

Входит в перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, утвержденный экспертными советами Высшей аттестационной комиссии Министерства науки и высшего образования РФ

Иркутский государственный университет путей сообщения • Irkutsk State Transport University • Irkutsk State Transport University



2021 № 2(70)

Иркутский государственный университет путей сообщения • Irkutsk State Transport University • Irkutsk State Transport University

Подписной индекс
в каталоге «Роспечать» – 64556

Зарегистрирован
Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).
Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-66109 от 20 июня 2016 г.

Modern technologies.
System analysis. Modeling

ISSN 1813-9108 (Print)

Современные технологии системный анализ Моделирование

2021
№ 2 (70)

Иркутский государственный
университет путей сообщения

Машиностроение • Машиноведение • Энергетические системы • Транспорт

Д.Т.Н., профессор
Юрий Федорович

Мухопад
1934-2021 гг.

«Управляющий автомат
Мухопода - сокращение
требуемой
элементной базы
в тысячи раз»



Machine Building • Theoretical Engineering • Energy Systems • Transport

Modern technologies system analysis Modeling

2021
No. 2 (70)

Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie

Современные технологии
Системный анализ
Моделирование

№ 2 (70)
2 0 2 1

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Главный редактор **А.П. Хоменко**
Ответственный за выпуск **В.Е. Гозбенко**

Приоритетные цели журнала

- передача знаний и опыта, накопленного мировым сообществом и научными школами университета;
- выработка новых знаний в области механики, машиностроения, информатики и транспорта для решения актуальных проблем современной техники;
- ознакомление читателей с передовым мировым опытом внедрения научных разработок по техническим наукам.

Стратегические задачи

- предоставлять ученым возможность публиковать результаты своих исследований;
- привлекать внимание к наиболее актуальным перспективным и интересным направлениям научных исследований по тематике журнала;
- обмен мнениями между исследователями из разных регионов и государств.

Учредитель и издатель

Иркутский государственный университет путей сообщения
(664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15)

Главный редактор

А.П. Хоменко, д.т.н., проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (Иркутск, Российская Федерация)

Заместители главного редактора

В.Е. Гозбенко, д.т.н., проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (Иркутск, Российская Федерация)

С.В. Елисеев, д.т.н., проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (Иркутск, Российская Федерация)

Редакционный совет

А.И. Артюнин, д.т.н., проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (Иркутск, Российская Федерация)

И.В. Бычков, академик РАН, Иркутский государственный университет (Иркутск, Российская Федерация)

И.И. Галиев, д.т.н., проф., Омский государственный университет путей сообщения (Омск, Российская Федерация)

А.В. Данеев, д.т.н., проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (Иркутск, Российская Федерация)

А.В. Крюков, д.т.н., проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (Иркутск, Российская Федерация)

М.И. Кузьмин, академик, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (Иркутск, Российская Федерация)

Н.А. Махутов, д.т.н., проф., член-корреспондент РАН, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (Москва, Российская Федерация)

В.В. Москвичев, д.т.н., проф., Институт вычислительных технологий СО РАН (Красноярск, Российская Федерация)

А.В. Мурыгин, д.т.н., проф., Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва (Красноярск, Российская Федерация)

С.И. Носков, д.т.н., проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (Иркутск, Российская Федерация)

С.М. Овчаренко, д.т.н., доц., Омский государственный университет путей сообщения (Омск, Российская Федерация)

П.М. Огар, д.т.н., проф., Братский государственный университет (Братск, Российская Федерация)

Та Зуи Фьонг, к.ф.-м.н., доц., Ханойский институт математики (Вьетнам)

Р. Энхбат, д.ф.-м.н., проф., Монгольский национальный университет (Монголия)

Здислав Якиевич, д.т.н., проф., Университет штата Аризона (США)

А.С. Янюшкин, д.т.н., проф., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова (Чебоксары, Российская Федерация)

Адрес редакции: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15

Телефон: +7(3952) 638-284; **Факс:** +7(3952) 38-76-72

Сайт: <http://stsam.irgups.ru>

e-mail: www.irgups-journal@yandex.ru

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-66109 от 20 июня 2016 г.

Подписной индекс в каталоге «Роспечать» – 64556.

Включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ); Ulrich's Periodicals Directory; ВИНТИ РАН.

Входит в перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, утвержденный экспертными советами Высшей аттестационной комиссии Министерства науки и высшего образования РФ по специальным направлениям: машиностроение и машиноведение; транспорт.

Modern technologies System analysis Modeling

ISSN 1813-9108 (Print)

2021
No. 2 (70)

Founded in 2004

Published quarterly

Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie

Aims and Scope

- transfer of knowledge and experience gained by the world community and schools of thought of the university;
- development of new knowledge in the field of mechanics; mechanical engineering; computer science; transport to solve topical problems of modern technology;

- acquaint the readers with the world's best practices in the implementation of scientific developments in technical sciences.
- provide scientists with an opportunity to publish the results of their researches;
- attract attention to the most relevant and promising areas of research on the subject of the journal;
- exchange of opinions between researchers from different regions and states.

Founder and publisher

Irkutsk State Transport University
(Office G-302, 15, Str. Chernyshevskogo, Irkutsk, 664074, Russian Federation)

Editor-in-Chief

A.P. Khomenko, D.Sc. in Engineering, Prof., Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

Deputy Editor-in-Chief

V.E. Gozbenko, D.Sc. in Engineering, Prof., Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

S.V. Eliseev, D.Sc. in Engineering, Prof., Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

Editorial council

A.I. Artyunin, D.Sc. in Engineering, Prof., Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

I.V. Bychkov, Member of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk State University (Irkutsk, Russian Federation)

I.I. Galiev, D.Sc. in Engineering, Prof., Omsk State Transport University (Omsk, Russian Federation)

A.V. Daneev, D.Sc. in Engineering, Prof., Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

A.V. Kryukov, D.Sc. in Engineering, Prof., Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

M.I. Kuzmin, Academician, Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russian Federation)

N.A. Makhutov, D.Sc. in Engineering, Prof., Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

V.V. Moskvichyov, D.Sc. in Engineering, Prof., Institute of Computational Technologies, Siberian branch of the Russian Academy of Sciences (Krasnoyarsk, Russian Federation)

A.V. Murygin, D.Sc. in Engineering, Prof., Reshetnev Siberian State University of Science and Technologies (Krasnoyarsk, Russian Federation)

S.I. Noskov, D.Sc. in Engineering, Prof., Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

S.M. Ovcharenko, D.Sc. in Engineering, Assoc. Prof., Omsk State Transport University (Omsk, Russian Federation)

P.M. Ogar, D.Sc. in Engineering, Prof., Bratsk State University (Bratsk, Russian Federation)

Ta Zui Fuong, Ph.D. in Physics and Mathematics, Assoc. Prof., Hanoi Institute of Mathematics (Vietnam)

R. Enkhbat, D.Sc. in Physics and Mathematics, Prof., Mathematics of National University of Mongolia (Mongolia)

Zdislav Yakievich, D.Sc. in Engineering, Prof., Arizona State University (USA)

A.S. Yanyushkin, D.Sc. in Engineering, Prof., Ulyanov Chuvash State University (Cheboksary, Russian Federation)

Адрес редакции: 15, Str. Chernyshevskogo, Irkutsk, 664074, Russia

Tel.: +7(3952) 638-284; **Fax:** +7(3952) 38-76-72

Web-Site: <http://stsam.irgups.ru>

e-mail: www.irgups-journal@yandex.ru

The Journal is registered by the Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications. Registration Certificate ПИИ № ФС77-66109 от June 20, 2016

The subscription index in the Russian catalogue «Rospechat» is 64556.

Has been included in the Russian Science Citation Index (RSCI); Ulrich's Periodicals Directory.

The journal is included in the list of leading scholarly journals and editions in which the main results of dissertations for the scientific degree of a doctor and candidate of sciences, approved by the expert councils of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, should be published:

- Mechanical engineering and mechanical science;
- Transport.

СОДЕРЖАНИЕ

Машиностроение, машиноведение и энергетические системы

Трескин С. В., Новиков Н. Н., Дульский Е. Ю., Иванов П. Ю. Решение задачи оптимизации рамных конструкций с помощью программного комплекса «AUTODESK INVENTOR»	10
Данеев А. В., Данеев Р. А., Сизых В. Н. Расчет шестифазной линейной электрической цепи методом симметричных составляющих	17
Попов И. П. Суперпозиция вращений в механизмах	24
Карлина Ю. И., Хоменко А. П. Методы эффективной организации и ведения специализированного информационного и программного обеспечения автоматизированной системы технологической подготовки производства коаксиальных радиокомпонентов для сверхвысокочастотной микроэлектроники спутниковой радиосвязи на железнодорожном транспорте	30
Якубов М. С., Исроилов У. Ш., Каримов И. А. Методологические аспекты информационно-измерительных комплексов функционального диагностирования динамических объектов электрифицированного железнодорожного транспорта	36
Бедрицкий И. М., Жураева К. К., Базаров Л. Х. Устойчивость работы параметрического умножителя числа фаз на основной частоте	43
Белоголов Ю. И. Компенсация действия давления рабочей среды в уплотнительных соединениях с тонкостенными элементами	51

Транспорт

Филиппенко Н. Г., Беломестных А. А., Чумбадзе Т. Т. Автоматизированное исследование процесса набухания уплотнений сливных приборов вагонов-цистерн	62
Герциг Д. В., Маломыжев О. Л., Семенов А. Г., Маломыжев Д. О. Электрическая система обеспечения теплового режима стрелочных переводов железнодорожных путей	69
Алейников Д. П., Зык А. В. Использование специальных средств фото- и видеофиксации в целях профилактики дорожно-транспортных происшествий в Иркутской области	75
Закарюкин В. П., Крюков А. В. Моделирование режимов электрических сетей, оснащенных устройствами распределенной продольной компенсации	84
Пузина Е. Ю. Сравнительный анализ оборудования уровня процесса для цифровой тяговой подстанции	92
Круглов С. П., Ковыршин С. В., Иванов П. Ю., Исупов С. А. Адаптивная подсыпка песка на локомотиве	104
Кузьмин О. В., Голиков В. А. Применение метода «дерево решений» в диагностике неисправности двигателя внутреннего сгорания автомобиля	113
Каимов Е. В. Совершенствование научно-технического сопровождения, мониторинга и контроля производства работ по устройству линейного транспортного сооружения	120

Атапин В. В., Чекин А. А., Баширов А. В. Инновации в сфере контроля состояния стрелочных переводов	128
Амиров С. Ф., Бадретдинов Т. Н., Баянов И. Н. Анализ повреждений токоприемников электроподвижного состава и модернизация систем контроля разрегулировки опор контактной сети	138
Ерохин В. В., Караченцев В. А., Малисов Н. П. Анализ влияния траектории движения динамического управляемого объекта на точность определения навигационных параметров	145
Власенский А. А., Суханов Г. И., Супруновский А. В., Белозерова И. Г. Изменение работы тягового подвижного состава на участках железных дорог Восточного полигона	154
Лебедева О. А., Гозбенко В. Е. Оценка грузовой матрицы корреспонденций с учетом данных товарно-транспортных накладных и интенсивности движения	161
Асташков Н. П., Оленцевич В. А. Техническое решение повышения уровня надежности фазорасщепителей электровозов переменного тока	170

Информационные технологии

Милько Д. С. Экспертная система оценки угроз безопасности информации: обоснование необходимости разработки, метод и сложности при реализации	182
Асламова В. С., Минко А. А., Асламов А. А., Асламова Е. А. Системный анализ травматизма с участием детей на российских автомобильных дорогах	189

Персоналии

Д.т.н., профессор Ю. Ф. Мухопад	200
---------------------------------------	-----

CONTENTS

Machine Building, Theoretical Engineering and Energy Systems

Treskin S. V., Novikov N. N., Dul'skii E. Yu., Ivanov P. Yu. Solving the problem of optimizing frame structures using the "AUTODESK INVENTOR" software package	10
Daneev A. V., Daneev R. A., Sizykh V. N. Calculation of a six-phase linear electric circuit by the method of symmetrical components	17
Popov I. P. Superposition of rotations in mechanisms	24
Karlina Yu. I., Khomenko A. P. Methods for effective organization and supervision of specialized information and software support of the automated system of production planning of coaxial radio components for super high frequency microelectronics for satellite radio communication in railway transport	30
Yakubov M. S., Isroilov U. Sh., Karimov I. A. Methodological aspects of information and measurement systems for functional diagnostics of dynamic objects of electrified railway transport	36
Bedritskii I. M., Zhuraeva K. K., Bazarov L. Kh. Stability of the parametric phase number multiplier at the fundamental frequency	43
Belogolov Yu. I. Compensation of the influence of the pressure of the working medium in sealing joints with thin-walled elements	51

