблема непрерывности многолетнего периода ввиду отсутствия в отдельные годы данных по температуре и осадкам.

Для прогнозирования сроков технологических операций наряду с фактическими данными применимы краткосрочные прогнозные значения температур и осадков. В этом случае достоверность полученных результатов зависит от точности прогнозирования параметров тепла и увлажнения. Так, например, при использовании прогнозных данных на несколько дней вперед увеличивается заблаговременность прогноза *l* в ущерб его точности. Тем не менее, подобный подход позволяет получить дополнительную информацию о рекомендуемой дате посева для сравнения с другими предложенными алгоритмами.

Рассмотрим алгоритм определения сроков посевных операций на основе многофакторного анализа с оптимальной заблаговременностью *l*, заданной продолжительностью многолетнего периода *M* без использования прогностических данных.

Такой алгоритм позволяет строить модели прогнозирования с предварительным определением оптимальной заблаговременности прогноза при заданном многолетнем периоде (рис. 3), обычно 10 и более лет.

Предложенный алгоритм является адаптивным. Согласно этой методике, строится множество моделей зависимости дат посевов от факторов на основе последовательного увеличения количества данных с шагом 1 сутки. Другими словами, продолжительность расчетного периода *k* является величиной переменной, изменяясь от 7 до, например, 20–30 суток. Операция увеличения периода суммирования параметров продолжается до тех пор, пока точность регрессионного уравнения не достигнет максимального значения, что может быть оценено коэффициентом детерминации (R^2), средней квадратической ошибкой или средней относительной ошибкой аппроксимации. В работе для этой цели использован коэффициент детерминации, связанный с критерием значимости уравнения регрессии.

Кроме того, в алгоритме рассмотрены различные температуры прогрева почвы, близки к оптимальным, которые также можно использовать для прогнозирования сроков посева ввиду значительной изменчивости природных условий. Приведенный алгоритм применен для различных природно-климатических зон региона.

Сельскохозяйственные угодья Иркутской области расположены в трех природно-географических зонах: подтаежно-таежной, лесостепной и степной. Внутри зон по особенностям

почвенно-климатических условий выделено 8 агроландшафтных районов [4].

Рис. 3. Схема определения рекомендуемого срока посевов с расчетной заблаговременностью

В работе рассмотрены три муниципальных района, наиболее благоприятные для возделывания сельскохозяйственных культур: Иркутский, Усольский и Тулунский.

Для апробации алгоритма использовались данные о сумме температур и осадков по пунктам наблюдений (г. Иркутск, г. Усолье-Сибирское и г. Тулун) за 1987–2010 гг.

Согласно алгоритму расчета сроков посева для выделенных районов спрогнозированы расчетные даты посевов зерновых культур на 2011 г. (табл. 2).

Полученные в ходе расчетов уравнения регрессии удовлетворяют критериям адекватности и точности и пригодны для дальнейшего использования в прогнозах.

Для г. Иркутска и г. Усолья-Сибирского в качестве оптимальной температуры взято значение t_d = 10 ºС, а для г. Тулуна использовалося t_d = 8ºС, так как для этого пункта характерны поздние даты прогрева почвы и более короткая продолжительность периода, благоприятного для вегетации сельскохозяйственных культур. Поэтому для наилучшего их прорастания необходим более ранний посев при меньшей температуре почвы.

Таблица 2

Оценка точности уравнений регрессии и результаты прогнозирования расчетных дат посева на 2011 г.

Пункт наблюдения	г. Иркутск	г. Усолье-Сибирское	г. Тулун
Оптимальная температура t_d	10 ºС	10 ºС	8 ºС
Многолетний период M	1989–2009	1987–2011	1987–2011
Период суммирования параметров k	1–19 апреля	1–20 апреля	11–19 апреля
Оптимальная заблаговременность l	6 суток	3 суток	12 суток
Уравнение регрессии	$y = -0,12x_1 + +15,44$	$y = -0,12x_1 + +18,4$	$y = -0,05x_1 - -0,31x_2 + 9,9$
Коэффициент детерминации R^2	0,72	0,63	0,37
Расчетная дата посева	27 апреля	27 апреля	5 мая
Фактическая дата посева	8 мая	н/д	12 мая
Отклонение фактической даты от расчетной	11	-	7
Среднее отклонение расчетных дат от фактических	2,3	3,2	4,2
Максимальное отклонение расчетных дат от фактических	11	7,5	9,3

При расчете учитывались различные значения периодов суммирования параметров k. Для расчета рекомендуемой даты посева использовалось уравнение регрессии, соответствующее максимальному коэффициенту детерминации. Так, при статистической обработке данных по г. Иркутску, k изменялось от 7 до 24. На рис. 4 приведены результаты методики выбора.

Согласно рис. 4, при увеличении параметра k точность уравнения сначала растет, достигает максимального значения при k = 19 и постепенно уменьшается до k = 24. Коэффициент детерминации значительно ниже при k < 13. Поэтому для продолжительности суммирования суточных температур и осадков целесообразно использовать уравнения при k >13. При k=19 уравнение обладает максимальной точностью (R^2 = 0,72), и заблаговременность при этом составит l = 6 суток, что вполне приемлемо для подготовки к посеву. По-

этому в качестве оптимального периода *k* использовалось это значение. Прогностическая дата посева зерновых в г. Иркутске в 2011 г. соответствует 27 апреля. Расчётный период суммирования показателей тепла и увлажнения составил 1–19 апреля. Оптимальная заблаговременность прогноза составила 6 суток. При этом для полученной модели расхождение прогностических и фактических дат прогрева почвы составило 11 суток, что связано с особенностями 2011 г., а среднее отклонение расчетных дат от фактических – 2,3.

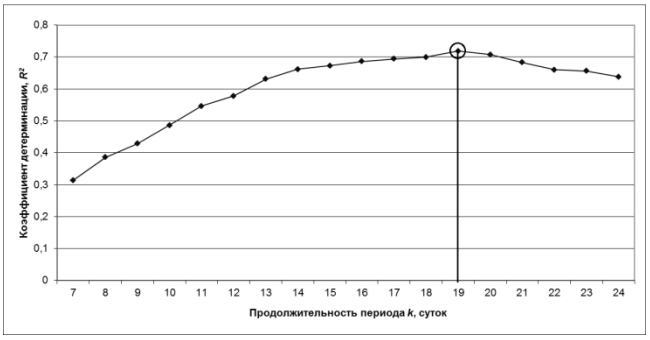


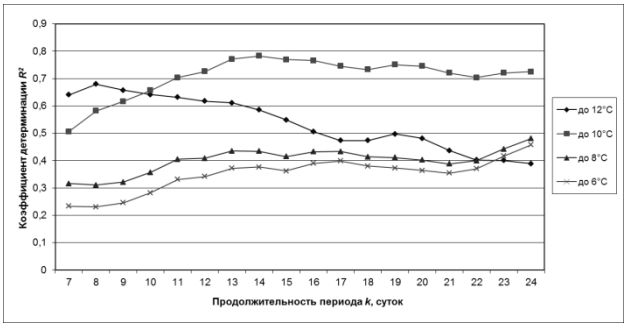
Рис. 4. Значения коэффициентов детерминации в зависимости от продолжительности периода *k* для Иркутска

Аналогичным образом получены уравнения регрессии для г. Усолья-Сибирского и г. Тулуна.

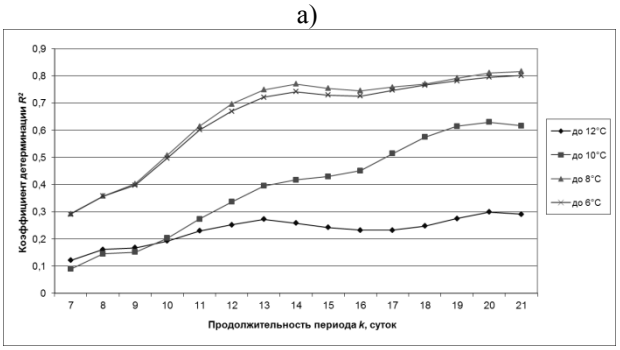
Для Усолья-Сибирского оптимальный период *k* составил 20 суток (1–20 апреля). Заблаговременность *l* – 3 суток (табл. 2). Точность уравнения согласно коэффициенту детерминации оказалась ниже, чем для Иркутска (R^2= 0,63). Среднее отклонение расчетных дат от фактических – 3,2, а максимальное – 7,5 суток.

При построении уравнений регрессии для г. Иркутска и Усолья-Сибирского наибольшая точность получена для однофакторной зависимости (от сумм среднесуточных температур воздуха). Однако для Тулуна характерно влияние на даты посевов еще и сумм суточных осадков, поэтому для определения зависимостей по этому пункту, использовались два фактора. Точность полученных уравнений регрессии в отличие от Иркутска и Усолья-Сибирского низка (R^2 = 0,37). При этом оптимальный период суммирования *k* составил 11–19 апреля, а заблаговременность – 12 суток.

Еще одним важным вопросом при прогнозировании расчетных дат посева является выбор температуры посева t_d. При прогнозировании возникает проблема определения температуры почвы, которая позволяла бы построить хороший прогностический результат. Согласно эмпирическим данным, эта температура может не соответствовать рекомендуемым значениям. Между тем ее можно использовать для более гибкого управления производственным процессом. При этом значения характеристик параметров тепла и увлажнения не противоречат условиям посева сельскохозяйственных культур. Расчёты показывают, что для различных температур в некотором приемлемом диапазоне для посевов точность прогностических уравнений может быть разной. На рис. 5 показаны результаты анализа точности уравнений регрессий для различных *k* и t_d по г. Иркутску и Усолью-Сибирскому.



а)

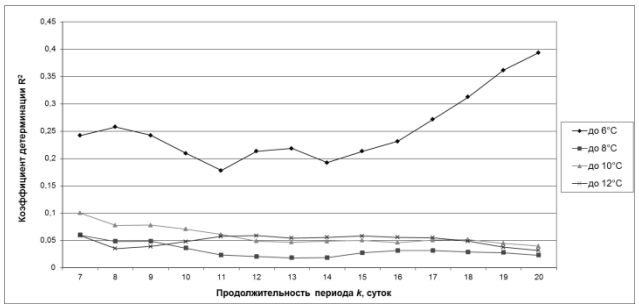


б)

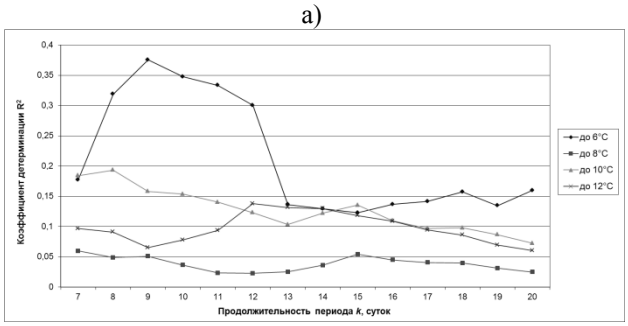
Рис. 5. Значения коэффициентов детерминации в зависимости от продолжительности периода *k* и критической температуры t_d а) Иркутск; б) Усолье-Сибирское

В качестве многолетнего периода *M* взят период 1990–2009 гг. Продолжительность периода суммирования параметров *k* менялась от 7 до 24 суток (от 1–7 апреля до 1–24 апреля). В ходе исследования выявлено, что по данным г. Иркутск наибольшей точностью, согласно коэффициенту детерминации, обладают уравнения при t_d = 10 ºС (R^2 = 0,78) и t_d = 12 ºС (R^2 = 0,68). При t_d = 6 ºС и 8ºС точность уравнений R^2<0,5. Однако по данным г. Усолья-Сибирского напротив, наибольшая точность наблюдалась при t_d = 6 ºС и 8 ºС (R^2 = 0,81). Для параметра t_d = 10 ºС точность была ниже, а при t_d = 12 ºС уравнения обладают неудовлетворительной точностью (R^2 < 0,35).

Для г. Тулуна применимы двухфакторные зависимости, поскольку на даты посевов наряду с суммами температур влияют суммы осадков (рис. 6).



а)



б)

Рис. 6. Значения коэффициентов детерминации в зависимости от продолжительности периода *k* и температуры прогрева почвы t_d по Тулуну: а) однофакторный анализ; б) двухфакторный анализ

Проведенный многофакторный анализ по данным г. Тулуна показал, что уравнения в целом обладают низкой точностью (R^2 < 0,4). При этом наибольшей точностью обладают уравнения при t_d = 6ºС (R^2 = 0,39), а в остальных случаях точность уравнений значительно ниже. Точность однофакторных уравнений выше при бо́льших k (k > 17), а двухфакторных – при меньших (k < 12),

Итак, в ходе исследования достигнуты следующие основные результаты:

- проведена классификация алгоритмов прогнозирования сроков посева сельскохозяйственных культур на основе многофакторного анализа по следующим критериям: количество факторов, использование расчетных заблаговременности и многолетних периодов и учету прогностических данных;

- на основе оценки точности моделей получены прогностические даты посева зерновых культур для Иркутского, Усольского и Тулунского районов на 2011 г.;

- установлено, что в отличие от Иркутского и Усольского районов для Тулунского района более пригодны двухфакторные модели, однако точность уравнений регрессии в большинстве случаев невысока (R^2 < 0,4);

- выявлено, что на северных территориях в качестве температуры почвы для расчетов целесообразно использовать более низкие температуры, в отличие от южных (для г. Тулуна наибольшая точность наблюдалась при t_d = 6ºС, для г. Усолья-Сибирского – при t_d = 8ºС, для г. Иркутска – при t_d = 10).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Батталов Ф. З. Сельскохозяйственная продуктивность климата для яровых зерновых культур. СПб. : Гидрометеоиздат, 1980. 112 с.
2. Пасов В. М. Изменчивость урожаев и оценка ожидаемой продуктивности зерновых культур. СПб. : Гидрометеоиздат, 1986. 152 с.
3. Асалханов, П. Г., Иваньо Я. М. О некоторых алгоритмах прогнозирования дат технологических операций возделывания зерновых культур // Вестник ИрГСХА. 2011. Вып. 47. С. 116–120.
4. Адаптивные технологии производства продукции растениеводства в системах земледелия Приангарья / В. А. Останин, В. И. Солодун, Ю. С. Бажанов, В. Е. Решетский, А. М. Зайцев и др. : агротехн. рекомендации. Иркутск : Изд-во ИрГСХА, 2009. 154 с.
5. Практикум по выполнению лабораторно-практических занятий по курсу «Технология производства продукции растениеводства» : для студ. фак. механизации сел. хоз-ва Иркут. гос. с.-х. акад. / сост. Ю. А. Доманский, А. М. Зайцев, А. С. Филиппов, В. И. Солодун, М. С. Горбунова. Иркутск : Изд-во ИрГСХА, 2009. 159 с.

УДК 331.101

Грошева Надежда Борисовна,
д. э. н., доцент, декан САФ БМБШ ИГУ,
e-mail: grosheva@buk.irk.ru
Бобкова Наталья Геннадьевна,
доцент кафедры финансового менеджмента, Байкальская международная бизнес-школа,
Иркутский государственный университет,
тел.: 89149309093, e-mail: bobkova.nataly@gmail.com

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ТРУДОВЫХ РЕСУРСОВ В УСЛОВИЯХ ИННОВАЦИОННОЙ ЭКОНОМИКИ

N.B. Grosheva, N.G. Bobkova

WORKFORCE QUALITY ASSESSMENT IN THE CONDITIONS OF INNOVATIVE ECONOMY

Аннотация. *В связи с переходом российской экономики к инновационному типу развития проблема качества рабочей силы является достаточно актуальной. Связано это с тем, что человеческий капитал становится одним из решающих нематериальных факторов конкурентоспособности компаний. По этой причине насущной является задача оценки качества трудовых ресурсов в условиях новой экономики. Проанализированы организационные структуры с позиции создания добавленной стоимости. Сформулированы новые требования, предъявляемые к рабочей силе. Сделан вывод о необходимости использования нового подхода к оценке качества рабочей силы, где в качестве критерия оценки выступает инновационная восприимчивость работников.*

Ключевые слова: *качество трудовых ресурсов, оценка качества трудовых ресурсов, инновационная экономика, инновационная восприимчивость.*

Abstract. *Due to the transition of the Russian economy to innovative type of development, the problem of quality of labor demands high attention. The reason is that the human capital becomes one of the key intangible factors of the companies' competitiveness. For this reason, the problem of workforce quality assessment in the conditions of innovative economy becomes a hot topic to discuss. In this article, organizational structures are analyzed from a value-added perspective. The new requirements to labor are formulated. The conclusion is drawn on need of use of a new approach to a workforce quality assessment where as criterion of an assessment the innovative susceptibility of workers acts.*

Keywords: *workforce quality, workforce quality assessment, innovation economy, innovative susceptibility.*

Новая экономика не только изменяет глобальные тренды, но и меняет структуру организаций, подходы к ее формированию, создает потребность в новых компетенциях и принципиально иной рабочей силе.

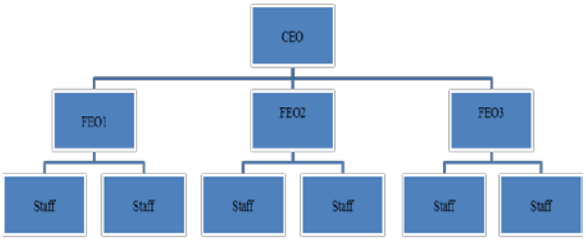
Современная экономика может быть охарактеризована через совокупность следующих признаков:

1. Переход от индустриальной экономики к экономике знаний.
2. Создание добавленной стоимости не через ресурсную и производственную ренту, но через инновации.
3. Возрастание роли человеческого капитала в росте стоимости.
4. Изменение роли государства в экономике.
5. Увеличение скорости изменений.
6. Интеграционные процессы на межгосударственном и корпоративном уровне.
7. Глобализация бизнеса и конкуренции.
8. Конкуренция за человеческие ресурсы как на уровне компаний, так и на уровне регионов.
9. Рост количества и возможного ущерба от макро- и микроэкономических рисков.

Ряд экспертов говорит о смене целого экономического уклада, появлении новых форм организаций, специфическом взаимодействии между ними.

Рассмотрим существующие типы организационных структур и их преимущества и недостатки в новой экономике:

1. Функциональная структура.



В этой структуре высшим исполнительным органом является CEO, функциональными направлениями руководят соответствующие функ-

циональные менеджеры, а персонал распределен по функциям.

В такой структуре организация разделена на специализированные подразделения, каждое из которых отвечает за реализацию определенной функции (управление сбытом, производством, снабжением, финансами).