Transport

Filippenko N. G., Belomestnykh A. A., Chumbadze T. T. Automated research of the process of the swelling of sealings of draining devices in the tank railcars	62
Gertsig D. V., Malomyzhev O. L., Semenov A. G., Malomyzhev D. O. Electrical system of ensuring the thermal regime of railway turnout switches	69
Aleinikov D. P., Zyk A. V. Use of special means of photo and video recording for the prevention of road accidents in the Irkutsk region	75
Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. Simulating the modes of electrical networks equipped with a distributed static series compensator system	84
Puzina E. Yu. Comparative analysis of the technological equipment for the digital traction substation	92
Kruglov S. P., Kovyrshin S. V., Ivanov P. Y., Isupov S. A. The adaptive adding of sand for a locomotive wheelset	104
Kuz'min O. V., Golikov V. A. Application of a "decision tree" method in the diagnostics of faults of the internal combustion engine of a motor vehicle	113
Kaimov E. V. Development of scientific and technical support, monitoring and work production control on the arrangement of a linear transportation construction	120

Atapin V. V., A. A. Chekin, A. V. Bashirov Innovations in the field of monitoring of the state of turnout switches	128
Amirov S. F., Badretdinov T. N., Bayanov I. N. Analysis of damage of electric stock current collectors and modernization of catenary support misalignment control systems	138
Erokhin V. V., Karachentsev V. A., Malisov N. P. Analysis of the influence of the trajectory of motion of a dynamic controlled object on the accuracy of determining navigation parameters	145
Vlasenskii A. A., Sukhanov G. I., Suprunovskii A. V., Belozerova I. G. Changes in the operation of locomotives on the railway sections of the Eastern polygon	154
Lebedeva O. A., Gozbenko V. E. Estimation of the freight traffic mobility plan taking into account consignment notes and traffic intensity data	161
Astashkov N. P., Olentsevich V. A. Technical solution to increase the reliability level of phase separators of AC electric locomotives	170

Information technology

Milko D. S. Threat modeling expert system: reasons for development, method and implementation troubles	182
Aslamova V.S., Minko A. A., Aslamov A. A., Aslamova E.A. System analysis of child injuries on the motor roads of Russia	189

Personalities

Doctor of Technical Sciences, Professor Yu. F. Mukhopad	200
---	-----

Требования к статьям, принимаемым к публикации

Рукописи статей представляются в электронном и распечатанном виде.

Рекомендуемый объем статей 9-12 стр.

1. К статье прилагается:

- акт экспертизы;
- заявка на опубликование (от каждого автора).

2. Статья включает в себя:

- индекс УДК;
- сведения об авторах: фамилия, имя, отчество, ученая степень, звание и должность, полное название учреждения (кафедры), контактный телефон и E-mail;
- аннотация (реферат) к статье должна быть (на русском и английском языках): информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье); компактной (укладываться в объем от 180 до 250 слов).
- ключевые слова (5-10 ключевых слов на русском и английском языках);
- библиографический список (необходимо упоминание не менее 18 источников, в том числе 25% на зарубежные источники). Библиографический список к статье оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5-2008. «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления».

Текст статьи предоставляется в виде файла с расширением *.doc – документа, построенного средствами Microsoft Word, и распечаткой на стандартных листах формата А4 (210x297 мм) в две колонки, заверенной подписью авторов.

Статья должна быть **структурирована** (введение, 2 и более пункта разделов, заключение).

3. 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 – 1 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 только Microsoft Equation 3 с параметрами:

- элементы формулы для греческих букв и символов шрифт Symbol, для остальных элементов – шрифт Times New Roman (использование букв русского алфавита в формуле нежелательно);
- размер символов: обычный – 10 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.

Рисунки, вставленные в текст статьи, должны быть выполнены с разрешением 300 dpi, Grayscale – для полутонов, максимальный размер рисунка с надписью: ширина 150 мм, высота 245 мм, представлены в виде файла с расширением *.jpg, *.tif и распечаткой на стандартных листах формата А4, должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров.

В журнал **не принимаются** статьи с таблицами, развернутыми по вертикали (альбомная ориентация), а также имеющими аббревиатуры в названии и аннотации. Если по тексту статьи не делаются ссылки на номера формул, то формулы не нумеруются.

Статьи, представляемые в журнал, проходят обязательное рецензирование.

Самоцитирование журнала в статьях **запрещено**.

Пример оформления статьи представлен на сайте журнала: www.stsam.irgups.ru

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Редакция оставляет за собой право отклонить статью, не отвечающую указанным требованиям или не прошедшую обязательное рецензирование.

По вопросам публикации статей обращаться: 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Иркутский государственный университет путей сообщения. Аудитория Г-302. Гозбенко Валерий Ерофеевич.

Телефон: 8(3952) 638-284. Факс: 8(3952) 38-76-72. E-mail: irgups-journal@yandex.ru

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование

**МАШИНОСТРОЕНИЕ, МАШИНОВЕДЕНИЕ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

**MACHINE BUILDING, THEORETICAL ENGINEERING
AND ENERGY SYSTEMS**

Решение задачи оптимизации рамных конструкций с помощью программного комплекса «AUTODESK INVENTOR»

С. В. Трескин✉, Н. Н. Новиков, Е. Ю. Дульский, П. Ю. Иванов

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ sergei.treskin@yandex.ru

Резюме

В статье рассматриваются вопросы оптимизации конструкций из стандартных профилей путем применения программных пакетов, позволяющих проектировать детали, узлы и конструкции в полном цикле. Анализируется цикл современного проектирования, частью которого является обязательная оптимизация и его основные этапы. После осуществления перечисленных этапов проектирования производится переход к опытному конструированию и натурным испытаниям полученной конструкции или детали. Имеющееся на рынке программное обеспечение в основном не позволяет реализовывать все этапы проектирования. Однако некоторые программные продукты, первоначально разработанные для создания 3D-моделей и конструкторской документации в рамках реализации первого этапа проектирования («Компас», «AutoCAD» и «Autodesk Inventor»), начали расширять функционал для осуществления стандартных задач следующих этапов проектирования, включая функции по расчетам прочности конструкции и ее оптимизации. В работе исследуется часть цикла проектирования конструкции с расчетом нагрузок и ее оптимизация в программе «Autodesk Inventor». Рассмотрено решение этого вопроса на примере конструкции барабана экспериментальной установки, изготовленного из металлического стандартного профиля, а также проанализирована методика определения оптимальной конструкции. Перед проведением исследовательской работы были установлены задачи оптимизации. Они подразумевают определение математически вычисленной оптимальной толщины и длины элементов конструкции. Описывается ход проведения исследования в пакете инженерного анализа «Autodesk Inventor». Это исследование заключается в проведении статического анализа в «Autodesk Inventor» и последующем сравнении получившегося коэффициента запаса прочности с рекомендованным. Основным результатом исследовательских работ в подобных программных комплексах является облегчение конструкции без потери необходимого уровня прочности, что положительно сказывается на технологичности и экономической эффективности конструкций и сооружений, создаваемых из стандартных профилей.

Ключевые слова

оптимизация конструкции, цикл современного проектирования, этапы проектирования, программа «Autodesk Inventor», пакет инженерного анализа, коэффициент запаса прочности, задачи оптимизации, статический анализ

Для цитирования

Трескин С. В. Решение задачи оптимизации рамных конструкций с помощью программного комплекса «AUTODESK INVENTOR» / С. В. Трескин, Н. Н. Новиков, Е. Ю. Дульский, П. Ю. Иванов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 2 (70). – С. 10–17. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).10-17

Информация о статье

поступила в редакцию: 16.04.2021, поступила после рецензирования: 10.05.2021, принята к публикации: 19.05.2021

Solving the problem of optimizing frame structures using the “AUTODESK INVENTOR” software package

S. V. Treskin✉, N. N. Novikov, E. Yu. Dul'skii, P. Yu. Ivanov

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ sergei.treskin@yandex.ru

Abstract

The article deals with the optimization of structures made of standard profiles by using software packages that allow one to design parts, assemblies and structures in a full cycle. The article analyzes the cycle of modern design, a part of which includes mandatory optimization and its mandatory stages. After the implementation of the above design stages, the transition to experimental design and field tests of the resulting structure or part is carried out. The software available on the market usually doesn't make it possible to implement all design stages. However, some software products originally developed to create 3D-models and design documentation as part of the implementation of the first design stage (for example, “Compass”, “AutoCAD” and “Autodesk Inventor”), began to expand the functionality to implement standard tasks of the next design stages, in particular, including functions for calculating the strength of the structure and its optimization. This article describes a part of the design cycle of the structure with the calculation of loads and its optimization in the program “Autodesk Inventor”. The solution of this problem is considered on the basis of the design of the drum of the experimental installation made of a standard metal profile, and the meth-

od of determining the optimal design is analyzed. Before conducting the research work, optimization tasks were defined. Optimization tasks involve determining the mathematically calculated optimal thickness and length of structural elements. The course of the research in the engineering analysis package “Autodesk Inventor” is described. This study consists of conducting a static analysis in “Autodesk Inventor” and then comparing the resulting safety factor with the recommended one. The main result of research work in such software packages is the simplification of the structure without losing the required level of strength, which has a positive effect on the manufacturability and cost-effectiveness of structures and structures created from standard profiles.

Keywords

design optimization, modern design cycle, design stages, “Autodesk Inventor” program, engineering analysis package, safety factor, optimization problems, static analysis

For citation

Treskin S. V., Novikov N. N., Dul'skii E. Yu., Ivanov P. Yu. Reshenie zadachi optimizatsii ramnykh konstruktiv s pomoshch'yu programmnoy kompleksa “Autodesk Inventor” [Solving the problem of optimizing frame structures with the help of the “Autodesk Inventor” software package]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 2 (70), pp. 10–17. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).10-17

Article Info

Received: 16.04.2021, Revised: 10.05.2021, Accepted: 19.05.2021

Введение

В последнее десятилетие наблюдается активный рост мировой экономики, производства товаров и уровня потребления. Актуальным становится вопрос снижения потребления ресурсов при изготовлении продукции. Необходимо решить это таким образом, чтобы с одной стороны затраты на производство были минимальными, а с другой – выпускаемая продукция отвечала всем поставленным требованиям по прочности, габаритам, массе и т. д. Вопрос оптимизации конструкции остается острым со времен зарождения конструкторской деятельности, по этой причине существуют множественные наработки в машиностроительной отрасли как классические, так и инновационные. На сегодняшний день динамично развиваются цифровые технологии как в части роста производительности вычислительной техники, так и в части расширения функционала и развития интерфейса программного обеспечения. Цифровые технологии проникают во все отрасли экономики, в том числе и в машиностроение. На современном этапе существует ряд программных пакетов, позволяющих проектировать детали, узлы и конструкции в полном цикле.

Цикл современного проектирования, частью которого является обязательная оптимизация, как правило состоит из следующих этапов:

1. Первичное проектирование, при котором учитываются основные требования технического задания на конструкцию или деталь, например, габариты, материал, приблизительная прочность, форма, требования к стандартам используемых материалов, функции и т. д.

2. Испытания полученной конструкции или детали на прочность и деформации, т. е. приложение расчетных нагрузок к полученной конструкции, измерение значений запаса прочности конструкции относительно приложенных нагрузок.

3. Оптимизация конструкции с учетом полученных результатов при измерении запаса прочности, которая подразумевает снижение использования материалов при чрезмерно большом запасе прочности, и добавление усиления в местах, имеющих недостаточную прочность.

4. Конечный прочностной расчет, подтверждающий требуемые свойства конструкции согласно техническому заданию.