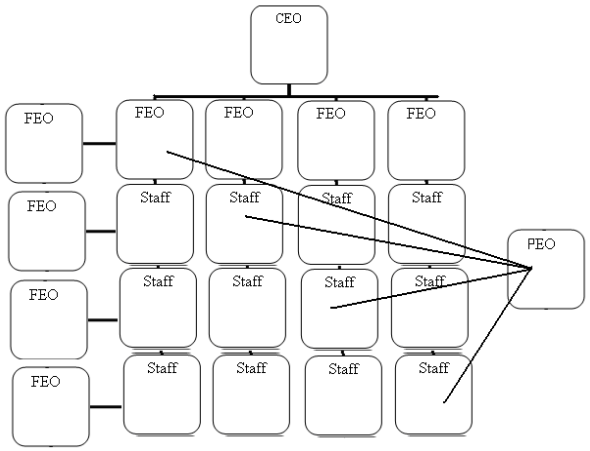
К недостаткам подобной схемы в новой экономике следует отнести ее слабую гибкость и адаптируемость, узкую специализацию и отсутствие контроля за бизнес-процессом в целом.

Такая структура позволяет повышать узкую квалификацию специалистов в конкретном направлении.

2. Дивизиональная структура.

Визуально напоминает функциональную, только исполнительный менеджер отвечает за конкретный процесс (продукт, регион, направление). Под его руководством сконцентрированы несколько функциональных менеджеров, а ряд функций могут быть вынесены отдельно (маркетинг, управление финансами). Данная структура не стимулирует инновационное развитие из-за разрозненности функций.

3. Матричная структура.



Высшее руководство в такой структуре также относится к компетенции CEO, на более низком уровне управленческие функции выполняют дивизиональные и функциональные менеджеры, а персонал имеет двойное подчинение.

Специфическая форма организации, совмещающая дивизиональную и функциональную структуру (частично внедрена в Сберегательном банке РФ).

Особенностью такой структуры является двойное подчинение специалистов и размывание должностных обязанностей, сопровождающееся отсутствием жесткой привязки к персоналиям. При некачественном управлении в подобной схеме возникает нехватка времени и противоречивость целей для специалистов, вынужденных работать одновременно над проектами дивизиона и реализацией собственных задач.

4. Проектная структура схожа с дивизиональной, однако роль продуктов выполняют проекты. Менеджер отвечает за конкретный проект и собирает в команду специалистов широкого профиля.

5. Виртуальные структуры. Организации, основанные на взаимном аутсорсинге функций (отказе от самостоятельного выполнения и передаче на подряд полных бизнес-процессов). В данном случае организации оказывают друг другу услуги, под которые содержат специализированный персонал.

6. Сетевые организации. Структуры, не имеющие территориальной привязки, реализующие спектр нематериальных или материальных товаров, условно объединенные человеческим капиталом.

Именно виртуальные и сетевые организации способны создавать добавленную стоимость через знания и инновации.

Специфические требования к трудовым ресурсам меняются от узкой специализации с широким объемом знаний к виртуальному предпринимательству, когда ресурс, генерирующий идеи, является намного более ценным, чем материальный.

В зависимости от типа организации и организационной структуры различаются требования к квалификации и компетенциям персонала.

Так, в функциональной структуре и для менеджеров среднего звена, и для исполнителей необходима узкая квалификация в выбранной сфере. От них не требуется дополнительных знаний в иных отраслях, а повышение квалификации проходит в рамках базовой специализации.

Дивизиональная структура предполагает дополнительные компетенции у руководителей дивизионов для стратегического управления выделенной сферой. Однако от исполнителей опять же требуются узкоспециализированные функциональные способности.

Матричная структура предполагает еще большие компетенции (в том числе проектные) у руководителей, а для исполнителей в качестве дополнительной компетенции возникает необходимость быстрой адаптации к новым проектам и программам и умение работать в меняющейся команде.

Виртуальные и сетевые организации требуют абсолютно специфических компетенций – генерации и использования знаний, восприимчивости к инновациям.

Переход от экспортно-сырьевого к инновационного типу развития российской экономики способствует появлению новых требований к качеству рабочей силы. Герман Греф в январе 2010 года, выступая на международной конференции «Россия и мир: вызовы нового десятилетия» отметил: «Качество рабочей силы для России – это вызов номер один». Он подчеркивает, что для решения задач в условиях инновационной экономики у работников недостаточно имеющихся знаний и навыков.

К рабочей силе предъявляются принципиально новые требования:

1. Готовность и способность к непрерывному обучению.
2. Способность генерировать идеи.
3. Готовность к риску.
4. Профессиональная мобильность.
5. Способность к критическому мышлению.
6. Креативность и предприимчивость.
7. Готовность к работе в высоко конкурентной среде.
8. Универсализация работника, связанная с освоением нескольких специальностей и даже профессий.
9. Готовность работника в соответствии с требованиями рынка труда быстро освоить новую профессию.

В современных условиях хозяйствования рабочая сила уже не рассматривается как технически заменяемый фактор производства. Она должна оцениваться как фактор, определяющий экономическое развитие и способствующий повышению производительности и конкурентоспособности.

До сих пор в экономической науке не существует единства в определении, что же такое качество рабочей силы. Чаще всего этот феномен определяется как «совокупность свойств человека, проявляющихся в процессе труда и включающих в себя квалификацию и личные характеристики работника: физиологические и социально-психологические особенности (здоровье, умственные способности), а также адаптированность, в т. ч. гибкость, мобильность, мотивируемость, инновационность, профориентированность, профпригодность» [2, с. 27].

Качество рабочей силы должно способствовать удовлетворению потребностей и запросов общества. Продуктивный и качественный труд с позиции работника – это возможность обеспечить себе более высокий уровень оплаты труда; с позиции работодателя – это обеспечение конкурентоспособности предприятия.

Традиционно качество рабочей силы оценивалось с позиции полученной квалификации работника: чем выше качество (чем выше квалификация), тем выше цена на труд (заработная плата). Однако в экономике знаний данный подход не оправдывает себя. Можно привести достаточно большое количество примеров, когда человек с высшим образованием не может найти достойную работу и вынужден работать, например, дворником, а другой человек, не имея высшего образования, становится успешным руководителем компании.

Оценить качество рабочей силы можно только в процессе труда. Для такой оценки, по нашему мнению, должен применяться новый подход, в котором критерием качества является инновационная восприимчивость рабочей силы.

Понятие «инновационная восприимчивость» в современной экономической науке является новым и дискуссионным [1; 3]. Мы предлагаем понимать его как готовность и способность рабочей силы к осуществлению инноваций.

Для успешной работы в долгосрочной перспективе работники должны не только научиться приспосабливаться к быстро меняющейся внешней среде, но и сами выступать в роли агентов изменений. Без инноваций это сделать невозможно. В свою очередь, инновационная деятельность не может быть реализована без соответствующей инновационной восприимчивости рабочей силы.

Для оценки качества рабочей силы мы предлагаем использовать представленную структуру:

1. Первый, или базовый, уровень – это полученная работником квалификация как соответствие требованиям государственного образовательного стандарта по соответствующей специальности / соответствующему направлению. В соответствии с государственными стандартами третьего поколения требования к результатам освоения образовательных программ сформированы в виде компетенций, которыми должен обладать выпускник. Количественная оценка степени соот-

ветствия данным компетенциям может быть получена методом экспертных оценок.

2. Второй уровень – это профессиональная пригодность работника как соответствие требованиям профессиограммы, которая включает в себя перечень норм и требований, предъявляемых конкретной профессией или специальностью к работнику. Профессиограмма также включает в себя перечень психологических характеристик, которым должны соответствовать представители конкретных профессий. Количественная оценка степени соответствия данным профессиограммы также может быть получена методом экспертных оценок.

3. Третий уровень – это инновационная восприимчивость как соответствие требованиям инновационной экономики. Это готовность и способность к осуществлению инноваций. В настоящее время отсутствует общепринятая система показателей, характеризующих инновационную восприимчивость трудовых ресурсов. Как справедливо отмечают В.Н. Хасанова и М.Ю. Шапкин [4], разработка таких показателей, оценка влияния качественных показателей рабочей силы на количественный и качественный результат труда требуют дополнительных исследований. В рамках третьего уровня оценка качества рабочей силы может быть выражена с помощью, например, такого коэффициента, как количество изобретений, патентов, рационализаторских предложений, новых изделий на одного работающего.

В инновационной экономике акцент смещается с материальных ресурсов, которые рассматриваются как основные факторы роста в рамках ресурсной экономики, в сторону развития и капитализации знаний. Одним из решающих нематериальных фактором конкурентоспособности компаний и российской экономике в целом становится качество рабочей силы. Предложенный новый подход к оценке качества рабочей силы, где критерием выступает инновационная восприимчивость работников, создает предпосылки для формирования системы показателей оценки качества рабочей силы, а также для разработки путей его повышения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Владимирова О. Н. Управление инновационной восприимчивостью региона: методология и инструментарий : автореф. дисс. … докт. экон. наук. Красноярск, 2011. 39 с.
2. Горшенин В. Ф. Ценностный подход к оценке качества рабочей силы // Вестник Челябинск. гос. ун-та. 2010. № 14(195). С. 27–30.
3. Евсеев О. С. Инновационная восприимчивость национальной экономики в условиях модернизации // Молодой ученый. 2012. №1. Т. 1. С. 98–104.
4. Хасанова В. Н., Шапкин М. Ю. Методологические проблемы качества рабочей силы // Экономика и управление. 2010. №3 (64). С. 176–179.

УДК 519.816

Зенцова Людмила Владимировна,
аспирант, кафедра информатики и кибернетики, Байкальский государственный университет экономики и права,
e-mail: lyus2004@mail.ru

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ИННОВАЦИЙ

L.V. Zentsova

MODELS AND METHODS OF INNOVATIONS EVALUATION

Аннотация. *Рассматривается актуальная тема оценки инноваций. Представлены дерево свойств показателей инноваций, содержательный анализ отношений свойств показателей инноваций и их измерителей, построена сетевая модель оценки инноваций. Приведен сравнительный анализ оценок инноваций, выполненных методом максиминной свертки на основе теории нечетких множеств, методом анализа иерархий и методом аналитических сетей.*

Ключевые слова: *оценка инноваций, модель, системный анализ, метод максиминной свертки теории нечетких множеств, метод анализа иерархий (МАИ), метод аналитических сетей (МАС).*

Abstract. *The article deals with the topical issue of innovations evaluation. There are the tree of indicators of innovation properties, analysis of the relationships between the indicators of innovation properties and their measures, the network model of innovations evaluation. The author submits comparative analysis of the innovation estimates based on the maximin convolution method of fuzzy set theory, the Analytic Hierarchy Process and the Analytic Network Process.*

Keywords: *evaluation of innovations, model, system analysis, maximin convolution method of fuzzy set theory, Analytic Hierarchy Process (AHP), Analytic Network Process (ANP).*

Современный мир является сложной системой, проявляющей свои свойства через взаимодействие и взаимозависимость его составляющих, образующих единое целое. Одним из инструментов его познания является системный анализ – научный метод познания, который основан на выявлении структурных связей составляющих исследуемой системы, играющих значительную роль в процессах управления в системах различной природы: антропогенных, технических, производственных, экономических, социальных, биологических.

Формализация системы включает ее структуризацию, формализацию ее элементов и взаимодействий. Таким образом, набор <Э, С> определяет формальное описание системы, где Э = {$э_1$, $э_2$, … , $э_n$} – множество составляющих элементов системы, С = {c_1, c_2, … , c_m} – множество системных связей и отношений.

Примерами задач управления в плохо формализуемых системах являются управление безопасностью систем связи и транспортных систем; стратегическое и тактическое планирование в организациях; управление «электронным» государством; управление проведением открытых конкурсов на определение победителя на выполнение работ, поставку товаров или предоставление услуг; управление инновациями, создаваемыми и используемыми в различных сферах деятельности, в том числе применительно к новым подходам по управлению персоналом (приоритет системы корпоративных ценностей), управление в системах образования, здравоохранения, энергообеспечения.

В широком смысле слова управление в системе может быть направлено либо на сохранение ее функциональных свойств и признаков, либо на развитие системы.

Определим управление как процесс преобразования системы в желаемое состояние. Таким образом, набор <У, С, О, С*> определяет управление в системе, где У – заданные условия функционирования системы, С – множество возможных состояний системы, О – множество возможных операторов, переводящих систему из одного состояния в другое, С* – желаемое состояние системы.

Часто в управлении приходится решать задачу выбора лучшей альтернативы или ранжирования альтернатив некоторой системы.

Математическая модель постановки задачи выбора лучшей альтернативы или ранжирования альтернатив представляет собой упорядоченную последовательность: <А, К, П, Р, КО>, где А = {a_1, a_2, … , a_p} – конечный набор альтернатив, К = {$к_1$, $к_2$, … , $к_m$} – конечный набор критериев оценки альтернатив, КО – множество критериальных оценок альтернатив (множество исходов), П – система предпочтений, Р – решающее правило.

В последнее время среди задач управления в плохо формализуемых системах выдвигается задача обеспечения роста компетенций ЛПР для принятия эффективных решений. Актуальность данной задачи определяет ее весомое значение в области управления инновациями – при выборе и ранжировании альтернативных инноваций.

Решение требует системного подхода, необходимость которого при оценке качества инноваций определяется:

- сложностью экспертируемого объекта: тройственностью трактовки понятия «инновация» (процесс; результат; процесс и результат);
- рассмотрением объекта в совокупности взаимосвязанных элементов системы «человек – среда – инновация»;
- наличием множества альтернативных инноваций;
- наличием множества критериев оценки;
- отсутствием стандарта качества инноваций и стандарта в выборе инструментария по оценке качества;
- субъективной зависимостью набора критериев оценки инноваций от состава и компетенций экспертной группы;
- отсутствием количественной и/или качественной информации о предпочтительности альтернатив и о последствиях;
- наличием неуправляемых или слабо управляемых факторов в системе «человек – общество – инновация»:

1) технологических (новые технологии и научные открытия),

2) производственных (предпринимательская инициатива, распоряженческий фактор, опасный и вредный производственный фактор);

3) экономических (темп экономического роста, структура потребления, финансовая политика, денежно-кредитная политика, изменение спроса),

4) политических и правовых (стандарты, законы и правовые нормы),

5) социальных (уровень доходов, демографическая ситуация, уровень образования, востребованность инновации, общественное признание, стиль жизни, отношение к качеству товаров и услуг, отношение к труду),

6) культурных (культурная среда и моральные ценности, религия).

Для построения модели оценки качества инноваций на основе анализа понятия «инновация», критериев инноваций, признаков их классификации и применения основ квалиметрии выделены конечные наборы свойств показателей инноваций

– множество *S*, их количественных и/или качественных измерителей – множество *I*.

Рассмотрим интегральное качество инновации, которое включает «функциональность» и «экономичность (все затраты)» [5, 47].

Функциональность, определяющая качество на начальном уровне, либо выражается основной функцией объекта, либо проявляется во вспомогательной функции по взаимодействию в системе «человек – среда – объект» [5, 45].

Выделим в качестве основной функциональной характеристики инновации «результативность» как степень достижения запланированных результатов. Результативность представлена значимостью по степени соответствия цели, социальной и практической значимостями.

В качестве вспомогательных функциональных характеристик инновации (взаимодействия в системе «человек – среда – объект») выделим реализуемость, тиражируемость, рискованность и согласованность со средой. Свойство экономичности представлено подсвойствами: финансовые, материально-технические и трудовые затраты.

Установленные отношения между наборами свойств показателей инноваций *S* и их измерителей *I* представлены в табл. 1.

На основе содержательного анализа отношений свойств показателей инновации и измерителей свойств устранены лишние связи между ними.

Таблица 1

Свойства показателей инноваций (*S*)				**Измерители (*I*)**
1. Качество инновации (результаты, получаемые обществом)	1.1. Результативность	1.11. Значимость по степени соответствия цели	1.11.1. Ценность результата	Наличие нового, самодостаточного, завершенного результата в теории и практике
			1.11.2. Актуальность	Степень соответствия ожиданиям
			1.11.3. Целостность	Наличие нового самодостаточного, завершенного результата в теории и практике
			1.11.4. Прогрессивность	Положительная динамика уровня развития
		1.12. Социальная значимость	1.12.1. Общественное признание	Степень соответствия ожиданиям
			1.12.2. Востребованность	Степень соответствия ожиданиям
			1.12.3. Создание условий для всестороннего развития личности	Степень соответствия ожиданиям
		1.13 Практическая значимость	1.13.1.Полезность (ожидаемое удовлетворение потребностей)	Степень соответствия ожиданиям
			1.13.2. Безопасность	Степень соответствия инновации здоровьесберегающим технологиям
	1.2. Согласованность со средой	1.21. Интегрированность в среду		Степень становления органической частью среды
		1.22. Нормативно-правовое обеспечение		
		1.23. Гибкость (универсальность, адаптивность)		
	1.3. Реализуемость	1.31. Трудоемкость		Практическая проверка
		1.32. Разработанность		
	1.4. Тиражируемость			Возможность творческого применения в массовом опыте
	1.5. Рискованность	1.51. Сопротивление переменам участников инновационного процесса		Степень соответствия ожиданиям
		1.52. Недостаток квалифицированных кадров		Уровень квалификации кадров
		1.53. Снижение качества		Положительная динамика уровня развития
2. Экономичность (все затраты)		2.1. Финансовые затраты		Руб.
		2.2. Материально-технические затраты		
		2.3. Трудовые затраты		

Выявлено, что имеются простые свойства с одинаковыми измерителями, и объединение таких свойств под более высокий уровень дерева показателей не окажет значительного влияния на оценку качества. Графический результат содержательного анализа отношений свойств показателей инноваций и их измерителей представлен на рис. 1.

Таким образом, анализ проблемной области позволил сузить множество свойств показателей инноваций, влияющих на оценку их качества. Каждая альтернативная инновация $a_i \in A, i = 1, ..., p$, описывается набором свойств S = <Ц, П, В, Б, С, Р, Т, Н, СК, З>, сгруппированных в 4 кластера (табл. 2).