После осуществления перечисленных этапов проектирования производится переход к опытному конструированию и натурным испытаниям полученной конструкции или детали. Имеющееся на рынке программное обеспечение позволяет реализовать только некоторые этапы проектирования. Одни программы предназначены для создания 3D-моделей и чертежей, другие для расчета прочности и деформаций от расчетных нагрузок, есть программы, позволяющие осуществлять оптимизацию конструкции. Многообразие программного обеспечения для проектирования и инженерного анализа вызывает некоторые проблемы, связанные с экспортом моделей и их свойств из одних программных продуктов в другие, что в конечном счете приводит к потере времени, а иногда и качества результата. Наряду с этим встает вопрос о необходимости наличия лицензий на использование каждого из программных продуктов, что, несомненно, приводит к удорожанию процесса проектирования. Как правило использование специализированного программного обеспечения на каждом этапе требуется для решения задач со сложными граничными условиями, уникальными свойствами материалов, сложными переменными нагрузками или сочетанием тепловых и механических нагрузок и т. д.

Однако проектирование в большинстве случаев осуществляется для неких стандартных условий и не требует широкого ряда настроек рассчитываемого объекта. По этой причине некоторые программ-

ные продукты, первоначально разработанные для создания 3D-моделей и конструкторской документации в рамках реализации первого этапа проектирования («Компас», «AutoCAD» и «Autodesk Inventor»), начали расширять функционал для осуществления стандартных задач следующих этапов проектирования, включая функции по расчетам прочности конструкции и ее оптимизации [1]. В данной статье исследуется часть цикла проектирования конструкции с расчетом нагрузок и ее оптимизация в программе «Autodesk Inventor».

Рассмотрим решение этого вопроса на примере конструкции барабана экспериментальной установки, изготовленного из металлического стандартного профиля. При ее производстве необходимо использовать как можно меньше материала, но при этом конструкция должна отвечать прочностным требованиям. Наряду с прочностью нужно рассматривать вопросы технологичности оптимизированных конструкций. Данному направлению посвящено множество работ и часто решение этой проблемы возможно с помощью пакетов цифрового инженерного анализа. На сегодняшний день существует множество таких пакетов.

В данной статье рассмотрена методика определения оптимальной конструкции барабана экспериментальной установки для сушки главных полюсов тяговых электродвигателей инфракрасным излучением, которая в настоящее время планируется к изготовлению в рамках научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (рис. 1) [1–4]. Барабан предназначен для размещения на нем шести полюсов тяговых электродвигателей массой 37 кг каждый. В процессе сушки полюсов барабан равномерно вращается.

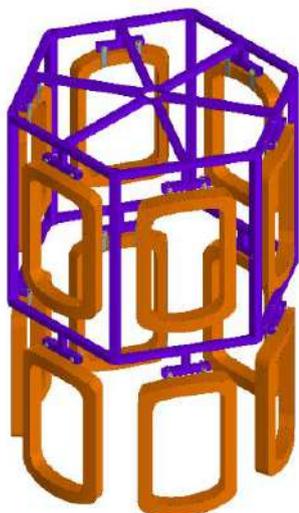


Рис. 1. Исходная модель барабана экспериментальной сушильной установки
Fig. 1. The reference model of the drum of the experimental drying installation

Прежде всего необходимо установить задачи оптимизации [5]. Из всего множества существующих в настоящее время постановок задач оптимизации можно выделить основные направления исследований:

- минимизация массы конструкции с фиксированной геометрией решетки или срединной поверхности (распределение масс по элементам заданной осевой схемы или вдоль срединной поверхности заданных очертаний);
- оптимизация формы и упругих свойств материала конструкции;
- поиск оптимального распределения внешних нагрузок.

Задача оптимизации подразумевает определение математически вычисленной оптимальной толщины и длины элементов конструкции [7–18]. Однако при решении задач по изготовлению конструкций из стандартных профилей металлопроката оптимизация сводится к выбору максимально легкого и отвечающего всем заданным требованиям прочности стандартного профиля. Далее приведен исходный вариант конструкции барабана, на котором будет проводиться статический анализ (рис. 2).

В качестве исходного материала применялась конструкционная сталь со следующими характеристиками (табл.).

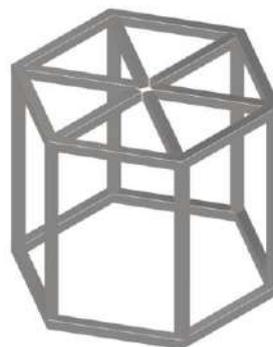


Рис. 2. Исходный вариант конструкции с профилем «Труба 40×40×2 ГОСТ 30245-2003»
Fig. 2. The reference variant of the structure with a profile “Tube 40×40×2 GOST 30245-2003”
Characteristics of steel

Характеристики стали
Steel characteristics

Показатель	Значение
Массовая плотность	7 850 кг / м ³
Предел текучести	207 МПа
Окончательный предел прочности растяжения	345 МПа
Напряжение	
Модуль Юнга	220 ГПа
Коэффициент Пуассона	0,275

Нагрузка осуществлялась сосредоточенными силами величиной по 362,97 Н. Стрелки желтого цвета обозначают силы, приложенные к раме, и силу тяжести рамной конструкции. Кубы черного цвета обозначают места заземления конструкции. Сварные швы заменены жесткими связями между ребрами конструкции (шары синего цвета). Общая масса конструкции составляет 26,654 кг (рис. 3).

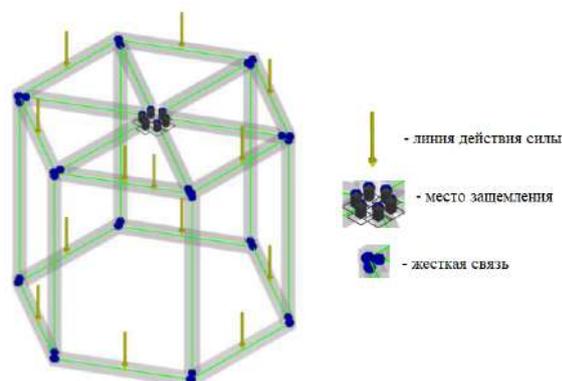


Рис. 3. Схема нагружения конструкции и условные обозначения

Fig. 3. The structure loading diagram and conventional notation

В результате проведения статического анализа в программном комплексе «Autodesk Inventor» были получены результаты, которые приведены ниже (рис. 4). Максимальное напряжение составило 54,32 МПа.

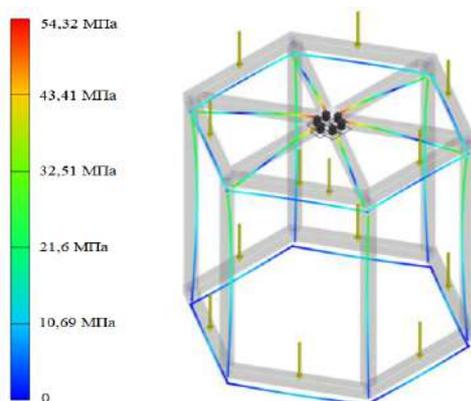


Рис. 4. Напряжение при статической нагрузке исходного варианта конструкции, полученное путем анализа «Autodesk Inventor»

Fig. 4. Stress at the static load of the reference variant of the structure, obtained by the analysis of “Autodesk Inventor”

При расчете элементов из пластичных материалов за предельное напряжение принимают предел текучести, определяемый с учетом размеров детали,

термообработки и характера нагружения; при расчете деталей из хрупких материалов принимают предел прочности, определяемый с учетом характера нагружения [11]. Используемая в исследовании конструкция состоит из упругих элементов, поэтому при расчете коэффициента запаса прочности прием предел текучести за предельное напряжение. При расчете коэффициента запаса прочности будет использоваться формула

$$\frac{\sigma_{\text{пр}}}{\sigma_{\text{max}}} = n,$$

где $\sigma_{\text{пр}} = 207$ МПа предельное напряжение, принятое равным пределу текучести материала (данное значение выбрано из встроенной библиотеки материалов в программном комплексе «Autodesk Inventor»); $\sigma_{\text{max}} = 54,32$ МПа – максимальное напряжение, полученное в результате статического анализа конструкции (рис. 4); n – коэффициент запаса прочности.

Определим, исходя из имеющихся данных, коэффициент запаса прочности:

$$n = \frac{207}{54,32} = 3,81$$

Рекомендуемым коэффициентом запаса прочности n для аналогичных металлоконструкций является $n = 1,4$ [11].

Так как существует избыточный коэффициент запаса прочности, то применим квадратный полый профиль другого размера и проведем аналогичный статический анализ.

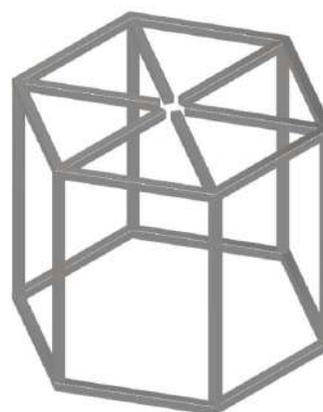


Рис. 5. Вариант конструкции с профилем «Труба 30×30×2 ГОСТ 8639-82»

Fig. 5. A variant of the structure with a profile “Tube 30×30×2 GOST 8639-82”

Проводится аналогичный статический анализ, в котором силовая нагрузка остается прежней. Результаты данного анализа приведены (рис. 6).

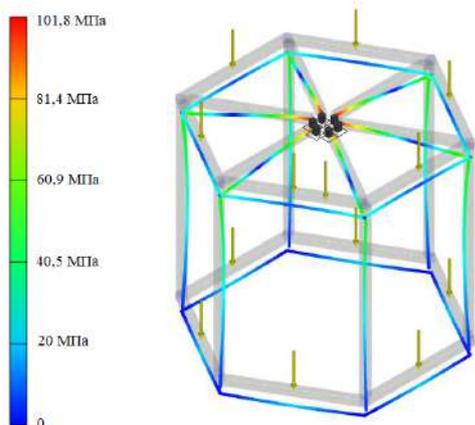


Рис. 6. Результат статического анализа с профилем «Труба 30×30×2 ГОСТ 8639-82»
Fig. 6. The result of static analysis with a profile “Tube 30×30×2 GOST 8639-82”

Проведем расчет коэффициента запаса прочности, аналогичный предыдущему. В результате получаем:

$$n = \frac{207}{101,8} = 2,03 .$$

Полученное значение коэффициента запаса прочности по-прежнему является избыточным, поэтому необходимо уменьшить размеры сечения, используемого в конструкции. Вариант конструкции с новым профилем представлен (рис. 7).

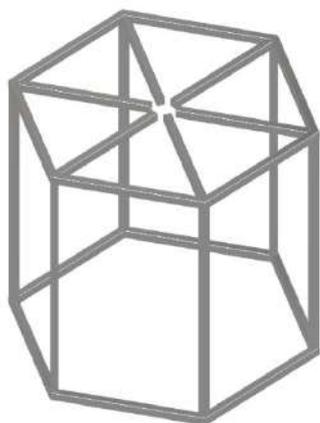


Рис. 7. Вариант конструкции с профилем «Труба 25×25×2,5 ГОСТ 8639-82»
Fig. 7. A variant of the structure with a profile “Tube 25×25×2,5 GOST 8639-82”

Проведем повторно статический анализ с прежней силовой нагрузкой, определим коэффициент запаса прочности. Полученный результат исследования в программном комплексе «Autodesk Inventor» показан далее (рис. 8).

В результате расчета получаем:

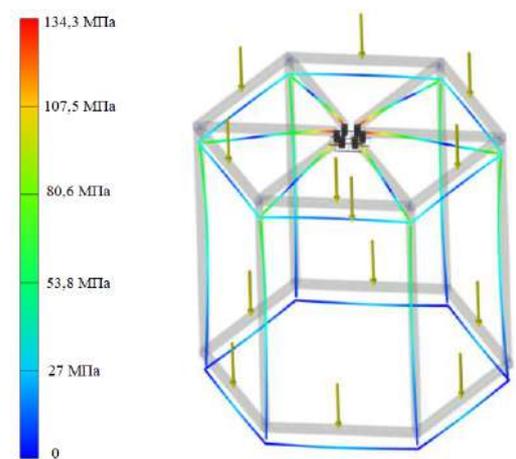


Рис. 8. Результат статического анализа с профилем «Труба 25×25×2,5 ГОСТ 8639-82»
Fig. 8. The result of static analysis with a profile “Tube 25×25×2,5 GOST 8639-82”

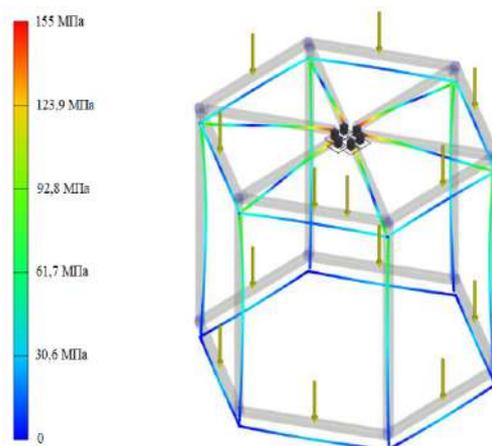


Рис. 9. Результат статического анализа с профилем «Труба 25×25×2 ГОСТ 8639-82»
Fig. 9. The result of static analysis with a profile “Tube 25×25×2 ГОСТ 8639-82”

$$n = \frac{207}{134,3} = 1,54 .$$

Полученный результат отвечает рекомендованному значению коэффициента запаса прочности. Дальнейшее уменьшение площади сечения стандартного профиля приведет к несоблюдению прочностного требования (рис. 9).