Таблица 2

Кластер	Элементы кластера	Способ измерения
Результативность	1. Ценность результата – Ц 2. Прогрессивность – П 3. Востребованность – В 4. Безопасность – Б	Качественный Качественный Качественный Качественный
Возможности	1. Согласованность со средой – С 2. Разработанность – Р 3. Тиражируемость – Т	Качественный Качественный Качественный
Рискованность	1. Недостаток квалифицированных кадров – Н 2.Снижение качества продукта (товара или услуги) или процесса – СК	Качественный Качественный
Экономичность	1. Затраты – З	Количественный

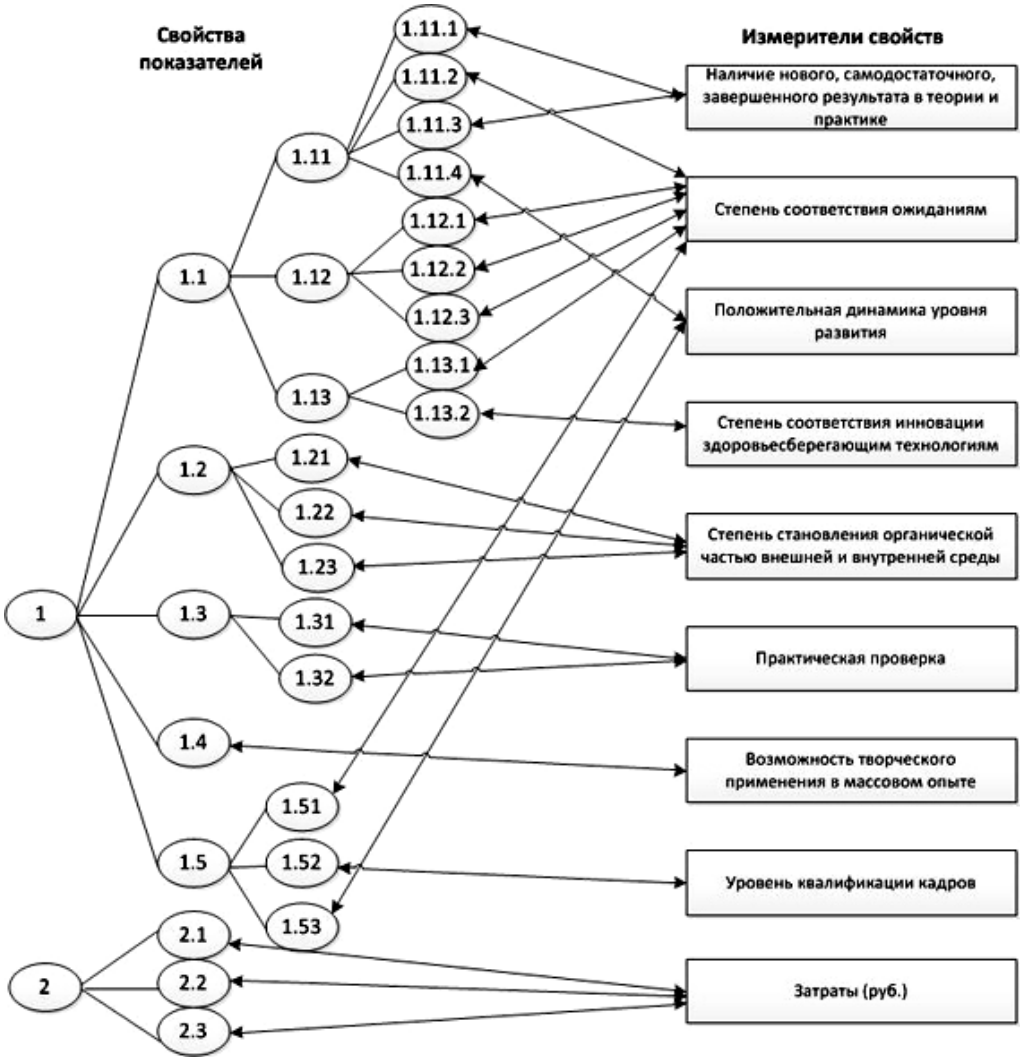


Рис. 1. Графический результат содержательного анализа отношений свойств показателей инноваций и их измерителей

Отметим, что свойства показателей инноваций различаются по важности, и для учета требуется определение весовых значений. Измерение всех свойств показателей инноваций предполагает качественную оценку, за исключением свойства экономичности.

В многокритериальной задаче принятия решений оценку качества инновации можно осуществлять по критериям выгод, возможностей, издержек и рисков и учитывать мнения различных участников инновационного процесса [7, 53].

Анализ предметной области позволяет выделить трех участников инновационного процесса: Разработчик (Исполнитель), Потребитель, Руководитель, а также определить наличие зависимостей и обратных связей между кластерами и их элементами в сетевой модели оценки инноваций. Оценка качества осуществляется по критериям выгод, возможностей, издержек и рисков. Исходя из многокритериальности, зависимости структурных элементов, наличия обратных связей, модель задачи принятия решений по выбору качественной инновации может быть представлена сетевой структурой (рис. 2).

Рис. 2. Сетевая структура оценки инноваций

Несмотря на то, что в кластере «экономичность» присутствует единственный элемент – «затраты», который согласно табл. 2, учитывает три вида затрат: финансовые, материально-технические и трудовые,– в кластере «экономичность» имеется зависимость «от самих себя».

Сравнение результатов оценки инноваций разными методами и подходами проводилось с помощью анализа результатов оценки образовательных альтернатив по 3 критериям (выгоды, издержки, риски) и 12 свойствам показателей инноваций.

«Рассматривались две альтернативы:

1. Традиционный подход: классный руководитель в каждом 5 классе, КлРук.

2. Один куратор на параллель учащихся 5 классов, К5» [3].

Для оценок использовались методы анализа иерархий, максиминной свертки на основе теории нечетких множеств (результаты оценок представлены в нормализованном виде) и метод аналитических сетей. Все три метода базируются на формировании матриц попарных сравнений альтернатив и критериев с использованием шкалы, разработанной Т. Саати. Суждения экспертов при формировании матриц согласованны. Сравнительные результаты оценки альтернатив разными методами отражены на рис. 3.

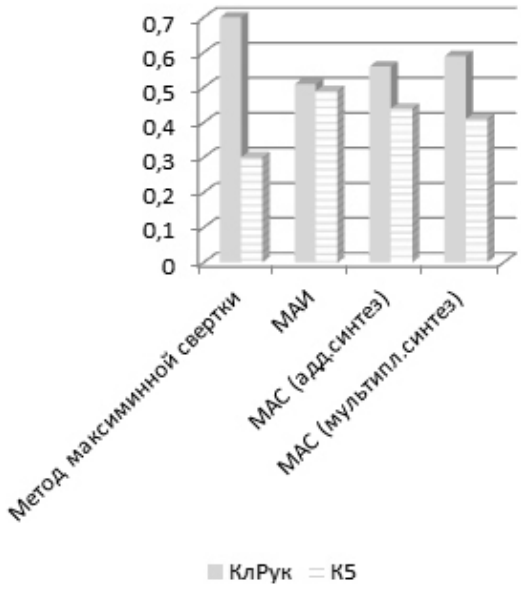


Рис. 3. Сравнение результатов оценки инноваций в образовании с применением различных методов

Таким образом, результаты, полученные разными методами, не отличаются по доминированию альтернатив (в данном случае – альтернатива классного руководства в 5 классах), но отличаются по значениям приоритетов. Такое различие характеризуется различием подходов к оценке. Наибольшую разницу в оценке альтернатив дает метод максиминной свертки. Это является следствием того, что данный метод реализует пессимистичный подход, пренебрегает хорошими качествами, а лучшей определяет альтернативу, имеющую «минимальные недостатки по всем критериям» [4, 118].

Метод анализа иерархий соответствует интуитивному представлению оценки, использует нормированно-взвешенные весовые коэффициенты. Однако с помощью такого метода проблема выстраивается в иерархию, не учитываются сетевые взаимодействия, что становится возможным при использовании метода аналитических сетей.

Сравнительный анализ оценок альтернатив К5 и КлРук, полученных на основе МАС и проведенных дважды с учетом изменений внешней и внутренней среды до внедрения кураторства в 5 классах и через год после внедрения, показывает устойчивость результатов (рис. 4). Приоритет альтернативы классного руководства с течением времени только упрочился, что подтверждает увеличение его значения с 0,56 до 0,85 при аддитивном синтезе приоритетов и увеличение значения с 0,59 до 0,96 при мультипликативном синтезе.

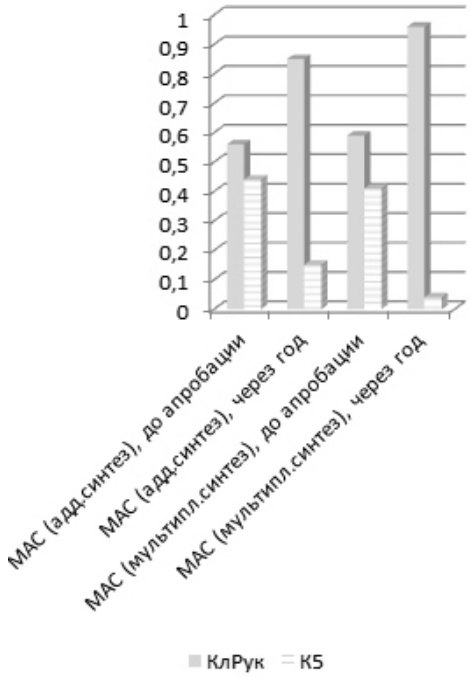


Рис. 4. Сравнение результатов оценки инноваций в образовании на основе МАС с учетом изменений внешней и внутренней среды

Тем не менее, анализ сравнительного результата оценок технологической цепочки инноваций К5 – К7 (системы кураторства в 5 классах и системы кураторства в 7 классах), полученных на основе МАС, дает значительное предпочтение инновации К7 (рис. 5). Приоритеты инновации К7 равны 0,76 и 0,78 при аддитивном и мультипликативном синтезах соответственно, а приоритеты инновации К5 – 0,24 и 0,22 соответственно.

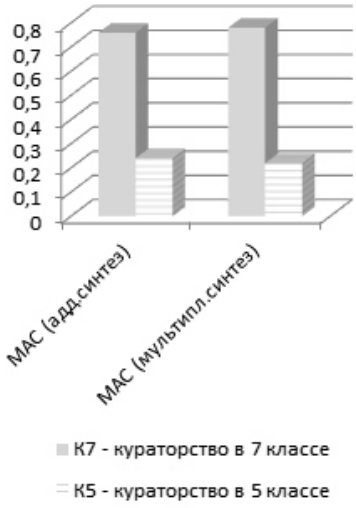


Рис. 5. Сравнение результатов оценки инноваций в образовании на основе МАС с учетом выбора технологических цепочек (зависимость альтернативы от параметра *t*)

Таким образом, оценка технологических цепочек инноваций на основе методов принятия решений позволяет учитывать зависимость альтернативы от параметра *t*, фактически сравнивать альтернативу саму с собой в зависимости от изменений среды, тем самым улучшая качество принятия управленческих решений.

Выводы

1. Методы принятия решений в плохо формализуемых системах позволяют ЛПР принять более обоснованное решение.

2. Оценка инноваций требует системного подхода, необходимость которого определяется:

- сложностью экспортируемого объекта;
- рассмотрением объекта в совокупности взаимосвязанных элементов;
- наличием множества альтернатив;
- наличием множества критериев оценки;
- отсутствием стандарта качества инноваций и стандарта в выборе инструментария по оценке качества;
- субъективной зависимостью набора критериев оценки инноваций от состава и компетенций экспертной группы;
- отсутствием количественной и/или качественной информации о предпочтительности альтернатив и о последствиях;
- наличием неуправляемых или слабо управляемых факторов в системе «человек–общество–инновация».

3. Для модели оценки качества инноваций построено дерево свойств показателей инноваций.

4. Анализ проблемной области позволил сузить множество свойств показателей инноваций, влияющих на оценку их качества.

5. Эвристический подход при формировании матриц попарных сравнений предоставляет возможности сравнения объектов, не имеющих количественного измерения, отличающиеся измерением «неосязаемого» [7, 291].

6. Каждый метод, применяемый для оценки инноваций, имеет свои особенности. Наиболее полную картину оценки инноваций описывает метод аналитических сетей, учитывающий зависимости и обратные связи. Устойчивость метода подтверждают результаты принятия решений, вычисленные на статических числовых значениях, полученных в разные периоды времени.

7. Предложены подходы к улучшению объективности оценки инноваций за счет:

- оценки «совместимых комбинаций наиболее качественных» альтернатив [2];
- оценки технологических цепочек альтернатив (зависимости альтернативы от параметра *t*, учитывающего изменения внешней и внутренней среды), приводящихся в несколько итераций в зависимости от параметра *t*.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Азгальдов, Г. Г. О квалиметрии [Текст] / Г. Г. Азгальдов, Э. П. Райхман. М. : Издательство стандартов, 1972. 172 с.
2. Амбросов, Н. В. Рейтинговая оценка педагогических инноваций на основе метода анализа иерархий [Электронный ресурс] / Н. В. Амбросов, Л. В. Зенцова // Известия ИГЭА (БГУЭП). Электронное издание: Свидетельство о регистрации ЭЛ № ФС77-34490 от 28 ноября 2008 г. ISSN 2072-0904 (Online). – 2011. – № 6. URL: http://eizvestia.isea.ru/reader/article.aspx?id=14063 (Дата обращения 30 ноября 2012).
3. Амбросов, Н. В. Метод аналитических сетей для оценки педагогических инноваций [Электронный ресурс] / Н. В. Амбросов, Л. В. Зенцова // Известия ИГЭА (БГУЭП). Электронное издание: Свидетельство о регистрации ЭЛ № ФС77-34490 от 28 ноября 2008 г. ISSN 2072-0904 (Online). – 2012. – № 4. URL: http://eizvestia.isea.ru/reader/article.aspx?id=13861 (Дата обращения 30 ноября 2012).
4. Андрейчиков, А. В. Анализ, синтез, планирование решений в экономике [Текст] / А. В. Андрейчиков, О. Н. Андрейчикова. М. : Финансы и статистика, 2000. 368 с.
5. Недбай, А. А. Основы квалиметрии. Версия 1.0 [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / А. А. Недбай, Н. В. Мерзликина. – Электрон. дан. (2 Мб). – Красноярск : ИПК СФУ, 2008. – (Квалиметрия : УМКД № 104 – 2007 / рук. творч. коллектива А. А. Недбай). – 1 электрон. опт. диск (DVD). – ISBN 978-5-7638-1454-5.
6. Перегудов, Ф.И. Введение в системный анализ: учебное пособие для вузов [Текст]. М.: Высшая школа,1989. 367 с.
7. Саати, Т. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети [Текст]. М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 360 с.

УДК 625.11:519.85

Анисимов Владимир Александрович,
д. т. н., доцент, профессор кафедры
«Изыскания и проектирование железных дорог»,
Дальневосточный государственный университет путей сообщения,
г. Хабаровск,
e-mail: anisvl@mail.ru
Шуклин Михаил Александрович,
аспирант кафедры «Изыскания и проектирование железных дорог»,
Дальневосточный государственный университет путей сообщения,
тел. 8(4212) 40-71-15, e-mail: shuklinma@mail.ru

К ВОПРОСУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА В ПРОЕКТИРОВАНИИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

V.A. Anisimov, M.A. Shuklin

TO THE ISSUE OF USING THREE-DIMENSIONAL MODEL OF THE RELIEF IN DESIGNING OF THE RAILWAYS

Аннотация. *Предлагается идея трассирования дорог на трехмерной модели рельефа. Рассмотрены цифровые модели местности, удовлетворяющие требованиям проектирования с использованием трехмерных моделей рельефа.*

Ключевые слова: *цифровая модель рельефа, трехмерная модель рельефа, триангуляция Делоне, Кригинг, нейронные сети, радиально-базисная функция.*

Abstract. *The idea of tracing roads on three-dimensional model of a relief is offered. The digital models of terrain meeting requirements of design using of three-dimensional models of a relief are considered.*

Keywords: *digital model of a relief, three-dimensional model of a relief, Delaunay triangulation, Kriging, neural networks, radial basis function.*

Необходимость вариантной и быстрой детальной проработки проектных решений, их экономическая и экологическая оценка определяют современные требования к качеству и производительности проектирования железных дорог. Сокращение трудозатрат и сроков разработки проектных решений без ущерба их качеству обеспечивается организацией сквозной технологии инженерных изысканий и проектирования на базе единого набора данных для всех разделов проекта и применения цифрового моделирования и автоматизированных методов.

С этой целью в проектировании железных дорог широко используются современные технические средства изысканий и системы автоматизированного проектирования (САПР): MXRoad, PYTHAGORAS, CREDO, Robur, IndorCAD/Road, GIP [1–3, 11].

Информационной основой САПР является цифровая модель местности (ЦММ), которая, в свою очередь, состоит из цифровой модели рельефа (ЦМР) и цифровой модели ситуации (ЦМС).

Под термином ЦМР понимают математическое представление участка земной поверхности, полученное путем обработки материалов топографической съемки. ЦМР состоит из двух категорий данных: геометрической и семантической.

Геометрические данные содержат информацию о пространственном положении моделируемой поверхности и, как правило, могут быть представлены в виде функции двух переменных $z = f(x, y)$, где z – отметка точки; x и y – плановые координаты (северная и восточная).

Семантические данные характеризуют принадлежность точек поверхности к различным типам топографических объектов (поле, луг, дорога, река и т. д.). Эти данные имеют вид специальных семантических кодов, приписываемых дискретным элементам цифровой модели [1].

Исходными данными для построения ЦМР являются съемочные точки. Каждая точка должна быть задана как минимум пятью параметрами:

– номером точки;

– северной координатой x;

– восточной координатой y;

– отметкой z;

– семантическим кодом.

Цифровая модель ситуации (ЦМС), как правило, представляет собой векторный чертеж, состоящий из площадных, линейных и точечных объектов. Каждый объект имеет семантическую

информацию, которая отображается в виде условных знаков и пояснительных надписей.

В обобщенном виде автоматизированную технологию проектирования автомобильных и железных дорог в САПР можно представить следующей последовательностью этапов [15, 16]:

1) создание ЦММ;

2) создание гипсометрической модели рельефа;

3) нахождение планового положения трассы;

4) нахождение высотного положения трассы – проектирование продольного профиля (определение проектных отметок) трассы;

5) построение поперечных сечений сооружения (поперечные профили);

6) проектирование искусственных сооружений и инженерно-сервисного обустройства дороги;

7) построение трехмерных моделей рельефа и проектируемого сооружения;

8) визуальная оценка проектного положения трассы на трехмерных моделях рельефа и сооружения;

9) при необходимости корректировка проектного решения (п.п. 3–6)

10) оформление и печать чертежей (план и продольный профиль трассы, поперечные профили сооружения).

Таким образом, в САПР камеральное трассирование выполняется в двух проекциях, т. е. сначала находят положение трассы в горизонтальной проекции, а затем – в вертикальной. Построение трехмерных моделей сооружения и рельефа в данных системах в основном применяется для визуальной оценки полученного проектного решения. Если выявляется необходимость улучшения проектного положения трассы, то корректировка предполагает повторение процесса проектирования с третьего этапа.

Авторами предлагается использовать трехмерную модель рельефа не только для оценки положения трассы в пространстве, но и для непосредственного трассирования дороги. Такой подход позволит объединить 3, 4, 8 и 9 этапы в один и представить технологию автоматизированного проектирования железных дорог в следующем виде:

1) создание ЦММ;

2) построение трехмерной модели рельефа;

3) определение положения трассы в пространстве на трехмерной модели рельефа;

4) построение поперечных сечений сооружения;

5) проектирование искусственных сооружений и инженерно-сервисного обустройства дороги;

6) оформление и печать чертежей (план и продольный профиль трассы, поперечные профили сооружения).

Чтобы обеспечить реализацию трассирования на трехмерной модели рельефа, необходимо выбрать или разработать метод её построения, который будет удовлетворять следующим критериям:

a) точность моделирования рельефа местности;

b) скорость и точность вычисления положения точки (координаты x, y, z) в пространстве на данной модели;

c) точность и быстрота визуализации трехмерной модели.

В настоящее время в современных географических информационных системах (ГИС) используются несколько типов ЦМР в зависимости от формы представления данных: с регулярным расположением точек на прямоугольных, треугольных и гексагональных сетках; с нерегулярным представлением точек; с изолинейным (уровневым) заданием точек, расположенных равномерно на изолиниях либо с учетом их кривизны. Для построения цифровых моделей рельефа применяется множество методов. К наиболее распространенным относятся интерполяция на основе триангуляции Делоне, кригинг и средневзвешенная интерполяция.

Рассмотрим пригодность указанных методов моделирования рельефа для проектирования железных дорог с учетом вышеперечисленных критериев.

В триангуляции Делоне, названной в честь российского математика Бориса Николаевича Делоне, в которой во избежание изломов изолиний на ребрах полигонов для каждой исходной точки строится локальный полином первой или второй степени, и по триангуляции эти локальные полиномы «склеиваются» в одну гладкую поверхность. При этом должно выполняться условие Делоне – внутрь окружности, описанной вокруг любого построенного треугольника, не должна попадать ни одна из заданных точек триангуляции [4].

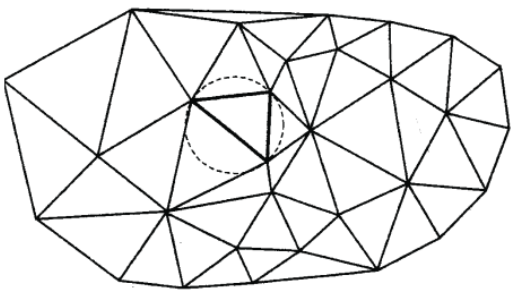


Рис. 1. Условие триангуляции Делоне

При треугольном разбиении односвязной области число элементов N определяется по формуле

$$N = 2(n-1) - \tau,$$

где n – число всех опорных точек; τ – число опорных точек на границе области триангуляции.

В пределах треугольника интерполяция может осуществляться как по линейному, так и по нелинейному закону. В последнем случае целесообразно отказаться от хранения коэффициентов уравнений и хранить модель в виде регулярной сетки высот (при этом потребуется сгущение сети в 8–10 раз по отношению к плотности опорных) [10].

Задача определения высот точек трассы сводится к нахождению в каждом случае тех трех смежных исходных точек модели, между которыми попадет соответствующая искомая точка трассы, в нахождении коэффициентов уравнения плоскости, проходящей через эти три точки, и, наконец, в определении по полученному уравнению искомой высоты.

Уравнение искомой плоскости в общем виде может быть представлено:

$$H = AX + BY + C, \qquad (1)$$

где X, Y, H – координаты точки трассы, высоту которой нужно определить; A, B, C – неизвестные коэффициенты уравнения плоскости, проходящей через точки с номерами j, k, i цифровой модели [14].

Если искомая точка трассы попадает между смежными исходными точками ЦМР с номерами *j, k, i,* то при подстановке в уравнение известных координат трех точек цифровой модели получим систему уравнений:

$$\begin{aligned} H_j &= AX_j + BY_j + C, \\ H_k &= AX_k + BY_k + C, \\ H_i &= AX_i + BY_i + C. \end{aligned} \qquad (2)$$

В результате решения системы уравнений определяют неизвестные коэффициенты *A, B* и *C* уравнения плоскости, подставив в которое проектные координаты *X* и *Y* искомой точки трассы, определяют ее высоту *H* [14].

При фиксированном объеме памяти сетка квадратов может содержать число узлов, в 9 раз превышающее число узлов триангуляции. Для достижения одной и той же точности число узлов регулярной модели должно быть в 8–10 раз больше числа узлов нерегулярного хранения модели. При одном и том же объеме памяти регулярное и нерегулярное хранение модели обеспечивают одинаковую точность, но при этом нерегулярное хранение проигрывает в быстроте восстановления высоты по плановым координатам на 2–3 порядка.

Затраты машинного времени могут быть уменьшены путем предварительного автоматического составления массивов справочников, существенно ускоряющих поиск среди треугольников. При этом не требуется хранение номеров всех смежных треугольников.

Разбиение области на треугольники может быть совмещено с различными способами интерполяции между спорными точками. Простейшим способом является линейная интерполяция. Модель в этом случае представляет собой объединение плоских треугольников, без разрывов, пробелов и нахлестов, покрывающих область моделирования. При верном построении покрытия такая модель обеспечивает точность восстановления высот не хуже, чем с плана, построенного вручную на тех же опорных точках. Однако этот метод сейчас применяется редко. Его недостаток – необходимость сглаживания ломаных горизонталей, которые получаются в сечениях многогранника, что требует применения специального аппарата и сводит на нет простоту метода. Вычисление геоморфологических характеристик поверхности затруднено из-за невозможности получения производных различных порядков. Триангуляция Делоне не обеспечивает также выделения конкретных форм земной поверхности, характеризующихся комплексом геоморфологических параметров. Поэтому большинство существующих моделей основано на нелинейных методах интерполирования. Выбор метода зависит от размеров и формы элементов разбиения области моделирования, а также от принятого способа хранения окончательно построенной модели [10].

Метод кригинга, назван по фамилии южноафриканского геолога D.G. Krige, который применял его для определения запасов золота в россыпях. В этом методе используется функция, которая называется полувариограммой, где важную роль играет R_O – радиус влияния. Вариограмма представляет собой экспериментальную кривую, строящуюся следующим образом: в поле точек на графике вдоль оси *X* откладывается расстояние между каждыми двумя исходными точками, а вдоль оси *Y* – разность *Z* между ними. Затем строится кривая, соответствующая средним значениям разности по *Z*. Кригинг позволяет учесть эффект «самородка», когда в какой-либо из точек случайно возникают очень высокие значения.

При учете этого эффекта кригинг превращается из интерполяционной функции в экстраполяционную. Кригинг в качестве интерполяционной функции незаменим при расположении исходных точек с очень большой неоднородностью, напри-

мер в случае использования исходных данных, расположенных по профилям [5].

Метод кригинга – это метод интерполяции, который основан на использовании методов математической статистики. В его реализации применяется идея регионализированной переменной, т. е. переменной, которая изменяется от места к месту с некоторой видимой непрерывностью, она не может моделироваться только одним математическим уравнением. Поверхность представляется в виде трех независимых величин. Первая – тренд, характеризует изменение поверхности в определенном направлении. Тренд (рис. 2), как известно, представляет собой долговременную тенденцию изменения исследуемого ряда. Далее предполагается, что имеются небольшие отклонения от общей тенденции, вроде маленьких пиков и впадин, которые являются случайными, но все же связанными друг с другом пространственно. Наконец, имеется случайный шум, который на рис. 2 обозначается «валунами». С каждой из трех переменных надо оперировать в отдельности. Тренд оценивается с использованием математического уравнения, которое наиболее точно описывает общее изменение поверхности, во многом подобном поверхности тренда [5].

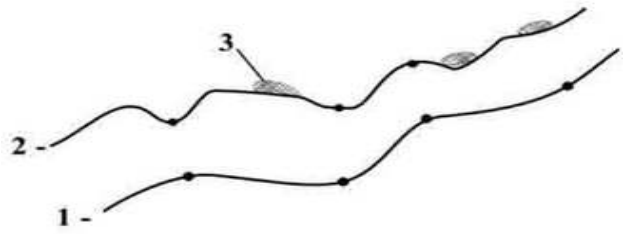


Рис. 2. Элементы кригинга: 1 – тренд, 2 – случайные, но пространственно связанные высотные колебания, 3 – случайный шум («валуны»)

Кокригинг позволяет строить поверхности карты по нескольким наборам точек, что увеличивает надежность и детальность результатов интерполяции. Это требуется для реализации алгоритма еще и потому, что модель постоянно расширяется, число базовых точек растет, а значит, добавляются новые наборы данных. Кроме того, эта возможность добавляет данному методу интерполяции дополнительные возможности анализа взаимной корреляции данных, а тем самым и большую гибкость, то есть вторичная переменная используется для прогнозирования первичной. В данном случае метод кригинга применяется несколько раз, каждый раз используя уже кроме базовых ранее полученные точки. Метод кригинга используется в программных пакетах Geostatistical Analyst, Geode, Surfer, ArcView и др. [5].

Если известны высоты в узлах квадрата по построенной модели, могут быть определены высоты в любой произвольной точке поверхности (рис. 3) [12]:

$$H_0 = \sum_{1}^{i=4} \frac{H_i \times 1/r_i^3}{\sum_{1}^{i=4} 1/r_i^3}. \qquad (3)$$

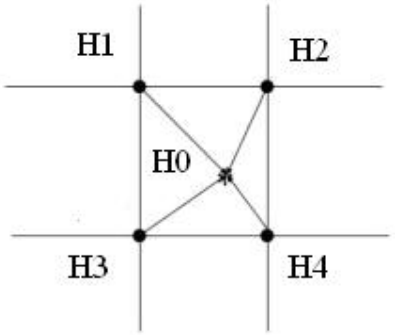


Рис. 3. Интерполяция высоты внутри квадрата

Метод средневзвешенной интерполяции был разработан К.Ф. Гауссом в начале XIX в. для нужд геодезии, однако в западной литературе его связывают с именем Шепарда. В этом методе весовая функция $W(i) = 1/r(i)$, где $r(i)$ – расстояние до *i*-й точки или другая функция, убывающая с ростом расстояния. Этот метод достаточно прост для реализации, однако производные у истинной и модельной поверхности могут сильно различаться. Данное обстоятельство заставляет прибегнуть к обобщению данного метода. При этом берется взвешенная сумма не показателей $Z(i)$, а локальных полиномов, коэффициенты которых определяются методом наименьших квадратов по значениям Z, ближайшим к *i*-й опорной точке. Таким образом, интерполируются не только значения функции, но и ее частные производные.

Пусть известны значения признака $z_i, i = 1,...,n$ в некотором наборе опорных точек. Опорные точки заданы своими координатами (x_i, y_i), $i = 1,...,n$ в плоскости карты. Таким образом, в трехмерном пространстве задан набор точек (x_i, y_i, z_i), $i = 1, ..., n$, которые являются исходными данными для построения в этом пространстве интерполирующей поверхности. Согласно методу средневзвешенной интерполяции, моделируемая поверхность представляется в виде

$$f(x,y)=\frac{\sum_{i=1}^{n} w_i(x,y)P_{di}(x,y)}{\sum_{i=1}^{n} w_i(x,y)}, \qquad (4)$$

где весовая функция $w_i(x,y)=r_i^{-\alpha}(x,y)$ – положительная убывающая функция от расстояния $r_i(x,y)=\sqrt{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2}$, а сглаживающие полиномы имеют вид

$$P_{di}(x,y)=z_i+\sum_{0<k+kd} a_{kl}(x-x_i)^k+(y-y_i)^l. \qquad (5)$$

Из способа задания интерполирующей функции $f(x,y)$ и равенства $P_{di}(x_i,y_i)=z_i$ следует $f(x_i,y_i)=z_i$, т. е. моделируемая в трехмерном пространстве поверхность $z=f(x,y)$ проходит через точки вплоть до порядка d. Очевидно, при $d=0$ производные модельной поверхности в опорных точках равны нулю, следовательно, углы склонов истинной и модельной поверхностей могут существенно отличаться. Сблизить углы склонов истинной и модельной поверхностей можно при помощи сглаживающих полиномов степени $d=1$, для которых подбор коэффициентов несложно осуществить методом наименьших квадратов. Возможно использование сглаживающих полиномов более высокой степени, однако это имеет смысл только для специальных задач, когда особое значение имеет точность моделирования крутизны перегибов и других характеристик поведения функции, определяемых производными высших порядков, и меньше внимания уделяется собственно ошибке интерполяции [6].

Параметр α является обратной степенью весовой функции и определяет, насколько значения в близких опорных точках сильнее влияют на поведение функции $f(x,y)$, чем значения в удаленных опорных точках. При изменении количества опорных точек высоты промежуточных точек сильно варьируются. Таким образом, оптимальное значение параметра α зависит прежде всего, от количества исходных опорных точек. При выборе значения α следует учитывать среднее, минимальное и максимальное количество опорных точек на плоскости, тогда можно добиться удовлетворительных результатов интерполяции для плоскостей с разным количеством опорных точек [6].

Суть описанного метода средневзвешенной интерполяции, а именно прямая зависимость интерполированных значений от значений в опорных точках и обратная зависимость от расстояний до опорных точек, раскрывает смысл интерполяционной процедуры при ее использовании для моделирования рельефа местности: интерполяция отражает принцип «изоляции расстоянием», введенный С. Райтом. В таком контексте обратная степень весовой функции α является характеристикой пространства, выражающей степень его влияния для точек и обеспечивающей соответствие интерполяционной модели реальным данным рельефа [6].

Как уже было сказано, надежность полученных значений поверхности рельефа местности зависит от количества и местоположения опорных точек и может меняться как от карты к карте, так и в пределах одной карты. Из теории интерполяции известно, что при использовании интерполяционных полиномов отклонение моделируемой поверхности от истинной прямо пропорционально произведению расстояний до опорных точек. Чем выше плотность опорных точек, тем меньше ошибка интерполяции и лучше соответствие моделируемой поверхности и истиной поверхности рельефа местности, и наоборот, при отсутствии опорных точек в каких-либо частях ареала интерполированные значения там окажутся менее достоверными.

В последние десятилетия в мире бурно развивается новая прикладная область математики, специализирующаяся на искусственных нейронных сетях (НС). В то время как на западе применение НС уже достаточно обширно, у нас это еще в некоторой степени экзотика – российские фирмы, использующие НС в практических целях, наперечет. Широкий круг задач, решаемый НС, не позволяет в настоящее время создавать универсальные, мощные сети, вынуждая разрабатывать специализированные НС, функционирующие по различным алгоритмам [8].

Во-первых, основу каждой НС составляют относительно простые, в большинстве случаев однотипные элементы (ячейки), имитирующие работу нейронов мозга. Далее под нейроном будет подразумеваться искусственный нейрон, то есть ячейка НС. Каждый нейрон характеризуется своим текущим состоянием по аналогии с нервными клетками головного мозга, которые могут быть возбуждены или заторможены. Он обладает группой синапсов – однонаправленных входных связей, соединенных с выходами других нейронов, а также имеет аксон – выходную связь данного нейрона, с которой сигнал (возбуждения или торможения) поступает на синапсы следующих нейронов. Общий вид нейрона приведен на рис. 4. Каждый синапс характеризуется величиной синаптической связи или ее весом w_i, который по

физическому смыслу эквивалентен электрической проводимости [9].

Текущее состояние нейрона определяется как взвешенная сумма его входов:

$$S = \sum_{i=1}^{n} x_i w_i \,. \qquad (6)$$

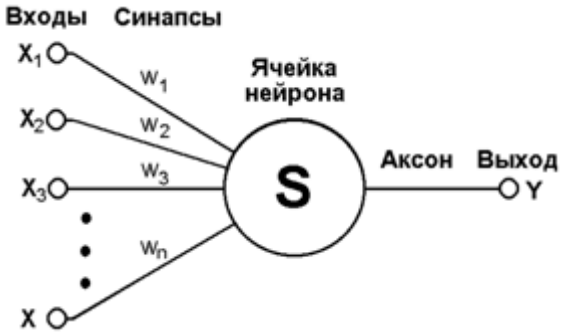


Рис. 4. Искусственный нейрон

Выход нейрона есть функция его состояния:

$$y = f(s). \qquad (7)$$

Для достижения поставленной задачи так же рассмотрен предложенный А.В. Кулажским метод моделирования рельефа на основе нейронной сети *радиальных базисных функций* (РБФ), в которой входными данными для создания ЦМР являются точки поверхности, заданные тремя пространственными координатами (x, y – координаты точки в плане, z – высота). Для заданного количества точек необходимо найти функцию $f(x, y)$, такую что $f(x_i, y_i) = z_i$ для всего заданного множества входных точек. Согласно теореме А.Н. Колмогорова [13] каждая непрерывная функция n переменных, заданная на единичном кубе n-мерного пространства, представима в виде:

$$f(x_1, x_2, ..., x_n) = \sum_{q=1}^{2n+1} h_q \left[\sum_{p=1}^{n} \varphi_q^p (x_p) \right], \qquad (8)$$

где функции $h_q(u)$ непрерывны, а функции $\varphi_q^p(x_p)$, кроме того, еще и стандартны, т. е. не зависят от выбора функции f.

Применительно к нашему случаю искомая функция выглядит следующим образом:

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^{n} \omega_i \varphi(x, y, c_i^x, c_i^y), \qquad (9)$$

где ω_i, c_i^x, c_i^y – константы, φ – радиально-базисная функция. В качестве функции φ можно принять любую радиально-базисную функцию, которые широко используются для решения задач многомерной интерполяции и аппроксимации [10].

Анализируя выражение (9), можно заметить, что данная система может быть реализована с помощью нейронной сети, состоящей из двух слоев: скрытого нелинейного слоя, имеющего n нейронов, и выходного линейного слоя, имеющего один нейрон, который передает на выход взвешенную сумму выходов нейронов первого слоя [10]. Структура такой нейронной сети представлена на рис. 5.

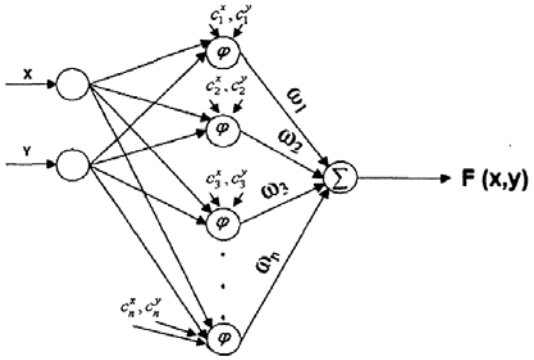


Рис. 5. Нейронная сеть РБФ

Данный метод позволяет реализовать неявную функцию поверхности. Проведенные исследования позволяют утверждать, что разность заданных и вычисленных высотных отметок на входных данных стремится к нулю, в связи с чем можно говорить о высокой точности предложенного метода моделирования. Также стоит заметить, что данная точность не зависит от характера распределения входных данных.