Проведем расчет коэффициента запаса прочности для конструкции с профилем «Труба 25×25×2 ГОСТ 8639-82»:

$$n = \frac{207}{155} = 1,34 .$$

Данный результат меньше рекомендованного значения, поэтому данный вариант конструкции нельзя использовать, ввиду нарушения прочностного требования.

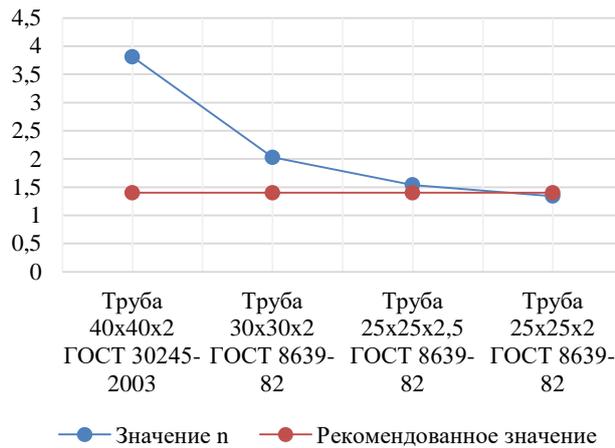


Рис. 10. График изменения коэффициента прочности
Fig. 10. A graph of the strength factor change

Итоговый вариант конструкции с профилем «Труба 25×25×2,5 ГОСТ 8639-82» имеет массу 19,749 кг. В результате по сравнению с исходным вариантом стандартного профиля «Труба 40×40×2 ГОСТ 30245-2003» была уменьшена масса конструкции более чем на 25 %. Обобщенный результат проведенной работы приведен (рис. 10).

Следует отметить, что программный комплекс «Autodesk Inventor» позволяет после проведенного статического анализа отобразить на созданной модели эпюры изгибающих моментов относительно оси X (рис. 11), относительно оси Y (рис. 12) и эпюры крутящих моментов (рис. 13), что помогает более подробно оценить особенности создаваемой конструкции.

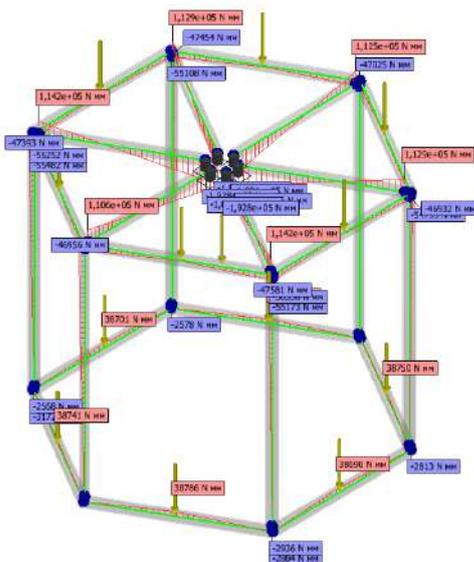


Рис. 11. Эпюры изгибающих моментов относительно оси X
Fig. 11. Bending moment diagrams referred to the X-axis

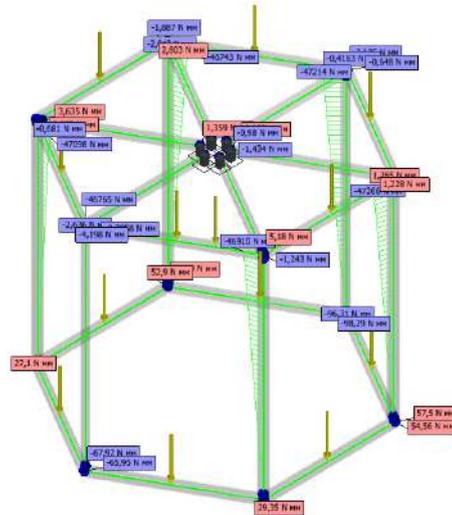


Рис. 12. Эпюры изгибающих моментов относительно оси Y
Fig. 12. Bending moment diagrams referred to the Y-axis

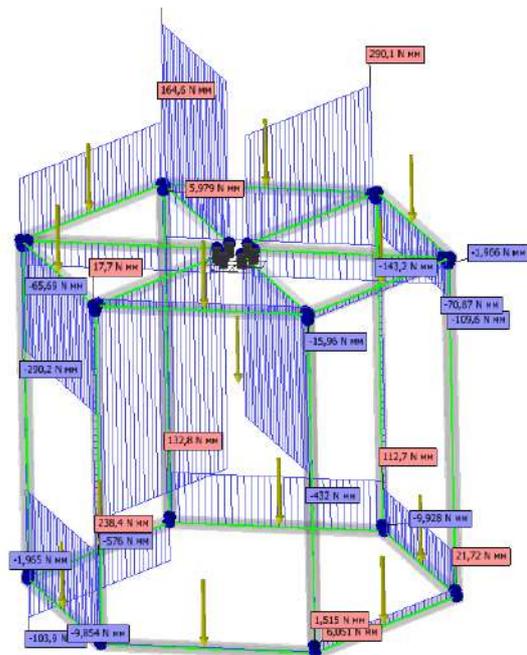


Рис. 13. Эпюры крутящих моментов
Fig. 13. Torque diagrams

Заключение

Основным результатом исследовательских работ в подобных программных комплексах является облегчение конструкции без потери необходимого уровня прочности, что положительным образом сказывается на технологичности и экономической эффективности конструкций и сооружений, создаваемых из стандартных профилей.

Список литературы

1. Иванова А.П., Чумак А.Н. Оптимальное проектирование стропильной металлической фермы с учетом возможных повреждений ее отдельных элементов // *Строительство и техногенная безопасность*. 2014. № 49. С. 12–17.
2. Управление оперативными процессами работы сортировочной станции на основе применения искусственных нейронных сетей / А.М. Худоногов, П.Ю. Иванов, Н.И. Мануилов и др. // *Изв. Петерб. ун-та путей сообщ.* 2018. Т. 15, № 1. С. 130–135.
3. Иванов П.Ю., Дульский Е.Ю., Худоногов А.М. Состояние вопроса надежности и долговечности изоляции асинхронных вспомогательных машин // *Изв. Транссиба*. 2015. № 2 (22). С. 2–6.
4. Дульский Е.Ю., Доценко Н.С., Лыткина Е.М. Исследование эффективности конвективного и терморadiационного методов капсулирования изоляции обмоток при ремонте электрических машин тягового подвижного состава // *Изв. Транссиба*. 2014. № 1 (17). С. 14–19.
5. Дульский Е.Ю., Лыткина Е.М., Худоногов А.М. Влияние химических свойств полимеров и режимов энергоподвода на прочность и пластичность изоляции в локальных технологиях продления ресурса электрических машин тягового подвижного состава // *Изв. Транссиба*. 2015. № 1 (21). С. 6–11.
6. Лесовик Р.В., Клюев С.В., Клюев А.В. Основы оптимизации строительных конструкций // *Вестн. БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2008. №2. С. 4–7.
7. Власенков А.Н., Павлов А.П., Пасечник Д.Ю. Оптимизация конструкций изделий с применением систем автоматической оптимизации // *Наука и бизнес: пути развития*. 2020. № 10 (112). С. 16–21.
8. Ольхов Я.И., Андронников А.В. Автоматизированное оптимальное проектирование пространственных металлических стержневых конструкций (ПМСК) с использованием алгоритмов структурной оптимизации // *Изв. высш. учеб. заведений. Строительство*. 2003. № 12 (540). С. 8–13.
9. Чемодуров В.Т., Вдовиченко В.В. Оптимизация параметров строительных конструкций на этапе проектирования // *Современные технологии в строительстве, дизайне, архитектуре : сб. материалов междунар. науч. конф.* 2013. С. 84–91.
10. Литра А.Н. Оптимизация конструкций с помощью новых программных методов // *Проблемы развития автоматизации и механизации процессов добычи, переработки и транспорта газа и газового конденсата : материалы науч.-техн. конф.* Краснодар, 2008. С. 90–93.
11. Грузоподъемные машины: учебник для вузов по специальности «Подъемно-транспортные машины и оборудование» / Александров М.П., Колобов Л.Н., Лобов Н.А. и др. М. : Машиностроение, 1986. 400 с.
12. Гребенюк Г.И., Бирюлев В.В. Оптимизация узлов и соединений строительных конструкций // *Изв. высш. учеб. заведений. Строительство*. 1994. № 11. С. 15–21.
13. Доможиров Л.И. Оптимизация коэффициента запаса прочности крупногабаритных деталей с учетом малых дефектов // *Тяжелое машиностроение*. 2006. № 1. С. 35–39.
14. Билык Н.А. Коэффициенты безопасности и запаса прочности механических конструкций // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2017. № 5. С. 63–70.
15. Серпик И.Н., Алексейцев А.В. Оптимизация металлических конструкций путем эволюционного моделирования. М. : АСВ, 2012. 240 с.
16. Юрьев А.Г. Основы проектирования рациональных несущих конструкций. Белгород : БТИСМ, 1988. 94 с.
17. Юрьев А.Г., Клюев С.В. Эволюционные и генетические алгоритмы оптимизации строительных конструкций. Белгород : Изд-во БГТУ, 2006. 134 с.
18. Мажид К.И. Оптимальное проектирование конструкций. М. : Высш. шк., 1979. 237 с.

References

1. Ivanova A.P., Chumak A.N. Optimal'noe proektirovanie stropil'noi metallicheskoj fermy s uchyotom vozmozhnykh povrezhdenii eyo otdel'nykh elementov [Optimal design of a metal truss taking into account possible damage to its individual elements]. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost' [Construction and technogenic safety]*, 2014. No. 49. Pp. 12–17.
2. Khudonogov A.M., Ivanov P.Yu., Manuilov N.I., Dul'skii E.Yu. Upravlenie operativnymi protsessami raboty sortirovochnoi stantsii na osnove primeneniya iskusstvennykh neironnykh setei [Control of operational processes of the marshalling station activity based on the use of artificial neural networks]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya [Proceedings of the St. Petersburg University of Railway Transport]*, 2018. Vol. 15. No. 1. Pp. 130–135.
3. Ivanov P.Yu., Dul'skii E.Yu., Khudonogov A.M. Sostoyanie voprosa nadezhnosti i dolgovechnosti izolyatsii asinkhronnykh vspomogatel'nykh mashin [The state of the issue of reliability and durability of isolation of asynchronous auxiliary machines]. *Izvestiya Transsiba [Journal of Transsib Railway Studies]*, 2015. No. 2 (22). Pp. 2–6.
4. Dul'skii E.Yu., Dotsenko N.S., Lytkina E.M. Issledovanie effektivnosti konvektivnogo i termoradiatsionnogo metodov kapsulirovaniya izolyatsii obmotok pri remonte elektricheskikh mashin tyagovogo podvizhnogo sostava [Investigation of the effectiveness of convective and thermoradiative methods of encapsulating the insulation of windings in the repair of electric machines of traction rolling stock]. *Izvestiya Transsiba [Journal of Transsib Railway Studies]*, 2014. No. 1 (17). Pp. 14–19.
5. Dul'skii E.Yu., Lytkina E.M., Khudonogov A.M. Vliyaniye khimicheskikh svoystv polimerov i rezhimov ik-energopodvoda na prochnost' i plastichnost' izolyatsii v lokal'nykh tekhnologiyakh prodleniya resursa elektricheskikh mashin tyagovogo podvizhnogo sostava [Influence of chemical properties of polymers and modes of IR power supply on the strength and plasticity of insulation in local technologies of extending the life of electric machines of traction rolling stock]. *Izvestiya Transsiba [Journal of Transsib Railway Studies]*, 2015. No. 1 (21). Pp. 6–11.
6. Lesovik R.V., Klyuev S.V., Klyuev A.V. Osnovy optimizatsii stroitelnykh konstruksii [Fundamentals of optimization of construction structures]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova [The Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov]*, 2008. No. 2. Pp. 4–7.