В результате проведенного анализа выбран метод моделирования рельефа на основе нейронной сети радиальных базисных функций, который удовлетворяет поставленным критериям.

С практической точки зрения предлагаемый метод моделирования рельефа ориентирован на снижение трудоемкости получения и использования моделей, используемых при вариантных проработках проектных решений по трассе.

На данный момент остается открытым вопрос скорости отображения данной модели, т. к. при использовании ЦММ на базе нейронной сети РБФ при большой точности и протяженности исходного рельефа местности значительно возрастает количество нейронов, что приводит к уменьшению скорости визуализации ЦММ рельефа местности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Инновационные технологии САПР, BIM и управления предприятием [Электронный сайт] / ПСС. С.-Птб., 200-2012. URL : www.pss.spb.ru (Дата обращения 27.09.2012).

2. Система автоматизированного проектирования железных дорог IndorCAD/Rail [Электронный сайт] / ИндорСофт. URL : www.indorsoft.ru. (Дата обращения 27.09.2012).
3. Современное проектирование инфраструктуры [Электронный ресурс] : электрон. прогр.: AutoCAD Civil 3D. Autodesk. Inc. 2010. URL : www.autodesk.ru. (Дата обращения 27.09.2012).
4. Скворцов А.В. Триангуляция Делоне и её применение. Томск : Изд-во Томск. ун-та, 2002. 128с.
5. Портал магистров ДонНТУ [Электронный ресурс]. URL : www.masters.donntu.edu.ua. (Дата обращения 27.09.2012).
6. Лаборатория генетики человека ИОГен РАН [Электронный ресурс]. URL: http://pc601s.vigg.ru/.
7. Гончаров В. Л. Теория интерполирования и приближения функций. М. : Гостехиздат, 1954.
8. Нейронные сети [Электронный сайт] / BaseGroup Labs. URL : www.basegroup.ru/library/analysis/neural/. (Дата обращения 27.09.2012).
9. Короткий С. Нейронные сети: основные положения [Электронный ресурс]. URL: http://algolist.manual.ru/. (Дата обращения 27.09.2012).
10. Кулажский А. В. Применение нейронных сетей на основе радиальных базисных функций в моделировании рельефа местности // Вестник Ростов. гос. ун-та путей сообщения. 2009. №3(35). С. 118–124.
11. Компания «Кредо-Диалог» [Электронный сайт]. URL: http://www.credo-dialogue.com/. (Дата обращения 27.09.2012).
12. Сухинов А. Кригинг интерполяция [Электронный ресурс]. URL : http://iproc.ru/drafts/kriging/. (Дата обращения 02.10.2012).
13. Колмогоров А. Н. О представлении непрерывных функций нескольких переменных суперпозициями непрерывных функций меньшего числа переменных // ДАН СССР. 1956. Т. 108. No. 2. С. 179–182.
14. Курс высшей математики : учеб. для студ. высш. пед. учеб. завед. М. : ВЛАДОС, 2004. 560 с.
15. Шуклин М. А., Малых К. А. Опыт использования цифровых моделей рельефа в проектировании железных дорог // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке : тезисы докл. студ. науч. конф., Хабаровск, 1-15 марта. 2011. Хабаровск : ДВГУПС, 2011. С. 50.
16. Малых К. А., Осипов А. В., Шуклин М. А., Анисимов В. А. Трёхмерная визуализация цифровой модели рельефа для проектирования железных дорог // Научно-технические проблемы транспорта, промышленности и образования : труды Всерос. молодежной науч.-практ. конф., 10-13 апреля 2012. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС. 2012. С. 198–203.

УДК 656.022.8

Железнов Дмитрий Валерианович,
к. т. н., доцент, проректор по учебной работе ИрГУПС, тел.: 8(3952) 638-305

МОДЕЛЬ РАСЧЁТА НАГРУЗКИ НА ЭЛЕМЕНТЫ СЕТИ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ СТАЦИОНАРНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ

D.V. Zheleznov

MODEL TO CALCULATE THE LOAD ON THE NETWORK ELEMENTS WHEN PREDICTING THE STATIONARY TRAFFIC

Аннотация. *Рассмотрено применение результатов прогнозирования грузопотоков для определения загрузки элементов транспортной сети. Предложена формализация транспортного процесса для построения модели расчёта нагрузки на отдельные элементы. Приведён пример расчёта нагрузки на отдельные элементы транспортной сети, и определены наиболее загруженные. Выработаны подходы к поэтапному наращиванию мощности транспортной сети, что позволяет использовать модель при разработке целевых программ, а также отдельных мероприятий с оптимизацией инвестиций.*

Ключевые слова: *транспортная сеть, прогнозирование объёмов перевозок, наращивание мощности транспортной сети, определение загрузки элементов транспортной сети, экономическая эффективность инвестиций в транспортную отрасль.*

Abstract. *The article considers application of the results of predicting traffic forecasting to determine the load elements of the transport network. Formalization of the transport process for the model calculation load on the individual elements is proposed. An example of calculating the load on some elements of the transport network and identifying the most loaded one is given. Phased approach to increase the capacity of the transport network, which allows the use of a model in the development of targeted programs, and special events with the optimization of investment are developed.*

Keywords: *transportation network, traffic volume forecasts, increasing capacity of the transport network, definition of load elements of the transport network, economic efficiency of investments in the transport sector.*

Транспорт представляет собой большую и очень сложную подсистему национальной экономики. Его развитие тесно связано с протекающими экономическими процессами. Перекосы, допускаемые в размещении производительных сил, находят своё отражение в формировании транспортной инфраструктуры. Медленное освоение восточных и северных территорий, исторически обладающих низкой плотностью населения, нашло своё отражение в формировании путей сообщения. Существующая сегодня региональная неравномерность развития транспортной инфраструктуры ограничивает развитие единого экономического пространства страны и не позволяет в полной мере осваивать ресурсы регионов. Наиболее существенны различия между европейской частью Российской Федерации и регионами Сибири и Дальнего Востока. Различия в транспортной обеспеченности между субъектами Российской Федерации достигают недопустимого уровня, отмечается в [1].

Транспорт относится к классу «открытых» систем [2, 3]. На системы этого класса существенное влияние оказывает внешняя среда. Именно она определяет правовые взаимоотношения между участниками транспортных процессов, создаёт новые пути сообщения и, самое главное, генерирует потоки грузов и пассажиров. Развитие транспортных систем всегда базируется на некоем прогнозном сценарии. От точности прогнозов прямо зависит экономическая эффективность инвестиций в транспортную отрасль.

Существует значительное число методов прогнозирования. Большинство из них вполне применимо для прогнозирования грузопотоков. Общепризнаны методы прогнозирования временных рядов [4]:

– эконометрические;

– регрессионные;

– методы Бокса–Дженкинса (*ARIMA, ARMA*).

Известны достоинства и недостатки этих методов, но даже наиболее сложные из них опираются на один фактор – временной. Системный анализ внешних связей транспортных систем показывает, что на формирование грузопотоков оказывают влияние значительное количество факторов, а время – лишь удобная для восприятия ось, на которую проецируются влияния. Полностью отказаться от такого подхода нельзя, ведь именно временная ось связывает прошлое через настоящее с будущим, но, однако, следует признать такой подход излишне механистическим.

Прогнозирование объёмов перевозок грузов предлагается осуществлять с использованием методов теории оптимального управления [5] и математической статистики. Объёмы грузов (Q), предъявляемые отправителями к перевозке, колеблются в значительных пределах. На точность прогноза существенное влияние оказывает нелинейный характер зависимости функции от целого ряда факторов, которые могут быть разбиты на несколько групп. В работах [6, 7] рекомендуется с целью снижения вероятности ошибки прогноза описывать зависимость потоков меньшим числом факторов.

При проведении группирования следует объединять сильно коррелирующие друг с другом факторы. К такого рода группам могут быть отнесены:

– технико-технологические факторы (T);

– производственные факторы (P);

– сырьевые факторы (S);

– политические факторы (L);

– баланс торговых отношений (B);

– конъюнктура мирового рынка (K).

Функциональная зависимость может быть представлена в виде

$$Q = f(T, P, S, L, B, K). \qquad (1)$$

С точки зрения теории оптимального управления [8], существует система управления перевозками. Она также может быть отнесена к классу больших систем. Целенаправленное функционирование такого рода систем по своей природе многокритериально, поэтому построение прогнозной модели, учитывающей влияние всех групп факторов, очень сложно, требует длительного сбора информации из большого количества независимых источников. Для практических целей более применимы грубые модели. Так, проведенный в [9]

анализ, позволяет сделать предположение, что при стабильном политическом положении, планомерном развитии экономики нашей страны, соответствующих торговых партнерах и неизменной ситуации на мировом сырьевом рынке для прогнозирования могут быть применены простейшие (наивные) корреляционные модели вида

$$Q = f(T) \quad (2)$$

где T – временной интервал, лет.

Функция $f(T)$ может быть определена путем определения коэффициентов регрессии a_0 и a_1 уравнения вида

$$f(T) = a_0 + a_1 \cdot T \quad (3)$$

Иными словами, простейшие корреляционные модели применимы на временных интервалах, в течение которых не происходит революционных изменений ни по одной из групп факторов. Проверка силы корреляционных связей позволяет получить значение коэффициента корреляции, который характеризует силу взаимосвязи между двумя свойствами. Результаты проверки динамических рядов, приведенных в [9], дали по всей генеральной совокупности в среднем по импорту $k_{корр}$ = 0,97, а по экспорту $k_{корр}$ = 0,96.

Это подтверждает гипотезу о том, что при стабильной экономической и политической ситуации в странах-партнерах объёмы внешнеторговых перевозок имеют тенденцию к росту. Для расчётов по периодам времени, имеющим различные внешнеполитические и внутриэкономические характеристики, зависимость имеет нелинейный характер и требует для описания иных подходов.

По завершении этапа прогнозирования транспортных потоков можно приступать к определению загрузки элементов сети. С этой целью формализуется модель расчёта нагрузки на элементы сети. Пусть i и j грузовые терминалы, осуществляющие соответственно погрузку и выгрузку, причём $i, j \in \{N\}$, где N – множество всех терминалов сети. Тогда, приняв за k индекс номенклатурной группы груза, можно описать многопродуктовую модель стационарных транспортных потоков в форме трёхмерного массива:

$$S_{ijk} = \|S_{ijk}\|, \text{где } i \neq j; i, j \in \overline{1,n}, k \in \overline{1,m}. \quad (4)$$

При рассмотрении однородных транспортных потоков модель можно упростить до двумерного массива:

$$S_{ij} = \|S_{ij}\|, \text{где } i \neq j; i, j \in \overline{1,n}. \quad (5)$$

Параметр k может использоваться для описания принадлежности приватного вагона с использованием соответствующего классификатора. В этом случае, например при решении задачи регулирования парков порожних вагонов, можно легко переходить к обезличенной регулировке, проведя простую транзакцию:

$$S_{ij} = \sum_{k=1}^{m} S_{ijk}, \text{где } i \neq j; i, j \in \overline{1,n}. \quad (6)$$

Под грузопотоком следует понимать перемещение грузовой массы между пунктами отправления и назначения. При их прогнозировании рассматривают какой-то временной отрезок: месяц, квартал, сезон, год и даже более длительные периоды. При этом пульсацией потока пренебрегают, считая его равномерным на весь период прогноза.

Грузопоток реализуется через перевозки, каждая из которых имеет временную привязку. Размер партии груза, перевозимый за одну перевозку, определяет пульсацию потока. Чем крупнее единовременно перевозимая партия, тем она сильнее. Кроме того, перевозка последовательно задействует вершины и рёбра сети, по которым она проходит. При прохождении через элемент сети перевозка сначала его загружает, а затем освобождает.

При прогнозировании грузопотоков следует принять допущения:

- отсутствует пульсация, т. е. поток равномерно изливается из пункта отправления i, следует по рёбрам маршрута и прибывает в пункт назначения j;

- периоды возрастания нагрузки от реализации потока на сеть и затухания пренебрежительно малы по отношению к длине периода прогнозирования, поэтому нагрузка на сеть принимается равномерно распределённой:

$$s_{ijk} = \frac{Q_{ijk}}{T}, \quad (7)$$

где Q_{ijk} – поток груза k, следующий из пункта отправления i в пункт назначения j, за период планирования T.

При продвижении из пункта отправления i в пункт назначения j грузопоток создаёт нагрузку на направленный набор рёбер и вершин сети l_{ij}, расположенных по маршруту следования. Существует уникальный маршрут следования для каждого грузопотока $Q_{ij} > 0$, длина которого минимальна. Тогда для каждого Q_{ij} из всех возможных маршрутов l_{ij} существует

$$L_{ij} = \min \|l_{ij}\|, \text{где } i \neq j. \quad (8)$$

Если известны длины всех существующих рёбер сети, то длину маршрута можно определить

как сумму произведений длин рёбер сети на соответствующие им булевы переменные b_{ij}:

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{при включении ребра в маршрут;} \\ 0, & \text{при исключении из маршрута.} \end{cases} \quad (9)$$

Тогда каждому маршруту L_{ij} будет соответствовать:

$$L_{ij} = \left\| d_{ij} \cdot b_{ij} \right\|, \quad (10)$$

где d_{ij} – рёбра, действительно существующие на сети.

На рис. 1 приведён фрагмент сети, состоящий из трёх вершин {1; 2; 3} и двух рёбер $\{d_{12}; d_{23}\}$. Из фрагмента видно, что не для каждой комбинации i и j существует ребро, их связывающее; например отсутствует ребро d_{13}.

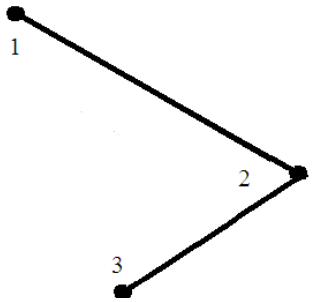


Рис. 1. Фрагмент сети

Для каждого из действительных рёбер можно определить его загрузку, зная все грузопотоки для сети. Существуют также нормированные загрузки, когда к учёту принята лишь часть грузопотоков, например грузы только одной номенклатурной группы. Это удобно при анализе для установления тенденций.

Предложенный подход позволяет аналитически определить потребную пропускную способность для любых фрагментов сети, как простых – вершин и рёбер, так и более сложных – полигонов. В последнем случае пропускная способность определяется по простому элементу полигона, имеющему наибольшую загрузку.

Для иллюстрации предложенного метода определения потребной пропускной способности рёбер и вершин предлагается экспериментальный полигон (рис. 2) из девяти вершин, соединённых двенадцатью рёбрами, над которыми указана их длина в километрах.

Заданы корреспонденции перевозок Q_{ij} в тыс. тонн (табл. 1) между станциями полигона из девяти вершин, соединённых двенадцатью рёбрами.

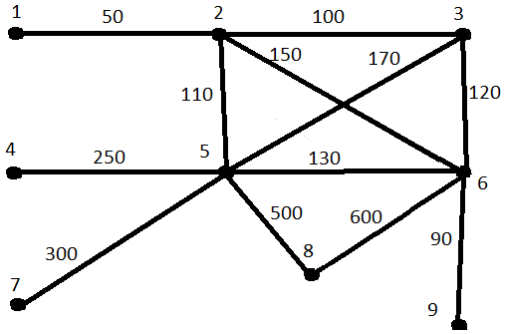


Рис. 2. Экспериментальный полигон

Таблица 1

Матрица корреспонденций грузопотоков Q_{ij}

Из	На									Итого
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1		100	80	40	35	25	15	85	75	**455**
2	20		30	50	40	35	15	10	90	**290**
3	60	15		75	90	65	15	15	80	**415**
4	45	35	90		60	70	80	30	20	**430**
5	15	45	90	90		80	75	65	35	**495**
6	10	75	100	50	40		30	20	15	**340**
7	90	60	75	65	55	45		25	95	**510**
8	80	30	40	50	60	70	80		90	**500**
9	60	10	15	25	65	55	45	35		**310**
Итого	**380**	**370**	**520**	**445**	**445**	**445**	**355**	**285**	**500**	**3 745**

Экспериментальный полигон (рис. 2) на языке модели с помощью булевых переменных b_{ij} описан в табл. 2.

Таблица 2

Матрица действительных рёбер

Из	На								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		1	0	0	0	0	0	0	0
2	1		1	0	1	1	0	0	0
3	0	1		0	1	1	0	0	0
4	0	0	0		1	0	0	0	0
5	0	1	1	1		1	1	1	0
6	0	1	1	0	1		0	1	1
7	0	0	0	0	1	0		0	0
8	0	0	0	0	1	1	0		0
9	0	0	0	0	0	1	0	0	

Матрица действительных рёбер легко преобразуется в матрицу расстояний, которая приведена в табл. 3.

Таблица 3

Матрица расстояний для действительных рёбер d_{ij}

Из	На								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		50							
2	50		100		110	150			
3		100			170	120			
4					250				
5		110	170	250		130	300	500	
6		150	120		130			600	90
7					300				
8					500	600			
9						90			

Построив матрицу оптимальных маршрутов (табл. 4) вида (10) с участием действительных рёбер d_{ij}, несложно рассчитать нагрузку на каждое из рёбер (табл. 5) и вершин (табл. 6) полигона. В матрице оптимальных маршрутов приведены только маршруты L_{ij} для $i < j$, принимается, что $|L_{ji}| = |L_{ij}|$.

Таблица 4

Матрица оптимальных маршрутов L_{ij}

Маршрут		Схема	Длина, км
Наименование			
Из	В		
1	2	l_{12}	50
	3	$l_{12} + l_{23}$	150
	4	$l_{12} + l_{25} + l_{54}$	410
	5	$l_{12} + l_{25}$	160
	6	$l_{12} + l_{26}$	200
	7	$l_{12} + l_{25} + l_{57}$	460
	8	$l_{12} + l_{25} + l_{58}$	660
	9	$l_{12} + l_{26} + l_{69}$	290
2	3	l_{23}	100
	4	$l_{25} + l_{54}$	360
	5	l_{25}	110
	6	l_{26}	150
	7	$l_{25} + l_{57}$	410
	8	$l_{25} + l_{58}$	610
	9	$l_{26} + l_{69}$	240
3	4	$l_{35} + l_{54}$	420
	5	l_{35}	170
	6	l_{36}	120
	7	$l_{35} + l_{57}$	470
	8	$l_{36} + l_{68}$	620
	9	$l_{36} + l_{69}$	210
4	5	l_{45}	250
	6	$l_{45} + l_{56}$	380
	7	$l_{45} + l_{57}$	550
	8	$l_{45} + l_{58}$	750
	9	$l_{45} + l_{56} + l_{69}$	470
5	6	l_{56}	130
	7	l_{57}	300
	8	l_{58}	500
	9	$l_{56} + l_{69}$	220
6	7	$l_{65} + l_{57}$	430
	8	l_{68}	600
	9	$l_{56} + l_{69}$	220
7	8	$l_{75} + l_{58}$	800
	9	$l_{75} + l_{56} + l_{69}$	520
8	9	$l_{86} + l_{69}$	690

Не составляет труда выявить рёбра и вершины сети, испытывающие предельную загрузку. Если соотнести потребную пропускную способность с наличной, то можно через коэффициент использования резерва перерабатывающей (пропускной) способности судить о срочности проведения мероприятий по её усилению.

При известном прогнозе грузопотоков на период планирования можно рассчитать потребную пропускную способность для каждого из элементов сети.

Таблица 5

Нагрузка на рёбра d_{ij}

Из	На								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		455							
2	380		110		290	225			
3		75			195	145			
4					430				
5		400	295	445		345	355	230	
6		155	115		255			55	500
7					510				
8					340	160			
9						310			

Таблица 6

Загрузка вершин полигона

Вершина	Грузопоток			Загрузка
	Исходящий	Входящий	Транзитный	
1	455	380	0	835
2	1 005	1 085	715	2 090
3	415	520	0	935
4	430	445	0	875
5	2 070	2 020	1 575	4 090
6	1 080	1 185	740	2 265
7	510	355	0	865
8	500	285	0	785
9	310	500	0	810

Такой подход позволяет научно обосновывать временную привязку мероприятий по наращиванию мощности сети. Например, рассматривая транспортный коридор, можно составить программу мероприятий по его развитию с оптимизацией инвестиций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Развитие транспортной системы России [Электронный ресурс]: федер. целевая прогр. 2010-2015 гг. (в ред. Постановлений Правительства РФ от 20.05.2008 № 377,от 22.04.2010 № 278, от 12.10.2010, № 828, от 21.12.2010 № 1076, с изм., внесенными Постановлениями Правительства РФ от 21.12.2009 № 1035, от 22.12.2010 № 1088) / Правительство Рос. Федер.. Утв. Постановлением 05.12.2007 № 848. URL : www.dts.tver.ru/TGS/dts/home.nsf/files/word-848.doc/.../848.doc. (Дата обращения 02.10.2012).
2. Лившиц, В.Н. Системный анализ экономических процессов на транспорте. М : Транспорт,1986. 240 с.
3. Бурков В. Н. Основы математической теории активных систем. М : Наука, 1977. 255 с.
4. Аналитические технологии для прогнозирования и анализа данных. Методы прогнозирования [Электронный ресурс] : учебник // URL: http://www.neuroproject.ru/forecasting tutorial. php (Дата обращения 22.10.2012).
5. Основы теории оптимального управления : учеб. пособие для экон. вузов / В. Ф. Кротов, Б. А. Лагоша, С. М. Лобанов [и др.]; под ред. В. Ф. Кротова. М : Высшая школа, 1990. 430 с.
6. Правдин Н. В., Негрей В. Я. Прогнозирование пассажирских потоков: методика, расчёты, примеры. М. : Транспорт, 1980. 22 с.
7. Правдин Н. В., Дыканюк М.Л., Негрей В.Я. Прогнозирование грузовых потоков. М. : Транспорт, 1987. 247 с.
8. Оптимизация планирования и управления транспортными системами / Е. М. Васильева, Р. В. Игудин, В. Н. Лившиц [и др.]; под ред. В. Н. Лившица. М. : Транспорт. 1987. 208 с.
9. Железнов Д. В., Светлакова Е. Н., Долгополова М. А. Создание логистического центра по переработке скоропортящихся грузов на станции Забайкальск // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2006. №4. С. 204–207.

УДК 332.01

Сольская Ирина Юрьевна,
д. э. н., профессор, проректор по ДПО,
директор Института ДПО, Иркутский государственный университет путей сообщения,
e-mail: irina_solskaya_@mail.ru
Потапкина Мария Александровна,
к. э. н., старший преподаватель кафедры «Финансовый менеджмент»
Байкальская международная бизнес-школа,
Иркутский государственный университет,
тел.: 89501455138, *e-mail: mpotapkina@gmail.com*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЛОБАЛЬНЫХ РИСКОВ РЫНОЧНОЙ КОНЪЮНКТУРЫ НА ИНВЕСТИЦИОННУЮ АКТИВНОСТЬ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ

I.Y. Sol'skaya, M.A. Potapkina

RESEARCH OF INFLUENCE OF GLOBAL RISKS OF MARKET CONDITIONS ON INVESTMENT ACTIVITY OF THE IRKUTSK REGION

Аннотация. *В связи с явлением глобализации проблема влияния стадии развития мировой экономики на развитие локальной экономики является довольно актуальной. Связано это с увеличением частоты финансовых кризисов, с которыми сталкиваются мировая и, как следствие, региональная экономика. По этой причине насущной является задача анализа глобальных мировых рисков и степени их влияния на деятельность отдельно взятого региона, в частности Иркутской области. Описаны ключевые глобальные риски по пяти основным категориям, определено их влияние на Иркутскую область, особенно на те направления экономической деятельности, которые формируют валовой региональный продукт области. Сделан вывод о необходимости учета глобальных рисков при формировании стратегии развития области и, в частности, предприятий, функционирующих на ее территории.*

Ключевые слова: *глобальные риски, риски Иркутской области, валовой региональный продукт*

Abstract. *Because of globalization the problem of world economy influence on local economy demands high attention. The reason is raise of the number of financial crises which world economy faces and, as a result, the economy of the region faces, too. Because of that, the problem of analyzing global risks and their influence on functioning of a specific region, in particular, Irkutsk region becomes a hot topic to discuss. In this article, key global risks are described according to main categories, theirs influence on Irkutsk region, especially on those economic activities, which creates gross regional product of the region are defined. Finally, there is a conclusion that global risks influence significantly local economy and should be considered while creating development strategy of the region, and, in particular, strategies of the companies functioning there.*

Keywords: *global risks, Irkutsk region risks, gross regional product.*

Понятие глобализации экономики и жизни общества стало очень актуальным на сегодняшний день. Решили отдохнуть за рубежом,– зачем пользоваться услугами местных компаний, когда представители зарубежных туристических операторов, говорящие на русском языке, помогут вам в подборе недорогого тура именно с теми условиями, которые вы хотите, и предложат тот уровень сервиса, который вы ожидаете? Оплатить обучение в зарубежном университете можно, используя карту Visa российского банка, а консультацию по вопросам оплаты и прихода денежных средств можно получить в университете, позвонив консультанту, легко разговаривающему на русском языке. Нужны ли еще примеры, показывающие, что мы живем теперь в глобально-зависимом мире, где небольшие изменения в одной географической точке оказывают влияние на функционирование компаний, жизнь людей в другом географическом пространстве? Имеет ли смысл также повторяться, что и глобальные риски наверняка будут оказывать влияние на деятельность предприятий регионального масштаба? В данной статье исследуется, какие глобальные риски 2012 г. оказывают существенное влияние на предприятия и жителей Иркутской области. Анализ проводится с использованием методов, апробированных Ассоциацией европейских риск-менеджеров, на основе таких стан-

дартов по управлению рисками как COSO и FERMA.

Иркутская область играет немаловажную роль в развитии нашей страны. По ВВП на душу населения она занимает 20-е место среди 83 субъектов Федерации, численность населения в 2012 г. составляет 2,4 млн человек.

Для анализа видов экономической деятельности в Иркутской области воспользуемся данными по валовому региональному продукту за 2010 год [6].

Транспорт и связь занимают наибольшую долю в ВРП Иркутской области (22,9 %). На втором месте по вкладу в ВРП находятся обрабатывающие производства (16,8 %). На третьем месте – оптовая и розничная торговля (10,7 %). На четвертом – добыча полезных ископаемых (7,6 %), на пятом – производство и распределение электроэнергии, газа и воды (7,3 %).

В данной статье под риском будем понимать следствие воздействия неопределенности на цели функционирования, которое может быть положительным, отрицательным или отклонением от ожидаемого [ISO 3100].

В отчете о глобальных рисках 2012 [2], подготовленном к Всемирному экономическому форуму, выделены пять основных категорий рисков: экономические, геополитические, риски, связанные с окружающей средой, социальные риски и технологические риски. Перейдем к анализу влияния глобальных рисков на ВРП Иркутской области. Рассмотрим первую группу глобальных рисков – экономические риски [2]:

- хронические налогово-бюджетные диспропорции;
- большие неравенства в доходах;
- экстремальная волатильность цен на энергию и сельскохозяйственную продукцию;
- крупные систематические финансовые кризисы;
- растущий кризис ликвидности.

Каким образом данные риски оказывают влияние на пять ключевых видов экономической деятельности области? Надо сказать, что наиболее актуальными из вышеперечисленных экономических рисков будут являться крупные систематические финансовые кризисы и, как следствие, рост кризиса ликвидности, хронические налогово-бюджетные диспропорции, а также экстремальная волатильность цен на энергию и сельскохозяйственную продукцию. Показательным примером воздействия финансового кризиса и кризиса ликвидности для Иркутской области стал кризис 2008 г. Как результат, местные банки столкнулись с отсутствием лимитов на счетах или денежных средств. В свою очередь, предприятия были вынуждены заморозить часть проектов, которые финансировались за счет заемных средств. Что касается глобальных диспропорций, то они дают о себе знать и на уровне бюджета области, который на сегодняшний день является дефицитным. Получается, что те денежные средства, которые область тратит сегодня, расходуются из «фондов будущего поколения». Наконец, волатильность в ценах на энергию и сельскохозяйственную продукцию – это наиболее актуальный риск для Иркутской области, поскольку цены на энергию определяют стоимость всей остальной производимой в области продукции. В Иркутской области функционируют четыре гидроэлектростанции:

- Иркутская;
- Братская;
- Усть-Илимская;
- Мамаканская.

На территории Иркутской области общие потенциальные запасы гидроэнергетических ресурсов оцениваются в 200–250 млрд. кВт/ч в год, в том числе технически возможных к использованию – примерно в 190 млрд. кВт/ч в год [4]. Местные компании при установлении цен на энергию ориентируются в том числе на цены по России в целом и за ее пределами. Поэтому высокая степень волатильности цен на энергию в мире будет оказывать влияние на цены на местном уровне. На втором месте по вкладу в ВРП находятся обрабатывающие производства, цена на продукцию которых напрямую зависит от цен на энергию.

Волатильность цен на сельскохозяйственную продукцию взаимосвязана с третьей позицией, формирующей наш валовой региональный продукт – оптовой и розничной торговлей. Известно, что около 40 % продаваемой продукции в области привозится из-за рубежа. Повышение цен на продукцию, ввезенную к нам, может привести к росту цен на продовольственные товары в области и снижению рентабельности производства.

Перейдем к анализу второй группы рисков – геополитические риски. К основным рискам данной группы были отнесены [2]:

- терроризм;
- распространение оружия массового поражения;
- всепроникающая коррупция;
- проблемы мирового регулирования;
- проблемы в области дипломатического урегулирования конфликтов.

Выберем те риски, которые могут потенциально оказывать существенное влияние на Иркутскую область. Прежде всего это всепроникающая коррупция и проблемы, связанные с возможно-

стью дипломатического урегулирования конфликтов. По оценкам Transparency International, Россия занимает 143-ю позицию в рейтинге из 183 по уровню проникновения коррупции во все эшелоны власти [1]. Сегодня Россия, в частности регионы, отличается высоким уровнем коррупции, что увеличивает издержки при ведении бизнеса, уменьшает его рентабельность, а также повышает риски рейдерского захвата бизнеса. Что касается урегулирования конфликтов, в первую очередь, следует проанализировать отношения Иркутской области соседями: Красноярским краем, Якутией, Забайкальским краем, Бурятией и Тувой. Надо заметить, что Иркутская область не замечена в недружелюбном урегулировании споров со своими соседями в прошлые периоды, что маловероятно и для будущих периодов.

Проанализируем риски третьей группы – риски, связанные с воздействием окружающей среды [2]:

- рост выбросов парниковых газов;
- неспособность адаптироваться к климатическим изменениям;
- неспособность эффективно использовать запасы воды и земли;
- малоуправляемый процесс урбанизации;
- бактерии, не подлежащие воздействию антибиотиков.

Надо признать, что риски данной категории будут являться актуальными практически для всех областей Российской Федерации в большей или меньшей степени в зависимости от специфики региона. Процесс изменения климата можно наблюдать как на глобальном уровне, так и на локальном. Так, в Иркутской области стоит отметить затянувшийся зимний период и укоротившийся летний. В этой связи уменьшается доступное время как для посевных мероприятий, так и для мероприятий по взращивание и уборке культур.

Рассмотрим, социальные риски [2]:

- кризис обеспеченности водой;
- кризис нехватки продовольствия;
- нерациональный рост населения;
- рост религиозного фанатизма;
- плохо управляемый процесс старения населения;
- неблагоприятная реакция на глобализацию.

Бесспорно, что все выделенные риски оказывают влияние на жителей Иркутской области. Но кризис обеспеченности водой нам не столь актуален, как, например, нерациональный рост населения, связанный с перемещением наших соседей в Иркутскую область. Последнее время данная тенденция особенно проявилась в связи с использованием недорогого неквалифицированного труда (который в большинстве случаев обеспечивается выходцами из Азиатского и Южного регионов) для строительства объектов.

Проанализируем риски, включенные в пятую группу – технологические риски. К ним отнесены [2]:

- кибератаки;
- несостоятельность систем;
- массивное мошенничество и воровство информации;
- ресурсы полезных ископаемых проблемы, уязвимость в снабжении;
- массивная цифровая дезинформация.

Технологические риски затрагивают все сферы деятельности, все перечисленные виды экономической активности в Иркутской области. Несостоятельность систем и кибератаки приводят к массивному мошенничеству, а также к воровству информации. Рост пользователей Интернета, банковских карт для оплаты через Интернет, рост туристического потока за пределы области ведут к усилению вероятности технологических рисков и росту возможного ущерба от них.

Согласно исследованию компании Ernst & Young [3], Иркутская область является благополучной по ряду показателей условий ведения бизнеса. В данном исследовании изучались следующие факторы, определяющие бизнес-климат в области:

- инфраструктура;
- регулирование, налоги и лицензирование;
- коррупция;
- преступность, теневая деятельность, работа судов (является незначительным и умеренным препятствием);
- доступность финансирования в регионе (является незначительным и умеренным препятствием);
- инновации и трудовые ресурсы.

По результатам данного исследования, инфраструктура, в частности электроснабжение, является умеренным препятствием для ведения бизнеса. Регулирование и проверки – умеренным препятствием. Коррупция – актуальное явление при ведении бизнеса в области. Остальные факторы являются незначительными или умеренными препятствиями. В качестве ощутимых барьеров ведения бизнеса определены [3]:

- ставка налогообложения (33 %);
- доступ к финансированию (16 %);
- политическая нестабильность (8 %);
- конкуренция, теневой сектор;
- получение лицензий;
- трудовое законодательство;
- преступность;
- недостаточная подготовка сотрудников;
- коррупция.

Обобщая полученные выше данные, можем сделать вывод о том, что глобальные риски оказывают влияние на Иркутскую область, людей, проживающих на ее территории, предприятия, ведущих хозяйственную деятельность. При этом часть глобальных рисков проявляется в виде барьеров для ведения бизнеса в области (как это отмечено в исследовании компании Ersnt & Young), а часть может стать глобальными преимуществами функционирования Иркутской области (кризис обеспеченности водой в других частях мира может быть частично решен с помощью водных артерий области). В этой связи важно учитывать глобальные риски при составлении стратегий развития Иркутской области на среднесрочную и долгосрочную перспективу, что позволит повысить качество жизни в области.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Глобальная коалиция против коррупции [Электронный ресурс] : Transparency International. URL: http://www.transparency. org/country#RUS (Дата обращения 22.05.2012).
2. Исследование World Economic Forum. Global risks report 2012 (7th ed.). [Электронный ресурс]. URL: http://www. weforum.org/reports/global-risks-2012-seventh-edition (Дата обращения 22.05.2012).
3. Измерение условий ведения бизнеса в российских регионах [Электронный ресурс] : отчет о корпорат. ответственности. Февраль, 2011 г / Ernst&Young. URL: http://www.ey.com/ Publication/vwLUAssets/BEEPS-BOOK-2011-RU/$File/BEEPS-BOOK-2011-RU.pdf. (Дата обращения 20.05.2012).
4. Официальный портал Иркутской области [Электронный ресурс]. URL: http://www.irkobl.ru/irk/ (Дата обращения 25.05.2012).
5. Стандарт по управлению рисками – ISO31000 [Электронный ресурс]. URL: http://sherq.org/31000.pdf (Дата обращения 26.05.2012).
6. Территориальный орган федеральной службы государственной статистики по Иркутской области [Электронный ресурс]. URL: http://irkutskstat.gks.ru/digital/region14/ DocLib/vrp2007-2009.htm (Дата обращения 27.05.2012).

УДК 338.5

Паршута Анна Александровна
аспирант, кафедра ФиАР, Иркутский государственный университет путей сообщения ,
тел.: 89501103629, e-mail: lucenko-a@inbox.ru

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОДАЖНОЙ ЦЕНЫ НА ТРАНСПОРТНО-ЭКСПЕДИЦИОННЫЕ УСЛУГИ

A.A. Parshuta

TRANSPORT-EXPEDITIONARY SERVICE SAVING-PRICE FORMATION

Аннотация. *Рассмотрены проблемы формирования продажной цены на транспортно-экспедиционные услуги, актуальные для текущего состояния рынка. На сегодняшний момент не существует точных методик и рекомендаций для частных транспортно-экспедиционных компаний по калькуляции себестоимости и формированию продажных цен. Пути решения проблемы, по мнению автора, заключаются в организации качественного управленческого учета, учета специфики производственной деятельности и скрытых косвенных расходов.*

Ключевые слова: *транспортно-экспедиционные услуги, экспедитор, клиент, договор транспортной экспедиции, груз, грузоотправитель, грузополучатель, перевозчик.*

Abstract. *The problem of the saving-price formation in the transport-expeditionary service is urgent for the current state of the market. Nowadays, there are no definite methods and recommendations on costing and saving price formation for private transport expeditionary companies. As the author supposed the ways of solving the problem are in the organization of high-quality management account, taking into account specific character of activity and hidden indirect costs.*

Keywords: *forwarding services, forwarding agent, dispatcher, forwarder, client, customer, freight forwarding agreement, freight, cargo, good, weight, consignor, freighter, consignee, receiver.*

В современных условиях рынка транспортно-экспедиционных услуг перед организацией встает вопрос: как правильно рассчитать себестоимость перевозки по заданному направлению и составить клиентский прайс на оказываемые услуги. К сожалению, большинство компаний, функционирующих в сфере транспортно-экспедиционного обслуживания грузов, подходят к определению этих важных показателей по инерции, в соответствии с рыночной конъюнктурой, а зачастую определяют ценовую политику с позиции «пусть лучше клиент воспользуется услугами нашей компании, даже если перевозка заведомо убыточна, чем услугами конкурентов». Излишне говорить о том, что такой подход в ценовой политике ошибочен, и в конечном итоге приводит к снижению рентабельности, а в некоторых случаях к убыточности всей деятельности организации. Оценить этот убыток при слабой организации ведения бухгалтерского и управленческого учета получается не сразу.