7. Vlasenkov A.N., Pavlov A.P., Pasechnik D.Yu. Optimizatsiya konstruktssii izdelii s primeneniem sistem avtomaticheskoi optimizatsii [Optimization of product structures with the use of automatic optimization systems]. *Nauka i biznes: puti razvitiya* [Science and business: ways of development]. 2020. No. 10 (112). Pp. 16–21.
8. Ol'kov Ya.I., Andronnikov A.V. Avtomatizirovanoe optimal'noe proektirovanie prostranstvennykh metallicheskih sterzhnevyykh konstruktssii (PMSK) s ispol'zovaniem algoritmov strukturnoi optimizatsii [Automated optimal design of spatial metal rod structures (SMRS) with the use of structural optimization algorithms]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo* [Proceedings of universities. Investment. Construction], 2003. No. 12 (540). Pp. 8–13.
9. Chemodurov V.T., Vdovichenko V.V. Optimizatsiya parametrov stroitel'nykh konstruktssii na etape proektirovaniya [Optimization of the parameters of building constructions at the design stage]. *Sovremenne tekhnologii v stroitel'stve, dizaine, arkhitekture. Sbornik materialov mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii* [Modern technologies in construction, design, and architecture. Collection of materials of the International scientific conference], 2013. Pp. 84–91.
10. Litra A.N. Optimizatsiya konstruktssii s pomoshch'yu novykh programmykh metodov [Optimization of structures with the help of new program methods]. *Problemy razvitiya avtomatizatsii i mekhanizatsii protsessov dobychi, pererabotki i transporta gaza i gazovogo kondensata. Materialy nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Problems of development of automation and mechanization of processes of production, processing and transport of gas and gas condensate. Materials of the scientific and technical conference]. ООО "Izdatel'skii dom – Yug", ОАО "SPA "Promavtomatika" Publ., 2008. Pp. 90–93.
11. Aleksandrov M.P., Kolobov L.N., Lobov N.A., etc. Gruzopod'yomnye mashiny: Uchebnik dlya vuzov po spetsial'nosti "Pod'emno-transportnye mashiny i oborudovanie" [Lifting machines: A textbook for universities on the specialty "Lifting and transport machines and equipment"]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1986. 400 p.
12. Grebenyuk G.I., Biryulov V.V. Optimizatsiya uzlov i soedinenii stroitel'nykh konstruktssii [Optimization of assemblies and connections of building constructions]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo* [Proceedings of higher educational institutions. Construction], 1994. No. 11. Pp. 15–21.
13. Domozhirov L.I. Optimizatsiya koeffitsienta zapasa prochnosti krupnogabaritnykh detalei s uchetom malyykh defektov [Optimization of the factor of safety margin of large-sized parts taking into account small defects]. *Tyazheloe mashinostroenie* [Heavy engineering], 2006. No. 1. Pp. 35–39.
14. Bilyk N.A. Koeffitsienty bezopasnosti i zapasa prochnosti mekhanicheskikh konstruktssii [Coefficients of safety and margin of safety of mechanical structures]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Journal of machinery manufacture and reliability], 2017. No. 5. Pp. 63–70.
15. Serpik I.N., Alekseitsev A.V. Optimizatsiya metallicheskih konstruktssii putyom evolyutsionnogo modelirovaniya [Optimization of metal structures by evolution modeling]. Moscow: DIA Publ., 2012. 240 p.
16. Yur'ev A.G. Osnovy proektirovaniya ratsional'nykh nesushchikh konstruktssii [Fundamentals of designing rational load-bearing structures]. Belgorod: BTISM Publ., 1988. 94 p.
17. Yur'ev A.G., Klyuev S.V. Evolyutsionnye i geneticheskie algoritmy optimizatsii stroitel'nykh konstruktssii [Evolutionary and genetic algorithms for optimizing building structures]. Belgorod: BSTU Publ., 2006. 134 p.
18. Mazhid K.I. Optimal'noe proektirovanie konstruktssii [Optimal design of structures]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1979. 237 p.

Информация об авторах

Трескин Сергей Викторович – Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: sergei.tresckin@yandex.ru

Новиков Николай Николаевич – аспирант, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: novikovnikolayn@mail.ru

Иванов Павел Юрьевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: savl.ivanov@mail.ru

Дульский Евгений Юрьевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: e.dulskiy@mail.ru

Information about the authors

Sergei V. Treskin – Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: sergei.tresckin@yandex.ru

Nikolai N. Novikov – Ph.D. student, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: novikovnikolayn@mail.ru

Pavel Yu. Ivanov – Ph. D. of Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Subdepartment of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: savl.ivanov@mail.ru

Evgenii Yu. Dulskii – Ph. D. of Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Subdepartment of Railcars and Railcar Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: e.dulskiy@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.2(70).17-24

УДК 62-97/98

Расчет шестифазной линейной электрической цепи методом симметричных составляющих

А. В. Данеев¹✉, Р. А. Данеев², В. Н. Сизых¹

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

² Восточно-Сибирский институт МВД России, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ daneev@mail.ru

Резюме

На промышленных объектах многие проблемы возникают из-за синхронных машин, которые работают на выпрямительную (несимметричную) нагрузку. В них важную роль играют переходные процессы, которые в синхронных машинах описываются системой нелинейных дифференциальных уравнений. При исследовании синхронных машин достаточно рассмотреть электромагнитные переходные процессы в силу большой инерционной постоянной машины. Уравнения становятся линейными, но с периодическими коэффициентами, которые также не имеют общего решения, поскольку содержат периодические коэффициенты. Возможности практического применения таких уравнений ограничиваются в общем случае трудностями, связанными с определением собственных чисел. В работе применяется метод симметричных составляющих, являющийся основным методом расчета несимметричных установившихся режимов линейных трехфазных (многофазных) цепей, содержащих в качестве источника электрической энергии или нагрузки вращающиеся машины. Исследование проводится на примере шестифазной цепи с несимметричной нагрузкой. В рассмотренном методе на основании законов Кирхгофа составляется система уравнений, в которых несимметричные системы переменных, действующие в линейной многофазной цепи, заменяются симметричными системами, три из которых являются симметричными системами прямой, обратной и нулевой последовательностей. Для каждой из последовательностей расчетным или экспериментальным путем определяются параметры электрической цепи (например, электрических машин). Преобразованная с учетом этих параметров система уравнений решается относительно неизвестных симметричных составляющих переменных (токов и напряжений). Действительные, несимметричные токи и напряжения находятся методом суперпозиций как векторные суммы соответствующих симметричных составляющих каждой из фаз.

Ключевые слова

синхронные машины, переходные процессы, несимметричные режимы, метод симметричных составляющих

Для цитирования

Данеев А. В. Расчет шестифазной линейной электрической цепи методом симметричных составляющих / А. В. Данеев, Р. А. Данеев, В. Н. Сизых // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 2 (70). – С. 17–24. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).17-24

Информация о статье

поступила в редакцию: 10.04.2021, поступила после рецензирования: 02.05.2021, принята к публикации: 11.05.2021

Calculation of a six-phase linear electric circuit by the method of symmetrical components

A. V. Daneev¹✉, R. A. Daneev², V. N. Sizykh¹

¹ Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

² the East-Siberian Institute of the MIA of Russia, Irkutsk, the Russian Federation

✉ daneev@mail.ru

Abstract

At industrial facilities many problems are associated with synchronous machines that determine the rectifier (unbalanced) load. Transient processes play a fundamental role in them, which are described by a system of nonlinear differential equations in synchronous machines. When studying synchronous machines, it is enough to consider electromagnetic transient processes due to the large inertial constant of the machine. The equations become linear, but with periodic coefficients that also do not have a general solution, since they contain periodic coefficients. The practical applicability of these equations is generally limited by the difficulties associated with determining the eigenvalues. The work uses the method of symmetrical components, which is the main method for calculating asymmetric steady-state modes of linear three-phase (multiphase) circuits containing rotating machines as a source of electrical energy or load. The research is carried out on the example of a six-phase circuit with an unbalanced load. In the considered method, on the basis of Kirchhoff's laws, a system of equations is drawn up, in which asymmetric systems of variables acting in a linear polyphaser circuit are replaced by symmetric systems, three of which are symmetric systems of direct, reverse and zero sequences. For each of the sequences, the parameters of the electrical circuit (for example, electrical machines) are determined experimentally or by calculation. The system of equations transformed taking into account these parameters is solved with respect to the unknown symmetric components of the variables (currents and voltages). Valid asymmetric currents and voltages are found by the superposition method as vector sums of the corresponding symmetric components of each phase.

Keywords

synchronous machines, transients, unbalanced modes, method of symmetrical components

For citation

Daneev A.V., Daneev R.A., Sizykh V.N. Calculation of a six-phase linear electric circuit by the method of symmetric components [Calculation of a six-phase linear electric circuit by the method of symmetrical components]. *Sovremennye tekhnologii*.

Article Info

Received: 10.04.2021, Revised: 02.05.2021, Accepted: 11.05.2021

Введение

Метод симметричных составляющих (СС) является основным методом расчета несимметричных установившихся режимов линейных трехфазных (многофазных) цепей, содержащих в качестве источника электрической энергии или нагрузки вращающиеся машины [1].

Сущность метода СС заключается в следующем:

1. На основании законов Кирхгофа составляется система уравнений, в которых несимметричные системы переменных электро-движущие силы (ЭДС, токи, напряжения), действующие в линейной многофазной цепи, заменяются m (m – число фаз) симметричными системами, три из которых являются симметричными системами прямой, обратной и нулевой последовательностей.

2. Для каждой из последовательностей расчетным или экспериментальным путем определяются параметры электрической цепи (например, электрических машин).

3. Преобразованная с учетом этих параметров система уравнений решается относительно неизвестных симметричных составляющих переменных (токов и напряжений) при заданных ЭДС источника.

4. Действительные, несимметричные токи и напряжения находятся методом суперпозиций как векторные суммы соответствующих СС каждой из фаз.

Расчет шестифазной линейной электрической цепи

Рассмотрим методику расчета многофазной электрической цепи методом СС на примере шести-фазной цепи с несимметричной нагрузкой (рис. 1). Здесь источник электрической энергии представлен в виде шести несинусоидальных ЭДС $\dot{E}_1, \dots, \dot{E}_6$ с взаимно-индуктивными связями между фазами.

Данная методика определяется следующей последовательностью расчета:

1. Исходную цилиндрическую матрицу полных сопротивлений электрической цепи определим, как циклическую перестановку фазных импедансов:

$$Z = \begin{bmatrix} Z & Z_m & Z'_m & Z'_0 & Z'_m & Z'_m \\ Z_m & Z & Z_m & Z'_m & Z'_0 & Z'_m \\ Z'_m & Z'_m & Z & Z_m & Z'_m & Z'_0 \\ Z'_0 & Z'_m & Z_m & Z & Z_m & Z'_m \\ Z'_m & Z'_0 & Z'_m & Z_m & Z & Z_m \\ Z_m & Z'_m & Z'_0 & Z'_m & Z_m & Z \end{bmatrix},$$

где обозначения импедансов соответствуют замене реальной схемы соединения обмотки «отдельными» катушками с учетом магнитных связей между ними [2].

2. Запишем уравнения баланса напряжений:

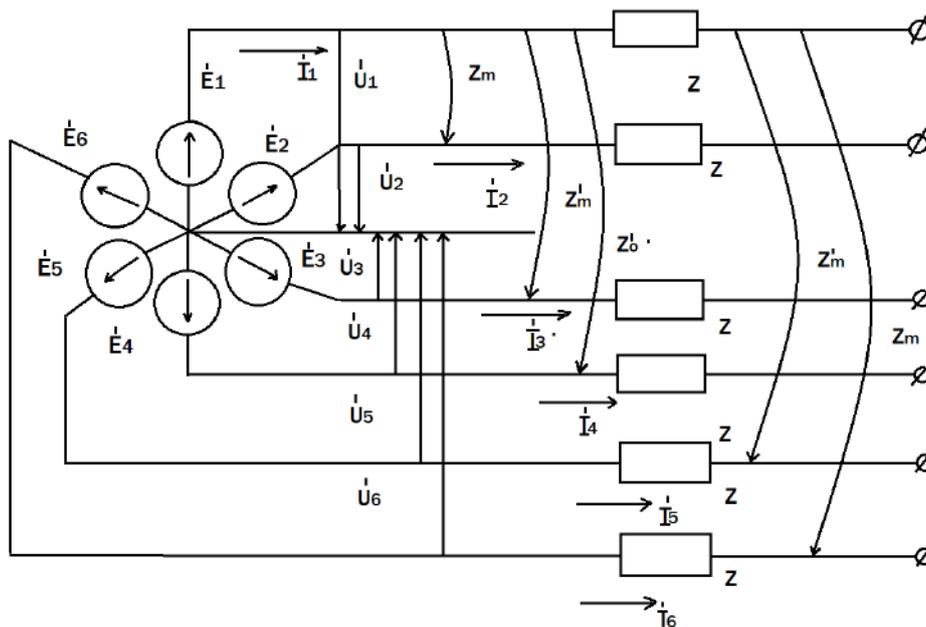


Рис. 1. Шестифазная цепь с несимметричной нагрузкой
Fig. 1. Six-phase circuit with an unbalanced load

$$\dot{U} = \dot{E} - Z\dot{I}, \quad (1)$$

где $\dot{I} = \text{colon}(\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dots, \dot{I}_6)$, $\dot{U} = \text{colon}(\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dots, \dot{U}_6)$, $\dot{E} = \text{colon}(\dot{E}_1, \dot{E}_2, \dots, \dot{E}_6)$ – векторы-столбцы разных токов и напряжений, ЭДС источника размерности 6×1 .

3. Преобразуем уравнения (1) в уравнения симметричных составляющих переменных с помощью подстановки:

$$\dot{X} = V_{CC} \cdot \dot{X}'$$

где $\dot{X}' = \dot{I}', \dot{U}', \dot{E}'$ – переменные СС различных последовательностей систем векторов (рис. 2).

Здесь матрица преобразования к симметричным составляющим при правом направлении вращения систем векторов (по часовой стрелке):

$$U_{CC} = 6 \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^5 & a^4 & a^3 & a^2 & a \\ 1 & a^4 & a^2 & 1 & a^4 & a^2 \\ 1 & a^3 & 1 & a^3 & 1 & a^3 \\ 1 & a^2 & a^4 & 1 & a^2 & a^4 \\ 1 & a & a^2 & a^3 & a^4 & a^5 \end{pmatrix}.$$

Преобразованные уравнения имеют вид:

$$\dot{U}' = \dot{E}' - (V_{CC}^{-1} \cdot Z \cdot V_{CC}) \cdot \dot{I}', \quad (2)$$

где $V_{CC}^{-1} = V_{CC}^*$ (обратная матрица равна комплексно-сопряженной в силу свойств оператора,

$a = \exp\left(j \cdot \frac{\pi}{3}\right)$; $a^6 = 1$, $1 + a + a^2 + \dots + a^5 = 0$,

$a^5 = a^*$, ..., $a = a^{-5} = a^{5*}$);

$$V_{CC}^{-1} \cdot Z \cdot V_{CC} = \text{diag}(Z_0, Z_1, \dots, Z_5);$$

$Z_0 = Z + Z_M + Z'_M + Z'_0 + Z'_M + Z_M$ – полное сопротивление для токов нулевой последовательности (рис. 2в);

$Z_1 = Z + a^5 \cdot Z_M + a^4 \cdot Z'_M + a^3 \cdot Z'_0 + a^2 \cdot Z'_M + a \cdot Z_M$ – полное сопротивление для токов прямой последовательности (2а);

$$Z_2 = Z + a^4 \cdot Z_M + a^2 \cdot Z'_M + Z'_0 + a^4 \cdot Z'_M + a^2 \cdot Z_M$$

– полное сопротивление для токов последовательности, образующей первую трехфазную систему векторов (2в);

$Z_3 = Z + a^3 \cdot Z_M + Z'_M + a^3 \cdot Z'_0 + Z'_M + a^3 \cdot Z_M$ – полное сопротивление для токов последовательности, в которой три вектора направлены встречно другим векторам ($a^3 = -1$) (2е);

$Z_4 = Z + a^2 \cdot Z_M + a^4 \cdot Z'_M + Z'_0 + a^2 \cdot Z'_M + a^4 \cdot Z_M$ – полное сопротивление для токов последовательности, образующей вторую трехфазную систему векторов (2д);

$$Z_5 = Z + a \cdot Z_M + a^2 \cdot Z'_M + a^3 \cdot Z'_0 + a^4 \cdot Z'_M + a^5 \cdot Z_M$$

– полное сопротивление для токов обратной последовательности (2б); $\dot{I}' = \text{colon}(\dot{I}'_{10}, \dot{I}'_{11}, \dot{I}'_{12}, \dots, \dot{I}'_{15})$,

$$\dot{U}' = \text{colon}(\dot{U}'_{10}, \dot{U}'_{11}, \dot{U}'_{12}, \dots, \dot{U}'_{15})$$

$\dot{E}' = \text{colon}(\dot{E}'_{10}, \dot{E}'_{11}, \dot{E}'_{12}, \dots, \dot{E}'_{15})$ – вектор-столбцы токов напряжений и ЭДС симметричных составляющих.

В частном случае, когда шестифазная обмотка магнито-связанной электрической цепи является симметричной, т. е. $\dot{E}_2 = a^5 \cdot \dot{E}_1$, $\dot{E}_3 = a^4 \cdot \dot{E}_1$, ..., $\dot{E}_6 = a \cdot \dot{E}_1$, в

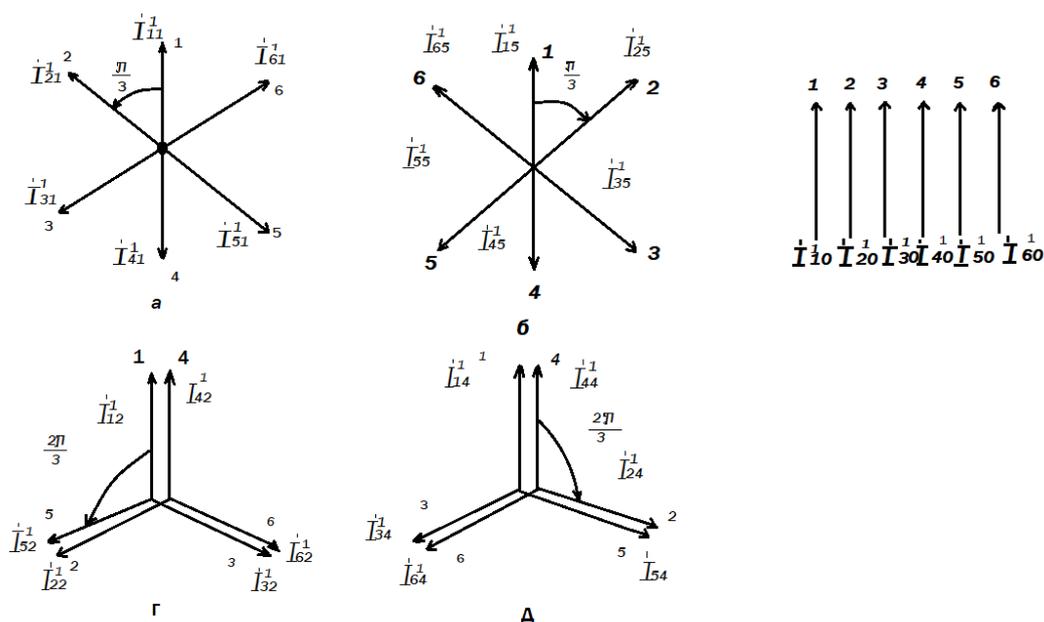


Рис. 2. Последовательность симметричных составляющих
Fig. 2. Sequence of symmetrical components

силу свойств оператора a имеем $\dot{E}' = \text{colom} \left(0,6^{\frac{1}{2}} \cdot \dot{E}_{1,\dots,0} \right)$.

Следовательно, уравнения (2) примут вид:

$$\begin{cases} \dot{U}'_{10} = -z_0 \cdot \dot{I}'_{10}, \\ \dot{U}'_{11} = 6^{\frac{1}{2}} \cdot \dot{E}'_1 - z_1 \cdot \dot{I}'_{11}, \\ \dot{U}'_{12} = -z_2 \cdot \dot{I}'_{12}, \\ \dot{U}'_{13} = -z_3 \cdot \dot{I}'_{13}, \\ \dot{U}'_{14} = -z_4 \cdot \dot{I}'_{14}, \\ \dot{U}'_{15} = -z_5 \cdot \dot{I}'_{15}. \end{cases}$$

Пример

В работах [3–4] на основе математической модели (ММ) шестифазного магнитоэлектрического генератора (МЭГ) в фазовых координатах (ФК), в осях $d, q, 0$, а также методом СС произведен на электровычислительной машине расчет в физических единицах электромагнитных переходных процессов. Далее показан график переходных процессов фазных токов при номинальной нагрузке (рис. 3). Расчетные данные в параметры генератора следующие: мощность – $S_n = 18 \text{ кВ}\cdot\text{А}$; частота вращения – $n = 8000 \text{ об/мин}$; частота ЭДС – $f = 1066 \text{ Гц}$; действующие значения фазных токов и напряжений – $I_{\phi n} = 1 \text{ А}$, $E_{\phi n} = 28,5 \text{ В}$; индуктивные параметры обмотки – $L_s = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$, $L_{aq} = 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$; коэффициент мощности – $\cos F = 0,8$ [5].

При математическом описании переходных процессов МЭГ демпфирующие свойства постоянного момента (ПМ) и биметаллической обоймы не учитывались.

ММ в ФК была составлена двумя способами: с численным и аналитическим вычислением матрицы периодических коэффициентов $A(t)$.

По результатам моделирования в ФК можно определить действующие значения токов и напряжений. Для этого достаточно согласно ГОСТ 19705-81 построить огибающую переходных процессов по амплитудным значениям фазных переменных и уменьшить ее значение в $\sqrt{2}$ раз. Однако такой переход можно выполнить непосредственно в модели по следующим формулам:

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{0,5 \cdot k_1 \cdot \left(\sum_{j=1}^2 (i_{aj}^2 + i_{bj}^2 + i_{cj}^2) \right)}, \\ U &= \sqrt{0,5 \cdot k_1 \cdot \left(\sum_{j=1}^2 (u_{aj}^2 + u_{bj}^2 + u_{cj}^2) \right)}. \end{aligned}$$

Действительно, для установившегося симметричного режима работы МЭГ

$$i_{aj} = I_m \cdot \sin(\gamma_i - \phi), \quad j_{cj} = I_m \cdot \sin\left(\gamma_i - \phi + \frac{2\pi}{3}\right),$$

где $j = 1, 2$; γ – угол между фазными токами и напряжениями при активно-индуктивной нагрузке генератора.

Так как

$$\sum_{j=1}^2 (i_{aj}^2 + i_{bj}^2 + i_{cj}^2) = \frac{1}{k_1} \cdot I_m^2, \quad (3)$$

то для того, чтобы выполнить соотношения $I = I_m / \sqrt{2}$, $U = U_m / \sqrt{2}$, необходимо домножить обе части тождества (3) на коэффициент k_1 , учитывающий равенство амплитуды изображающего вектора фазных токов и напряжений амплитуде тока и напряжения одной фазы.

Для нашего случая можно записать:

$$i = y + f_1(t).$$

В предложении, что $f_1(t)$ – вектор, элементы которого являются малыми периодически изменяющимися величинами, имеют место следующие приближенные формулы:

$$I = \sqrt{0,5 \cdot k_1 \cdot \left(\sum_{i=1}^2 (i_{ai}^2 + i_{bi}^2 + i_{ci}^2) \right)}, \quad (4)$$

$$U = \sqrt{0,5 \cdot k_1 \cdot \left(\sum_{i=1}^2 (u_{ai}^2 + u_{bi}^2 + u_{ci}^2) \right)}, \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} U_{ai} &= L_H \cdot \frac{dy_{ai}}{dt} + R_H \cdot y_{ai}, \quad U_{bi} = L_H \cdot \frac{dy_{bi}}{dt} + R_H \cdot y_{bi}, \\ U_{ci} &= L_H \cdot \frac{dy_{ci}}{dt} + R_H \cdot y_{ci}; \quad i = 1, 2. \end{aligned}$$

Уравнения (4), (5) позволяют, аналогично преобразованию Парка – Горева и методу СС, определить действующие значения фазных токов и напряжений в ФК с обратным переходом к фазным переменным состояниям при исследовании симметричных режимов работы МЭГ. Такой переход осуществляется с помощью формул Эйлера для двух трехфазных СС со сдвигом 60° , что позволяет указывать на эквивалентность ортогональных преобразований Парка – Гарева и метода СС в системе координат, связанной с вращающимся ротором синхронных машин (СМ).