Дадим основные понятия транспортно-экспедиционной деятельности.

Под транспортно-экспедиционными услугами в соответствии с Федеральным законом от 30 июня 2003 г. №87-ФЗ «О транспортно-экспедиционной деятельности» понимается совокупность услуг по осуществлению перевозок грузов, а именно: услуги по организации перевозки грузов, заключение договоров перевозки грузов, обеспечение отправки и получения груза, а также иные услуги, связанные с перевозкой грузов

Экспедитор – лицо, выполняющее или организующее выполнение определенных договором транспортной экспедиции транспортно-экспедиционных услуг.

Клиент – лицо, заключившее с экспедитором договор транспортной экспедиции и принявшее на себя обязательства об оплате расходов экспедитора и причитающегося экспедитору вознаграждения.

Договор транспортной экспедиции – гражданско-правовая сделка, в соответствии с которой одна сторона (экспедитор) за вознаграждение принимает на себя обязательства по поручению и за счет другой стороны (клиента) оказать транспортно-экспедиционные услуги.

Груз – предмет (вещь, партия) принятый к перевозке, в отношении которого экспедитор осуществляет организацию перевозки в соответствии с договором транспортной экспедиции.

Грузоотправитель – лицо, предъявившее груз к перевозке.

Грузополучатель – лицо, уполномоченное принять груз у экспедитора после окончания перевозки.

Перевозчик – лицо, осуществляющее транспортировку груза на основе договора перевозки.

Основополагающим документом, регламентирующим деятельность по оказанию транспортно-экспедиционных услуг в Российской Федерации, является Федеральный закон «О транспортно-экспедиционной деятельности» от 30 июня 2003 г. №87-ФЗ. До принятия ФЗ транспортно-экспедиционная деятельность регулировалась ГК РФ, гл. 41 «Транспортная экспедиция». Принятый ФЗ не противоречит гл. 41 ГК РФ, а более детально прорабатывает комплекс экономических отношений по организации перевозки грузов, в частности в вопросе оформления договорных отношений. Правильно составленный прайс, учитывающий все требования ФЗ «О транспортно-экспедиционной деятельности», отражающий экономическую составляющую ведения бизнеса транспортной компанией, может стать полноценным приложением к договору транспортной экспедиции.

Рассмотрим типовой вариант перевозки груза в сборном крытом вагоне по маршруту Москва–Иркутск и рассчитаем стоимость данной услуги.

Основными этапами перевозки являются:

1. Прием и обработка заявки от грузоотправителя в пункте отправления.
2. Хранение груза в терминале отправления (при необходимости).
3. Работы по подготовке груза к транспортировке.
4. Погрузо-разгрузочные работы в пункте отправления.
5. Оформление и передача вагона перевозчику (например, ОАО «РЖД»).
6. Период транспортировки груза по маршруту Москва–Иркутск.
7. Подача вагона на ж.-д. пути транспортно-экспедиционной компании.
8. Погрузо-разгрузочные работы в пункте назначения (работа терминала).
9. Выдача груза грузополучателю либо дальнейшая транспортировка «до двери» автомобильным транспортом.

Каждый этап включает одни и те же элементы затрат с разной структурой себестоимости, которые в дальнейшем формируют общую себестоимость и продажную цену услуги.

Транспортно-экспедиционные услуги как вид экономической деятельности имеет совершенно определенную специфику, характерную абсолютно для любого предприятия, работающего в этом секторе экономики. Эта особенность позволяет

говорить о структуре затрат, а в дальнейшем дать им количественную оценку.

Прием и обработка заявки в пункте отправления заключается в основном в работе персонала транспортной организации (офисная работа), когда с грузоотправителем обсуждаются основные характеристики груза, возможные особенности транспортировки и пр.

Однако нередко требуется оказать дополнительные услуги – например, доставку груза со склада грузоотправителя до станции погрузки.

Транспортно-экспедиционные компании, как правило, стараются осуществить погрузку груза напрямую из автомобиля в вагон, минуя склад.

Это существенно снижает затраты по грузовым операциям. Однако такая возможность есть не у всех транспортников, т. к. для такой работы необходим постоянный поток грузов, достаточный для выполнения плана погрузки хотя бы одного вагона в сутки, поэтому более мелкие компании вынуждены работать через склад, что отрицательно сказывается на качестве услуги как по срокам, так и по сохранности груза. Низкое качество фирменной упаковки груза требует дополнительной подготовки груза к транспортировке, чаще всего требуется жесткая обрешетка для ценных и хрупких грузов, гидроизоляция, утепление в зимний период. Транспортная компания также маркирует грузы при погрузке, чтобы оперативно разделить партии однородных грузов при выгрузке.

Погрузочные операции осуществляются специализированной техникой. Наличие грузовых пандусов на погрузочный площадке также упрощает процесс погрузки. Некоторые тарно-штучные грузы часто приходится грузить вручную, что создает дополнительные затраты по оплате труда погрузо-разгрузочной бригады.

На этапе оформления грузов, погруженных в вагон к перевозке, важно отметить работы по выбору вагона. Есть 2 способа перевозки: в вагоне – собственности ОАО «РЖД», либо в вагоне – собственности оператора ПС.

При одинаковой тоннажности объем вагона собственность ОАО «РЖД» составляет 120 м^3, при этом операторы подвижного состава предоставляют в пользование вагоны большего объема 138 м^3 и 158 м^3, а также цельнометаллические грузовые вагоны (ЦМГВ) объемом до 250 м^3. Проведем сравнение цены перевозки 1 м^3 в разном по объему подвижном составе (табл. 1).

Из расчета видно, что перевозить груз в больших вагонах выгоднее, однако такие вагоны более дефицитны, поэтому транспортникам приходится находить оптимальный баланс по загруженности вагонов, определяя для себя средний показатель цены перевозки 1 м^3, позволяющий нормировать среднюю цену перевозки в заданном диапазоне грузоподъемности.

Таблица 1

Объем вагона	Провозная плата, с НДС, руб.	Плата за пользование вагоном с НДС, руб.	Всего за перевозку, руб.	Цена за перевозку 1 м^3
КВ 120 м^3	246923	0	246923	2509
КВ 138 м^3	161165	79000	240165	1740
КВ 158 м^3	161165	90000	251165	1589
ЦМГВ	161165	140000	301165	1204

Основными потребителями транспортно-экспедиционных услуг выступают мелкие и средние предприятия торговли и сферы обслуживания. Груз, как правило, относится к 3-му классу по прейскуранту 10-01, большинство грузов легковесные, поэтому в среднем использование вагона любого объема, при полной загрузке, по грузоподъемности не превышает установленного порога в 68 000 кг брутто.

Отдельно стоит выделить этап транспортировки груза по маршруту Москва–Иркутск. Норматив, установленный ОАО «РЖД», составляет для крытого вагона 16 суток, на практике фактическое время в пути составляет от 12 до 16 суток.

Для транспортной компании этот этап оказания услуги важен еще и тем, что наиболее сложен с точки зрения финансовых затрат. В ст. 801 ГК РФ сказано, что транспортно-экспедиционная услуга оказывается по поручению и за счет грузовладельца, однако не стоит понимать эту формулировку буквально.

Экономические реалии кризиса 2008 г. показали, что сохранить высокий уровень продаж смогли только те компании, которые смогли кредитовать своих клиентов на весь период транспортно-экспедиционного обслуживания груза и даже предоставить дополнительную отсрочку платежа после подписания акта об оказанных услугах. Поэтому при калькуляции затрат, формировании продажной цены на комплекс транспортно-экспедиционного обслуживания груза транспортникам обязательно нужно учитывать в составе затрат стоимость заемного капитала, используемого на покрытие кассовых разрывов. Допустим, что погрузо-разгрузочные работы оплачиваются организацией из собственных оборотных средств, а затраты на перевозку финансируются из заемных

источников. Т. к. период заимствования краткосрочный, то самой приемлемой схемой заимствования может быть краткосрочное кредитование расчетного счета – овердрафт, тем более что ставки по таким кредитам ниже, чем по аналогичным продуктам бизнес-кредитования, и составляет в среднем от 10 % до 14 % годовых. Если организации требуется транш овердрафта для отправки вагона объемом 158 м^3 с затратами на оплату провозного тарифа и ставки за пользование вагоном в размере 251 165,58 руб., а период предоставления займа в соответствии с фактическим временем в пути составит 14 дней, то стоимость заимствования составит (по ставке 11 % годовых) 75,35 руб. Сумма не кажется критичной, однако при отсутствии действенного контроля за дебиторской задолженностью период ее оборачиваемости в днях может существенного превышать установленный нормативный срок доставки груза (например, на срок предоставленной по договору отсрочки платежа). Также при оценке текущей ситуации необходимо учитывать тот факт, что клиенты не всегда финансово дисциплинированны и будут нарушать требования договора по срокам оплаты. Существенное влияние на сроки кредитования оказывает изменение структуры клиентской базы.

С точки зрения качества оказания транспортно-экспедиционной услуги разгрузка грузов на собственном или арендованном железнодорожном тупике гораздо эффективнее разгрузки на путях общего пользования. К плюсам разгрузки на собственном (арендованном ж.-д. тупике) относятся: 1) отсутствие очередей, 2) удобство расположение погрузо-разгрузочных мощностей, 3) организация складской логистики, 4) безопасность, 5) организация фирменного обслуживания и пр. К минусам: 1) дополнительные затраты на аренду погрузо-разгрузочной площадки, 2) дополнительные станционные сборы, 3) увеличенные сроки подачи-уборки вагонов на ж. д. тупик.

Разгрузочные операции на станции назначения фактически не отличаются от аналогичных операций с грузом на станции отправления. Транспортной компании также выгодно осуществить выдачу груза из вагона в автотранспорт клиента, избегая хранения груза на складах (двойные грузовые операции).

При желании грузополучателя получить услугу «до двери» для транспортной компании встает вопрос об организации автотранспортной логистики, которая заключается в доставке необходимого объема грузов наименьшим парком автомобилей. Вообще проблема качественной организации автотранспортного обслуживания в России стоит особняком. Практически не осталось специализированных автотранспортных предприятий, и транспортно-экспедиционным компаниям приходится решать для себя дилемму: либо организовывать в собственной структуре специализированное подразделение (автобазу), либо привлекать к перевозке частных перевозчиков – физических или юридических лиц. Если с юридическими лицами ответственность за перевозку можно оговорить в договоре, то физические лица даже при наличии грамотно составленного договора часто избегают ответственности за ущерб, причиненный вследствие некачественного оказания автотранспортной услуги, грубого нарушения установленных правил перевозки грузов. Все это негативно сказывается на качестве всей услуги, и способно свести на ноль даже идеально организованную перевозку по железной дороге.

Укрупненно затраты транспортно-экспедиционной компании можно разделить в соответствии с этапами и местом (территориально) оказания услуг:

–коммерческие расходы на обработку заявки (пункт отправления);

–затраты на погрузку груза (пункт отправления);

–затраты на организацию перевозочного процесса;

–коммерческие расходы, связанные с выдачей груза (пункт назначения);

–затраты на разгрузку груза (пункт назначения).

Для простоты расчетов объем работы транспортно-экспедиционной компании примем 1 вагон в сутки в течение рабочей недели или 158 м3 × 5 дн. × 21 р. дн./мес. = 16 590 м^3 в мес. Примем производительность труда 1 менеджера по продажам равной 3 000 м^3 в месяц. Таким образом, потребный штат сотрудников, занятых приемкой заявок от клиентов составит 6 единиц. Примем среднемесячную заработную плату сотрудника равной 20 000 рублей.

Коммерческие расходы на обработку заявки можно скалькулировать следующим образом:

- затраты на оплату труда административного персонала, связанного с организацией продаж;
- взносы во внебюджетные фонды, отчисляемые с фонда оплаты труда;
- прочие расходы, связанные с оплатой труда;
- общепроизводственные и общехозяйственные расходы.

Общие затраты на организацию работы одного менеджера продаж составят 26 800 руб. в месяц. Затраты на содержание всего штата – 160 800 руб. Примем норматив общепроизводственных и общехозяйственных расходов 70 % от

ФОТ, что составит 84 000 руб. Общая сумма коммерческих расходов на обработку заявок от грузовладельцев составит – 244 800 руб. или 11 657,14 руб. на 1 вагон (из условия, что 1 вагон грузится в 1 сутки). Затраты на погрузку груза калькулируются исходя из затрат на организацию погрузочного процесса:

1. Затраты на оплату труда производственного персонала, связанного с грузовыми работами.
2. Взносы во внебюджетные фонды, отчисляемые с фонда оплаты труда.
3. Прочие расходы, связанные с оплатой труда.
4. Расходы на материалы.
5. Амортизационные отчисления.
6. Станционные сборы.
7. Общепроизводственные и общехозяйственные расходы.

Бригада, занятая погрузкой груза в вагон, состоит из: 1) мастера погрузки, 2) 4 грузчиков, 3) машиниста автопогрузчика. Заработная плата, как правило, начисляется сдельно от количества погруженных вагонов (табл. 2).

Таблица 2

Состав бригады	Сдельная ставка за 1 вагон, руб.	Отчисления во внеб. фонды, руб.
Мастер погрузки	2000	628
Бригада грузчиков (4 чел.)	4000	1364
Машинист автопогрузчика	150	471
Итого:	7500	2463

Суммарные затраты на организацию труда погрузочной бригады составят 9963,00 руб. за 1 вагон.

Для качественной погрузки грузов в вагон необходим погрузочный реквизит (табл. 3).

Таблица 3

Вид материалов	Норматив	Стоимость, руб.
Упаковочный материал	15 листов картона, 10 досок	2750
ЗПУ	2 шт. на вагон	700
ГСМ (бензин)	при нормативе 3 л/м·ч и 8-часовой работе	600
Итого		4050

Примем ежемесячную амортизацию автопогрузчика и прочего грузового оборудование равной 12 000,00 руб., что составит 571,43 руб. на вагон.

Допустим, что транспортная компания арендует погрузо-разгрузочную площадку, т. е. является контрагентом собственника ж.-д. тупика, поэтому стоимость подачи-уборки 1 вагона примем равной 5 000 руб.

Примем норматив общепроизводственных и общехозяйственных расходов 40 % от ФОТ, что составит 3 000 руб.

Общие затраты на погрузку груза составят 22 584,43 руб.

Как уже отмечалось выше, затраты на организацию перевозочного процесса в первую очередь связаны с оптимальным подбором подвижного состава.

Рассчитаем провозную плату (железнодорожный тариф) для сборного груза 3-го класса с повышенным коэффициентом 1,54 по схеме 8 (Прейскурант 10-01 р. 2)

Прямой маршрут: Москва-Товарная-Рязанская – Иркутск-Пассажирский (5032 км). Провозная плата составит 127 532 руб, охрана груза в пути следования – 9 049 руб. Итого 136 581 руб. без НДС. Плата за предоставление вагона ОАО «Первая грузовая компания» по такому маршруту составит 76 271 руб. без НДС. Суммарные затраты на организацию перевозочного процесса составят 212 852 руб.

Примем коммерческие расходы по организации выдачи груза и расходы, связанные с разгрузкой грузов (за минусом затрат на упаковку), равными аналогичным операциям по погрузке; произведем окончательную калькуляцию себестоимости транспортно-экспедиционной услуги и рассчитаем продажную стоимость услуги (табл. 4).

Конечно, транспортная компания при определении цена на услуги самостоятельно решает, каким путем пойти: ориентироваться на прайс конкурентов и работать от оборота денежных средств или подойти к решению вопроса с точки зрения экономической ситуации в организации, особенностей ведения хозяйственной деятельности.

Не исключен вариант, когда просчитанная себестоимость превысит сложившиеся на рынке цены, в таком случае нужно либо искать просчеты в методике, либо корректировать затраты. В любом случае ясное понимание реальной ситуации поможет в принятии верных, а самое главное, своевременных управленческих решений.

Таблица 4

Затраты в соответствии с этапом оказания услуги, руб.	Величина затрат на 1 вагон, руб.	Норма загрузки, $м^3$	Величина затрат на 1 м3, руб.
Коммерческие расходы при обработке заявки	11657	158	74
Затраты на погрузку груза	22584		143
Затраты на организацию перевозки	212852		1347
Коммерческие расходы при выдаче груза	11657		74
Затраты на разгрузку груза	19834		126
Итого:	278585		1763
Вознаграждение экспедитора 15%			265
НДС 18%			365
Продажная стоимость			2393

Ниже представлен перечень факторов, которые, на взгляд автора статьи, чаще всего упускаются транспортниками при расчете цен за транспортно-экспедиционные услуги:

1. Оценка структуры оборотного капитала и стоимости заемного капитала, направляемого на финансирование дефицита оборотных средств.

2. Перечень объемных и качественных показателей, их нормирование.

3. Доля общепроизводственных и общехозяйственных расходов в составе себестоимости и способы их оценки.

4. Особенности ведения финансово-хозяйственной деятельности и технологии производственного процесса.

Необходимо также отметить, что организация такой деятельности, как транспортно-экспедиционное обслуживание, требует ведения управленческого учета для получения оперативной информации обо всех текущих изменениях, способных повлечь за собой изменения себестоимости услуги, т. к. организация бухгалтерского учета в российских организациях не дает такой возможности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Смехов А. А. Основы транспортной логистики : учеб. для вузов. М. : Транспорт, 1995. 197 с.
2. Сханова С. Э., Попова О. В., Горев А. Э. Транспортно-экспедиционное обслуживание : учеб. пособие. М.: Академия, 2005.
3. Ярошевич В. П., Шкурин М. И. Совершенствование системы транспортного обслуживания предприятий и организаций // Актуальные проблемы эффективности технологических процессов и транспортных систем. Гомель, 1991. С. 17–18.
4. Шкурин М. И. Маркетинг на транспорте : учеб. пособие для студ. транспортных спец. вузов. Гомель, 2003. 223 с.
5. Плужников К. И. Транспортное экспедирование. М. : РосКонсульт, 1999. 576 с.
6. Дейли Дж. Эффективное ценообразование - основа конкурентного преимущества = Pricing for Profitability: Activity-Based Pricing for Competitive Advantage. М. : Вильямс, 2003. С. 304.
7. Соколов В. Транспортно-экспедиционная компания. Бюджет и ценообразование [Электронный журн.] // Логинфо 2006. № 12(98). - http://loginfo.ru/ (Дата обращения 22.08.2012).
8. Парций Я. Е. Постатейный комментарий к Федеральному закону «О транспортно-экспедиционной деятельности».