Графики переходных процессов для действующего значения напряжения при номинальной нагрузке при моделировании в ФК, методом СС и в осях $d, q, 0$ изображены на (рис. 4).

Видно, что результаты расчета методом СС и в осях $d, q, 0$ незначительно отличаются от результатов моделирования в ФК. Относительная погрешность вычислений не превышает 0,5 % по сравнению с результатом моделирования в ФК.

Длительность переходных процессов исследуемого МЭГ составляет 0,36 мс, что примерно в 3 раза меньше периода изменения частоты ЭДС. Небольшая длительность переходных процессов в значительной степени определяется малыми индуктивностями обмотки статора, что является отличительной особенностью переходных процессов в ЭМ с ПМ.

В целях сравнения моделей по параметрическим возмущениям исследовались различные режимы

работы МЭГ. По результатам расчета в различных системах координат построена внешняя характеристика генератора (рис. 5). Результаты моделирования в ФК, методом СС и осях $d, q, 0$ при набросе нагрузки от нуля до четырех номиналов (4Н) практически совпадают. В диапазоне изменения нагрузки от 10 до 150 % падение напряжения ΔU_1 составило 5,4 В, что позволяет сделать вывод о жесткости внешней характеристики МЭГ. Рабочий диапазон определяется точками пересечения внешней характеристики генератора с вольт-амперными характеристиками нагрузки $U_{H1} = f(I_{H1})$ и $U_{H2} = f(I_{H2})$ (рис. 5). Цифровое моделирование показывает, что при решении уравнений МЭГ методом СС затраты машинного времени сокращаются в 13–14 раз по сравнению с временем счета в ФК. Погрешность вычислений методом СС по сравнению с результатом моделирования в ФК не превышает 0,1 %.

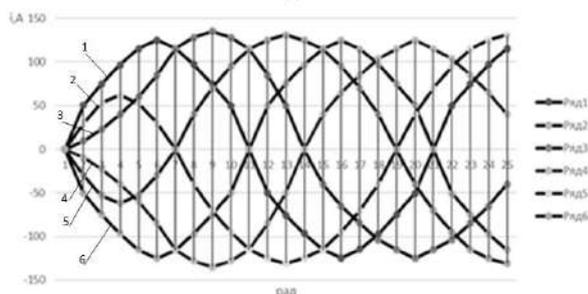


Рис. 3. Переходные процессы фазных токов при номинальной нагрузке

Fig. 3. Transient processes of phase currents at the rated load

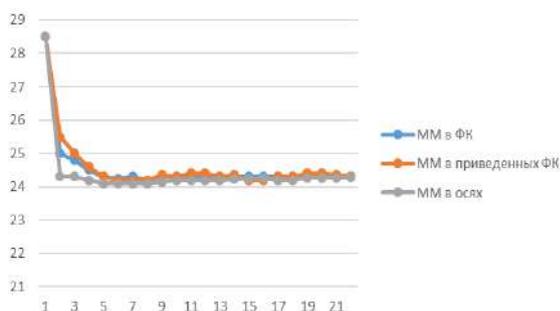


Рис. 4. Переходные процессы для действующего значения напряжения при номинальной нагрузке

Fig. 4. RMS voltage transients at the rated load

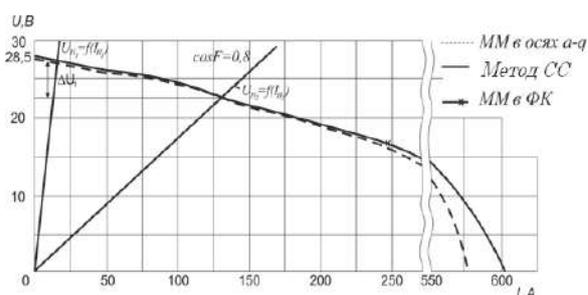


Рис. 5. Внешняя характеристика генератора
Fig. 5. External characteristic of the generator

Обобщая изложенное, можно сказать, что при использовании симметричных режимов работы МЭГ целесообразно использовать ММ метода СС и ММ в осях $d, q, 0$. Результат моделирования получается в действующих значениях фазных токов и напряжений.

Таким образом, моделирование методом СС позволяет получить результаты, удовлетворяющие по точности вычислений расчету в ФК, но с существенно меньшими вычислительными затратами. В то же время данный метод не имеет ограничений метода во вращающихся осях $d, q, 0$ при исследовании несимметричных режимов работы МЭГ. Ряд близких и смежных вопросов моделирования объектов различной природы рассмотрен в работах [6–20].

Заключение

На примере шестифазной магнитно-связанной электрической цепи в статье изложены основные этапы применения метода СС при расчете установившихся режимов многофазных цепей. Преобразование СС многофазных цепей диагонализует матрицу полных сопротивлений, т. е. позволяет исключить магнитно-связанные контуры высоких порядков. В симметричной многофазной электрической цепи индуцируется только ЭДС прямой последовательности. В отличие от преобразования Парка – Горева метод СС позволяет исследовать как симметричные, так и несимметричные переходные режимы в СМ.

Список литературы

1. Сипайлов Г.А., Лоос А.В. Математическое моделирование электрических машин. М. : Высш. шк., 1980. 175 с.
2. Крон Т. Тензорный анализ сетей. М. : Советское радио, 1978. 720 с.
3. Данеев А.В., Данеев Р.А. Сизых В.Н. Моделирование многофазных синхронных машин в различных системах координат // Изв. Самар. науч. центра Рос. академии наук. 2020. Т. 22, № 4. С. 104–115.
4. Силин Л.Ф. Проектирование асинхронных двигателей. Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2002. 236 с.
5. Особенности электромагнитного расчета генераторов с редкоземельными постоянными магнитами / И.И. Алексеев, Б.С. Зайчихин, М.Г. Клейман и др. // Электричество. 1985. № 11. С. 27–30.

6. Горев А.А. Переходные процессы синхронной машины. М.-Л. : Госэнергоиздат, 1950. 551 с.
7. Арешян Г.Л. Вопросы преобразования дифференциальных уравнений многофазных электрических машин // Изв. Академии наук СССР. Энергетика и транспорт. 1982. № 5. С. 52–62.
8. Осин И.Л., Шакарян Ю.Г. Электрические машины. М. : Высш. шк., 1990. 304 с.
9. Сизых В.Н., Мухопад А.Ю. Ассоциативный автомат адаптивного управления технологическими процессами на основе нейронных сетей // Науч. вестн. Новосиб. гос. техн. ун-та. 2014. № 1 (54). С. 34–45.
10. Сизых В.Н. Итерационно-релаксационный метод // Автоматика и телемеханика. 2005. № 6. С. 47–58.
11. Мухопад Ю.Ф., Пашков Н.Н., Сизых В.Н. Адаптивный подход к нейронному управлению одним классом абсолютно устойчивых систем // Фундаментальные исследования. 2011. № 8-1. С. 139–147.
12. К апостериорному моделированию нестационарных гиперболических систем / А.В. Данеев, В.А. Русанов, М.В. Русанов и др. // Изв. Самар. науч. центра Рос. академии наук. 2018. Т. 20. № 1 (81). С. 106–113.
13. Данеев А.В., Русанов В.А. Об одном классе сильных дифференциальных моделей над счетным множеством динамических процессов конечного характера // Изв. высш. учеб. заведений. Математика. 2000. № 2. С. 32–40.
14. Rusanov V.A., Antonova L.V., Daneev A.V. Inverse problem of nonlinear systems analysis: a behavioral approach // *Advances in Differential Equations and Control Processes*. 2012. Т. 10. № 2. Р. 69–88.
15. Данеев А.В., Русанов В.А., Шарпинский Д.Ю. Нестационарная реализация Калмана – Месаровича в конструкциях оператора Релея-Ритца // Кибернетика и системный анализ. 2007. № 1. С. 82–91.
16. Асинхронные двигатели общего назначения / Е.П. Бойко, Ю.В. Гаинцев, Ю.М. Ковалев и др. М. : Энергоиздат, 1980. 488 с.
17. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока. СПб. : Питер, 2007. 320 с.
18. Беспалов В.Я., Котеленец Н.Ф. Электрические машины. М. : Академия, 2010. 320 с.
19. Копылов И. П. Электрические машины. М. : Высш. шк.; Логос. 2006. 680 с.
20. Тер-Газарян Г.Н. Несимметричные режимы синхронных машин. М. : Энергия, 1969. 214 с.

References

1. Sipailov G.A., Loos A.V. Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin [Mathematical modeling of electrical machines]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1980. 175 p.
2. Kron T. Tenzornyi analiz setei [Tensor analysis of networks]. Moscow: Sovetskoe radio Publ., 1978. 720 p.
3. Daneev A.V., Daneev R.A., Sizykh V.N. Modelirovanie mnogofaznykh sinkhronnykh mashin v razlichnykh sistemakh koordinat [Simulation of multiphase synchronous machines in different coordinate systems]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi Akademii nauk [The Bulletin of the Samara scientific center of the Russian Academy of Sciences]*, 2020. Vol. 22, No. 4. Pp. 104–115.
4. Silin L.F. Proektirovanie asinkhronnykh dvigatelei [Design of asynchronous motors]. Krasnoyarsk: IPTs KSTU Publ., 2002. 236 p.
5. Alekseev I.I., Zaichikhin B.S., Kleiman M.G., Starovoitova N.P. Osobnosti elektromagnitnogo rascheta generatorov s redkozemel'nymi postoyannymi magnitami [Features of electromagnetic calculation of generators with rare-earth permanent magnets]. *Elektrichestvo [Electricity]*, 1985, No. 11. P. 27–30.
6. Gorev A.A. Perekhodnye protsessy sinkhronnoi mashiny [Transient processes of a synchronous machine]. Moscow: Gosenergoizdat Publ., 1950. 551 p.
7. Arshyan G.L. Voprosy preobrazovaniya differentsial'nykh uravnenii mnogofaznykh elektricheskikh mashin [Questions of transformation of differential equations of multiphase electrical machines]. *Izvestiya AN SSSR. Energetika i transport*, 1982. No. 5. Pp. 52–62.
8. Osin I.L., Shakaryan Yu.G. Elektricheskie mashiny [Electric cars]. Moscow: Higher school, 1990. 304 p.
9. Sizykh V.N., Mukhopad A.Yu. Assotsiativnyi avtomat adaptivnogo upravleniya tekhnologicheskimi protsessami na osnove neironnykh setei [Associative automaton of adaptive control of technological processes based on neural networks]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [The science bulletin of Novosibirsk State Technical University]*, 2014. No. 1 (54). Pp. 34–45.
10. Sizykh V.N. Iteratsionno-relaksatsionnyi metod [An iterative-relaxation method]. *Avtomatika i telemekhanika [Automation and telemechanics]*, 2005. No. 6. Pp. 47–58.
11. Mukhopad Yu.F., Pashkov N.N., Sizykh V.N. Adaptivnyi podkhod k neironnomu upravleniyu odnim klassom absolyutno ustoychivykh sistem [An adaptive approach to neural control for one class of absolutely stable systems]. *Fundamental'nye issledovaniya [Fundamental research]*, 2011. No. 8-1. Pp. 139–147.
12. Daneev A.V., Rusanov V.A., Rusanov M.V., Sizykh V.N. K aposteriornomu modelirovaniyu nestatsionarnykh giperbolicheskikh sistem [Towards a posteriori modeling of nonstationary hyperbolic systems]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk [The Bulletin of the Samara scientific center of the Russian Academy of Sciences]*, 2018. Vol. 20. No. 1 (81). Pp. 106–113.
13. Daneev A.V., Rusanov V.A. Ob odnom klasse sil'nykh differentsial'nykh modelei nad schetnym mnozhestvom dinamicheskikh protsessov konechnogo kharaktera [On a class of strong differential models over a countable set of dynamic processes of a finite nature]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Matematika [Proceedings of universities. Mathematics]*, 2000. No. 2. Pp. 32–40.
14. Rusanov V.A., Antonova L.V., Daneev A.V. Inverse problem of nonlinear systems analysis: a behavioral approach. *Advances in Differential Equations and Control Processes*, 2012. Vol. 10. No. 2. Pp. 69–88.