УДК 147

Осипов Василий Евдокимович,
д. филос. н., профессор, профессор кафедры «Философия и социальные науки» ИрГУПС
Васенкин Алексей Вадимович,
аспирант кафедры «Философия и социальные науки», ИрГУПС,
e-mail: alvasenkin@rambler.ru

СИСТЕМА СОЦИАЛЬНО-ЭТИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ ТЕХНОНАУКИ

V.E. Osipov, A.V. Vasenkin

SYSTEM OF THE SOCIAL AND ETHICAL BASES OF TECHNOSCIENCE

Аннотация. *Рассмотрена система социально-этических оснований технонауки: ответственность, коэволюция, ненасилие, предосторожность, этос науки. Обоснована актуальность системного подхода в трактовке социально-этических принципов современной научно-технической деятельности.*

Ключевые слова: *технонаука, этос науки, социально-этический принцип, научно-технический прогресс, ответственность, ненасилие, коэволюция, предосторожность, социальная оценка техники.*

Abstract. *The system of the social and ethical bases of technoscience is considered: responsibility, koevolution, non-violence, precaution, sciences ethos. The urgency of a system approach in treatment of social ethical principles of modern scientific and technical activity is proved.*

Keywords: *technoscience, ethos of sciences, social ethical principle, scientific and technical progress, responsibility, non-violence, koevolution, precaution, social assessment of equipment.*

Современную научно-техническую революцию характеризуют исследовательские программы, которые направлены на расширение и получение новых знаний в области нанотехнологий, биомедицины, генной инженерии, кибернетики, информатики. Существование данных типов исследований позволяет сделать вывод о том, что человечество столкнулось с новым этапом научно-технического прогресса, с новой научной силой – технонаукой. На технонауку как совокупность различных современных технологий возлагают большие надежды, однако, несмотря на все положительные стороны, за успехами современных научных исследований кроется множество проблем социально-этического характера, которые человечеству необходимо будет разрешить для того, чтобы перейти к бескризисному развитию. Эти проблемы напрямую не связаны со спецификой научно-технической деятельности, однако имеют к ней непосредственное отношение, и их разрешение позволит, на наш взгляд, своевременно установить и снизить вероятность возникновения отрицательных последствий внедрения новых технологий. В настоящее время уже существуют конкретные примеры регулирования научно-технического прогресса, однако на этапе становления технонауки созревает потребность в упорядочивании имеющихся знаний и приведения их в комплексную систему социально-этических оснований. Это объясняется тем, что технонаука, как современный вид научно-технической деятельности, объединяет в себе различные направления, которые фундируются специфическими социально-этическими принципами.

Ещё в 1945 году, когда человечество испытало «цивилизационный шок» в результате сбрасывания атомных бомб на японские города Хиросиму и Нагасаки, в научном сообществе и в общественных кругах всерьез обеспокоились проблемой этической нейтральности науки. Оправданны ли с моральной точки зрения реализация и финансирование исследований по созданию атомной бомбы? Действительно ли классический принцип «Решись постигать!», выдвинутый Г. Галилеем и универсально характеризующий парадигму научного поиска, является непреклонным? Или в середине XX века он серьезно пошатнулся, когда научно-технический прогресс стал смертельно опасным феноменом? На этот счет существовали различные точки зрения, как в стане ученых, так и в кругах политиков. Например, один из создателей теории деления атомного ядра, лауреат Нобелевской премии по физике В. Гейзенберг говорил, что «открыватель до совершения открытия не может знать ничего о возможностях его применения, и даже потом путь к его практическому внедрению может оказаться столь долог, что никакие предсказания будут невозможны» [1].

Тем самым физик «снимал» с коллег всякую моральную ответственность за создание атомного оружия и переносил её на плечи инженеров – тех лиц, которые занимались конструированием проекта атомной бомбы. Однако другой современник В. Гейзенберга, М. Борн, отталкиваясь от собственных наблюдений в ходе участия в проекте принятия решений по поводу применения атомного оружия, писал, что «группа ученых-атомщиков в своем докладе предупредила министра обороны и правильно предсказала последствия этого шага; доклад подписал председатель комитета Джеймс Франк, мой старый друг и коллега по Гёттингену далекого мирного времени. Но другая группа выдающихся физиков одобрила сбрасывание атомных бомб [2, с. 71]». Из вышесказанного можно сделать вывод, что только после того, как проекты «Толстяк» и «Малыш» (так назывались бомбы, сброшенные на Японию – прим. авт.) были осуществлены, в научном сообществе всерьез заговорили о социально-этических основаниях, фундирующих вектор научно-технического прогресса.

Следует отметить, что опасения, которые высказывали философы уже в начале XX века в отношении экспансивного развития науки и техники и отрицательных последствий научно-технической революции, точно подтвердились спустя два десятилетия. Например, известный русский религиозный философ Н.А. Бердяев в своей знаменитой статье «Человек и машина» предупреждал: «Скоро мирные ученые смогут производить потрясения не только исторического, но и космического характера. Небольшая кучка людей, обладающая секретом технических изобретений, сможет тиранически держать в своей власти все человечество. Это вполне можно себе представить» [3]. Так или иначе, но предсказания Н.А. Бердяева начали сбываться вскоре после опубликования его работы в журнале «Путь».

К сожалению, социальная мысль опережала научные представления в понимании этической природы науки и техники, а многочисленная критика, обращенная к отрицательным последствиям научно-технической деятельности со стороны экзистенциальной, религиозной, иррационалистической, феноменологической традиций, не воспринималась всерьез. Несмотря на этот факт, обеспокоенность негативными последствиями научно-технического прогресса всё больше проникала в массовое сознание. Полярные представления, которые впоследствии сформировали дихотомию сциентизм/антисциентизм, технократизм/антитехнократизм, сохраняются и в настоящее время.

Осознание социально-этической природы научно-технического прогресса учеными приходит вскоре после печального опыта Второй мировой войны, когда в 1955 г. совместными усилиями физиков с мировым именем организовывается Пагуошское движение, направленное на сокращение мировых ядерных запасов, сдерживание научных исследований в области ядерного оружия и массовые выступления за мир. Важной точкой отсчета в социально-этическом осмыслении научно-технической деятельности стало признание Пагуошским движением в качестве первейшего и основополагающего морального основания прогресса принципа ответственности. Принцип ответственности приобрел характер своеобразного стержня всего социально-этического измерения научно-технического прогресса, и на протяжении второй половины XX века над его разработкой трудились многие социальные философы. Здесь необходимо отметить вклад Г. Йонаса, Х. Ленка, А. Хунинга, В.А. Канке, Ж. Грейша.

Синтезируя опыт разработки теории ответственности, можно сделать вывод, что на современном этапе развития технонауки принцип ответственности предполагает задачу переосмысления природы человека, его сознания, его отношения к себе и к другому. Ответственность обязывает научно-техническое сообщество разрешить нравственную дилемму: останется ли человечество на планете или, погоне за удовлетворением технических потребностей, мы снова и снова будем наращивать технологический потенциал, пока не столкнемся с катастрофой?

Современная технологическая практика кроме фундаментальной теории ответственности требует более широкого арсенала, способного регулировать научно-техническую деятельность в социально-этическом направлении. В начале третьего тысячелетия научно-техническая деятельность стала именоваться технонаукой. Понятие «технонаука» подчеркивает, что направление современных научных исследований находится в плоскости построения всевозможных технических проектов. В специализированной литературе технонауку также отождествляют с понятиями «конвергентные технологии» и NBIC (Nanotechnology, Biotechnology, Information technology and Cognitive science). Данное отождествление подчеркивает, что ключевыми направлениями научно-технического поиска в XXI веке становятся разработки в области нанотехнологий, биомедицинских практик, а также информационных систем. Развитие конвергентных технологий обусловливает разработку второго уровня социально-этических принципов, соответствующих технонауке.

Например, разработки в области искусственного интеллекта обусловливают решение про-

блемы гармоничного существования в будущем естественного (человеческого) и искусственного (машинного) разума. Исследования ученых, направленные на создание модели сильного искусственного интеллекта, которая «будет не просто моделью разума. Она, в буквальном смысле слова, сама и будет разумом, в том же смысле, в котором человеческий разум — это разум» [4], актуализируют проектирование этических принципов, способных разрешить дилемму совместного сосуществования человека и разумной машины. Так, известные три закона робототехники являются, на наш взгляд, попыткой определения алгоритмов сосуществования искусственного интеллекта и человеческого разума:

1. Робот не может причинить вред человеку или своим бездействием допустить, чтобы человеку был причинён вред.

2. Робот должен повиноваться всем приказам, которые даёт человек, кроме тех случаев, когда эти приказы противоречат Первому Закону.

3. Робот должен заботиться о своей безопасности в той мере, в которой это не противоречит Первому и Второму Законам.

Эти законы обращают внимание на проблему коэволюции, которая в настоящий момент еще только приобретает свой смысл. Принцип коэволюции предполагает гармоничное сосуществование не только системы «человек–природа», он предусматривает взаимосвязь в системе «человек–интеллектуальная техника» в той степени, в какой техника может стать самостоятельной реальностью. Принцип коэволюции гласит, что интеллектуальная техника должна стать помощницей там, где сохраняется большой риск для человека в осуществлении его деятельности. При этом, интеллектуальная техника не должна вмешиваться в процессы человеческой жизнедеятельности и принимать по отношению к человеку доминирующие и конфликтные позиции. Практика создания современных роботов, способных самостоятельно принимать определенные решения и осуществлять заданный набор операций, в окончательном счете приведет к созданию полностью автономных машин. И в этом случае на первый план выйдут не принципы кибернетической науки, а этические принципы, формирующие жизненную сферу человека и машины. Принцип коэволюции является вторым по счету в системе социально-этических оснований технонауки.

Направлением, которое также связано со становлением и развитием технонауки, является нанотехнологическая практика. Этические дилеммы, возникающие в ходе применения и распространения нанотехнологий, по сравнению с вопросами искусственного интеллекта, имеют более острый характер, поскольку затрагивают фундаментальные жизненные основания. Нанотехнологические исследования являются сравнительно молодой областью научно-технической деятельности, которая образовалась на стыке физики, химии, биологии, электроники, а на современном этапе цивилизационного развития рассматриваются как возможность перехода к новому уровню жизни. Например, связанные с нанотехнологией ожидания глубоко укоренились в общественном сознании: во-первых, это надежды на скорое усовершенствование человеческого организма, связанные с широким внедрением так называемых нанороботов, улучшение зрения, слуха, увеличение памяти через использование запоминающих микросхем, электронный интерфейс мозга и прочее. Во-вторых, надежды на излечение смертельных болезней и исправление врожденных пороков через осуществление лечебных процедур с использованием измененных на биологическом уровне клеток.

Такая ситуация формирует в нанотехнологической деятельности ценность человеческого существа как такового. Усвоение этой ценности направлено на понимание уникальности человека, его сознания, его предназначения и установление запретов на всевозможные экспериментальные исследования по улучшению его природы и разрешение только таких практик, которые направлены на восстановление человеческого организма. Как следствие, необходимо остановиться на третьем социально-этическом принципе, связанном с рассматриваемой ценностью и ассоциируемом с нанотехнологиями. Это принцип ненасилия. Согласно формуле А.А. Гусейнова, «ненасилие – это и всеобщая, и вполне предметная, даже технологичная парадигма поведения» [5]. На наш взгляд, принцип ненасилия должен устанавливать однозначный запрет на различные вмешательства нанотехнологической деятельности в фундаментальные жизненные основы человека и природы. Нанотехнологии позволяют на клеточном уровне осуществлять изменения с заданной целью, при этом в научном сообществе всерьез поднимается вопрос о возможности при помощи таких технологий достижения человеческого бессмертия. Смерть в скором времени может пониматься как обратимый процесс клеточного повреждения, которое может быть устранено с помощью молекулярного ремонта, осуществляемого нанороботами, причём примером служат существующие в природе ремонтные системы ДНК [6]. Так или иначе, человечество еще не подготовлено к встрече с современными революционными научными практиками.

Одновременно сами научные практики не подготовлены к реализации всевозможных экспериментов. Хотя на сегодняшний день, и существуют попытки выведения в лабораторных условиях продуктов питания, вместе с тем окончательно не доказано, насколько безопасно осуществлять такие эксперименты. Принцип ненасилия проявляет социальную роль науки, раскрывает её предназначение – служение общественному развитию.

В раскрытии системы социально-этических оснований технонауки необходимо остановиться на практике оценки современных научных исследований. Понятно, что необходимость практического социально-этического регулирования технонауки объясняется особенностями экспансивного роста научно-технических достижений и потребностью в ограничении технологического развития. И здесь обретает свою форму последний основной принцип социально-этического осмысления технонауки – принцип предосторожности. Он утверждает, что непредсказуемость последствий внедрения современных научных практик настолько велика, что только предусмотрев различные сценарии применения технологий, мы вправе внедрять их в практику. На основании принципа предосторожности выстраивается структура практического воплощения процедур оценки научно-технического прогресса: последовательная экспертиза технических проектов коллективными субъектами, состоящими из экспертов-ученых, представителей общественных групп и властей. При этом со стороны всех участников требуются взвешенные и осторожные решения.

Примечательно то, что возникновение института оценки техники относят к странам с развитой демократией, то есть к тем государствам, где степень общественной активности очень высок. При этом в нашей стране практика оценки техники ещё не получила институциональных форм. «Данная ситуация объясняется глубокой озабоченностью общества экономическими и социальными проблемами, в результате которых техногенные риски и вопросы состояния окружающей среды в общественном сознании временно отходят на второй план» [7]. Тем не менее, существуют положительные отечественные примеры использования инструментов социально-этического регулирования научно-технической деятельности. Так, 8 декабря 1996 г. по инициативе областной экологической организации «Во имя жизни» и российского отделения «Greenpeace» в Костромской области состоялся референдум по поводу строительства АЭС. «В голосовании приняли участие 59 % избирателей Костромской области; из числа голосовавших 88 % высказались против строительства АЭС. Референдум показал, что общественные механизмы регулирования научно-технического развития могут работать вполне эффективно» [7]. Здесь следует отметить, что как в нашей стране, так и в остальных странах противоречия, вызываемые научно-техническим развитием, с каждым годом обостряются все сильнее, в связи с чем необходимо обратить пристальное внимание именно на институционализацию таких форм контроля научно-технической деятельности. Благодаря практике социальной оценки техники, основанной на принципе предосторожности, становится возможным предугадывать нежелательные последствия внедрения результатов технонауки и привести современную научно-техническую деятельность к формуле, которую когда-то высказал известный отечественный ученый и философ И.Т. Фролов: «Наука – для человека».

В процессе исследования необходимо остановиться на третьем уровне системы социально-этических оснований технонауки. Третий уровень связан с реализацией практик профессиональной деятельности субъектов науки как носителей особого типа культуры. В этом контексте стоит обратить внимание на концепцию этоса науки, разработанную Р. Мертоном. Согласно концепции Р. Мертона, «этос науки» представляет собой составной феномен, структура которого содержит четыре императива: «универсализм, коллективизм, бескорыстность и организованный скептицизм» [8, с. 770]. Императив «универсализм» определяет принцип антисубъективности результатов научной деятельности; императив «коллективизм» раскрывает общественно полезный характер научных исследований; императив «бескорыстность» исключает личную заинтересованность субъекта научной деятельности в результатах исследований; императив «организованный скептицизм» предполагает открытость полученных результатов к критической оценке со стороны других ученых. Как универсальная характеристика профессиональной среды этос науки может включать в себя различные требования, которые предъявляются к ученому как субъекту определенного вида социальной деятельности. И в этом ключе этос помимо существующих принципов может дополняться и другими этическими нормами.

Таким образом, рассмотрев основные этические принципы, фундирующие отдельные направления, можно представить систему социально-этических оснований технонауки. Ядром системы, или первейшим уровнем, является принцип ответственности как фундаментальная формула, согласно которой должна осуществляться научно-

техническая деятельность. Второй уровень технонауки рассматривает принципы коэволюции, ненасилия и предосторожности. Эти основания характеризуют отдельные направления конвергентных технологий и подчеркивают, что каждое направление перед практическим применением должно подвергаться процедурам оценки. В качестве подчиненных социально-этических принципов выступают этические постоянные, которые относятся к понятию этоса науки, то есть те нормы и правила, которые регулируют деятельность специалистов в профессиональных кругах и отражают уровень профессиональной культуры. Модель системы социально-этических принципов технонауки, состоящая из трех уровней, вполне достаточна для того, чтобы на практике разрешать моральные дилеммы, возникающие в ходе развития научно-технической деятельности и предупреждать возможные отрицательные эффекты науки и техники. Следует отметить, что приведенные теоретические выкладки актуализируются в связи с развитием конвергентных технологий, их сближением с человеком и являются своеобразным началом в определении этической природы современных научно-технических исследований. Учитывая, что развитие технологических приемов будет только нарастать, а многообразие этических вопросов увеличиваться, в будущем потребуются серьезные усилия как со стороны ученых-специалистов, так и со стороны социальных мыслителей по выбору направлений исследований, которые будут отвечать общественному предназначению научно-технической деятельности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гейзенберг, В. Об ответственности исследователя // Часть и целое : беседы вокруг атомной физики. М. : 2004. 232 с.
2. Борн М. Моя жизнь и взгляды. М. : Прогресс, 1973. 176 с.
3. Бердяев Н. А. Человек и машина (проблема социологии и метафизики техники) // Вопросы философии. 1989. № 2. С.147–162.
4. Серл Дж. Разум мозга – компьютерная программа? // В мире науки. 1990. №3. С. 7–13.
5. Гусейнов А. А. Этика ненасилия // Вопросы философии. 1992. №3. С.72–81.
6. Кулькова Е. П. Социокультурные последствия развития нанотехнологий: социально-философский аспект // Вестник ДГТУ. 2008. Прил. С. 42–50.
7. Ефременко Д. В. Введение в оценку техники. М. : МНЭПУ, 2002. 250 с.
8. Мертон Р. Социальная теория и социальная структура. М. : АСТ, 2006. 873 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

№4(36)
2012

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Ответственный за выпуск **В.Е. Гозбенко**

Подписано в печать 3.12.2012. Формат 60x84/8.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 30.
Уч.-изд. л. 33,6. Тираж 500 экз. Заказ № ___
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 ИП "Вайнерман А.Л."
г. Красноярск, ул. Свердловская, 3д, оф. 1-01.

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