15. Daneev A.V., Rusanov V.A., Sharpinskiy D.Yu. Nestatsionarnaya realizatsiya Kalmana – Mesarovicha v konstruktsiyakh operatora Releya–Rittsa [Non-stationary realization of Kalman-Mesarovich in the constructions of the Rayleigh-Ritz operator]. *Kibernetika i sistemnyi analiz [Cybernetics and system analysis]*, 2007. No. 1. Pp. 82–91.

16. E.P. Boiko, Yu.V. Gaintsev, Yu.M. Kovalyov et al. Asinkhronnye dvigateli obshchego naznacheniya [Asynchronous motors of general purpose]. In Petrov V.M. and Kravchik A.E. (eds) Moscow: Energoizdat Publ., 1980. 488 p.

17. Vol'dek A.I., Popov V.V. Elektricheskie mashiny. Mashiny peremennogo toka [Electric cars. AC machines]. St. Petersburg: Piter Publ., 2007. 320 p.

18. Bespalov V.Ya., Kotelenets N.F. Elektricheskie mashiny [Electric cars]. Moscow: Academy Publishing center, 2010. 320 p.

19. Kopylov I.P. Elektricheskie mashiny [Electric machines]. Moscow: Vysshaya shkola; Logos Publ. 2006. 680 p.

20. Ter-Gazaryan G.N. Nesimmetrichnye rezhimy sinkhronnykh mashin [Asymmetrical modes of synchronous machines]. Moscow: Energiya Publ., 1969. 214 p.

Информация об авторах

Данеев Алексей Васильевич – профессор кафедры информационных систем и защиты информации, Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: daneev@mail.ru

Данеев Роман Алексеевич – доцент кафедры информационно-правовых дисциплин, Восточно-Сибирский институт МВД России, e-mail: romasun@mail.ru

Сизых Виктор Николаевич – профессор кафедры автоматизации производственных процессов, Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: szych_vn@mail.ru

Information about the authors

Aleksei V. Daneev – Professor of the Subdepartment of Information Systems and Information Security, Irkutsk State Transport University, e-mail: daneev@mail.ru

Roman A. Daneev – Associate Professor of the Subdepartment of Information technologies, East-Siberian Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, e-mail: romasun@mail.ru

Viktor N. Szykh – Professor of the Subdepartment of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, e-mail: szych_vn@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.2(70).24-30

УДК 621.833.65

Суперпозиция вращений в механизмах

И. П. Попов✉

Курганский государственный университет, г. Курган, Российская Федерация

✉ ip.popov@yandex.ru

Резюме

Предпосылкой рассмотрения суперпозиции вращений в механизмах является принцип суммирования прямолинейных равномерных движений. Цель работы – установить, как в подобной ситуации обстоит дело при сложении вращательных синхронных или кратных движений. Задачи исследования состоят в аналитическом описании и построении годографов комбинированных вращательных механических движений. Практический аспект темы определяется тем, что во многих механизмах, таких как мультиинертный осциллятор, планетарные передачи, приводы фрез в машинах для очистки труб больших диаметров и т. п. реализуется суммирование вращательных движений, и форма годографа является полезной информацией при проектировании подобных устройств. Установлено, что подобно тому, как результатом сложения двух равномерных прямолинейных движений является также равномерное прямолинейное движение, результатом сложения двух равномерных однонаправленных круговых движений является также равномерное круговое движение. Годографом при сложении двух равномерных противоположно направленных круговых движений будет эллипс. В частном случае эллипс может вырождаться в отрезок прямой линии. Определены характеристики эллиптического годографа, в том числе большая и малая полуоси, корни характеристического уравнения, эксцентриситет, фокусы, угол наклона осей. Решена обратная задача – определение скоростей вращения по виду годографа. При сложении двух несинхронных вращений возможны годографы в виде улитки, имеющей сходство с улиткой Паскаля. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании механизмов, реализующих сложные вращательные движения.

Ключевые слова

координаты, вращательные движения, вектор, годограф, эллипс, улитка Паскаля

Для цитирования

Попов И. П. Суперпозиция вращений в механизмах / И. П. Попов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 2 (70). – С. 24–30. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).24-30

Информация о статье

поступила в редакцию: 17.03.2021, поступила после рецензирования: 20.03.2021, принята к публикации: 11.04.2021

Superposition of rotations in mechanisms

I. P. Popov✉

Kurgan State University, Kurgan, the Russian Federation

✉ ip.popov@yandex.ru

Abstract

The prerequisite for consideration of the superposition of rotations in mechanisms is the principle of summation of rectilinear uniform movements. The purpose of the work is to establish how things are in a similar situation when adding rotational synchronous or multiple motions. The objectives of the research are the analytical description and construction of hodographs of combined rotational mechanical motions. The practical aspect of the topic is determined by the fact that in many mechanisms, such as a multi-inert oscillator, planetary gears, cutter drives in machines for cleaning pipes of large diameters, etc. summation of rotational motions is realized, and the shape of the hodograph is useful information in the design of such devices. It was found that, just as the result of the addition of two uniform rectilinear motions is also a uniform rectilinear motion, the result of the addition of two uniform unidirectional circular motions is also a uniform circular motion. When two uniform oppositely directed circular motions are added, the hodograph is an ellipse. In a particular case the ellipse can degenerate into a straight line segment. The characteristics of the elliptical hodograph are determined, including major and minor semiaxes, roots of the characteristic equation, eccentricity, foci, angle of inclination of the axes. The inverse problem – determination of the rotation speeds by the type of the hodograph – is solved. When two asynchronous rotations are added, the occurrence of hodographs in the form of a snail is possible, which is similar to Pascal's snail. The results obtained can be used in the design of mechanisms that implement complex rotational motions.

Keywords

coordinates, rotational motions, vector, hodograph, ellipse, Pascal's snail

For citation

Popov I.P. Superpozitsiya vrashchenii v mekhanizmax [Superposition of rotations in mechanisms]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 2 (70), pp. 24–30. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).24-30

Article info

Received: 17.03.2021, Revised: 20.03.2021, Accepted: 11.04.2021

Введение

Если система отсчета $x'O'y'$ движется прямолинейно и равномерно со скоростью V_1 в неподвижной системе отсчета xOy (рис. 1), и точка a движется прямолинейно и равномерно со скоростью V_2 в системе отсчета $x'O'y'$, то в соответствии с принципом относительности Галилея точка a движется прямолинейно и равномерно со скоростью V_3 в системе отсчета xOy , а годографом вектора A , соединяющего точки 0 и a , является прямая линия [1, 2].

Цель работы – установить, как в подобной ситуации обстоит дело при сложении вращательных синхронных движений [3–5]. Задачи исследования состоят в аналитическом описании и построении годографов движений.

Актуальность настоящего исследования определяется тем, что во многих механизмах, таких как мультиинертный осциллятор [6, 7], планетарные передачи [8–11], приводы фрез в машинах для очистки труб больших диаметров [12] и т. п. реализуется суммирование вращательных движений, и форма годографа является полезной информацией при проектировании подобных устройств [13–18].

Пусть точка O' вращается вокруг точки 0 в системе отсчета xOy с постоянной угловой скоростью ω . Расстояние ρ_1 между точками не меняется. Координатные оси обеих систем отсчета всегда попарно параллельны. Точка a вращается вокруг точки O' в

системе отсчета $x'O'y'$ с постоянной угловой скоростью $-\omega$ или $+\omega$. Расстояние ρ_2 между точками не меняется.

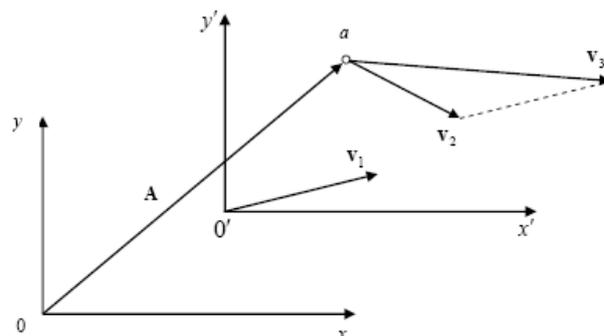


Рис. 1. Сложение движений
Fig. 1. Addition of motions

Разнонаправленные вращения

Теорема 1. При разнонаправленных вращениях точек a и O' годографом вектора A является эллипс.

Доказательство.

Координаты точки O' в системе xOy :

$$x_1 = \rho_1 \cos(\omega t + \varphi_1), \quad y_1 = \rho_1 \sin(\omega t + \varphi_1). \quad (1)$$

Координаты точки a в системе $x'O'y'$:

$$x_2 = \rho_2 \cos(-\omega t + \varphi_2), \quad y_2 = \rho_2 \sin(-\omega t + \varphi_2).$$

Здесь φ_1, φ_2 – начальные углы.

Координаты вектора A в системе xOy :

$$x = x_1 + x_2 = \rho_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + \rho_2 \cos(-\omega t + \varphi_2),$$

$$y = y_1 + y_2 = \rho_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + \rho_2 \sin(-\omega t + \varphi_2).$$

$$x = \cos \omega t (\rho_1 \cos \varphi_1 + \rho_2 \cos \varphi_2) - \\ - \sin \omega t (\rho_1 \sin \varphi_1 - \rho_2 \sin \varphi_2),$$

$$y = \sin \omega t (\rho_1 \cos \varphi_1 - \rho_2 \cos \varphi_2) + \\ + \cos \omega t (\rho_1 \sin \varphi_1 + \rho_2 \sin \varphi_2).$$

Отсюда следует, что

$$\sin \omega t = \frac{y(\rho_1 \cos \varphi_1 + \rho_2 \cos \varphi_2)}{\rho_1^2 - \rho_2^2} -$$

$$- \frac{x(\rho_1 \sin \varphi_1 + \rho_2 \sin \varphi_2)}{\rho_1^2 - \rho_2^2},$$

$$\cos \omega t = \frac{x(\rho_1 \cos \varphi_1 - \rho_2 \cos \varphi_2)}{\rho_1^2 - \rho_2^2} +$$

$$+ \frac{y(\rho_1 \sin \varphi_1 - \rho_2 \sin \varphi_2)}{\rho_1^2 - \rho_2^2}.$$

$$\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t = 1,$$

$$\frac{y^2 (\rho_1 \cos \varphi_1 + \rho_2 \cos \varphi_2)^2 + x^2 (\rho_1 \sin \varphi_1 + \rho_2 \sin \varphi_2)^2}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} -$$

$$- \frac{2xy(\rho_1 \cos \varphi_1 + \rho_2 \cos \varphi_2)(\rho_1 \sin \varphi_1 + \rho_2 \sin \varphi_2)}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} +$$

$$+ \frac{x^2 (\rho_1 \cos \varphi_1 - \rho_2 \cos \varphi_2)^2 + y^2 (\rho_1 \sin \varphi_1 - \rho_2 \sin \varphi_2)^2}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} +$$

$$+ \frac{2xy(\rho_1 \cos \varphi_1 - \rho_2 \cos \varphi_2)(\rho_1 \sin \varphi_1 - \rho_2 \sin \varphi_2)}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} = 1,$$

$$\frac{x^2 [\rho_1^2 + \rho_2^2 - 2\rho_1\rho_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2)]}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} +$$

$$+ \frac{y^2 [\rho_1^2 + \rho_2^2 + 2\rho_1\rho_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2)]}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} -$$

$$- \frac{4xy\rho_1\rho_2 \sin(\varphi_1 + \varphi_2)}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} = 1. \quad (2)$$

Это уравнение эллипса.

Теорема доказана.

Теорема 2. Большая и малая полуоси эллипса (2) равны соответственно $(\rho_1 + \rho_2)$ и $|\rho_1 - \rho_2|$.

Доказательство.

Обратным отсчетом времени можно добиться, чтобы $\varphi_1 = \varphi_2$, а поворотом координатных осей – чтобы $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$. Тогда (2) примет вид:

$$\frac{x^2 (\rho_1^2 + \rho_2^2 - 2\rho_1\rho_2)}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} + \frac{y^2 (\rho_1^2 + \rho_2^2 + 2\rho_1\rho_2)}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} = 1,$$

$$\frac{x^2}{(\rho_1 + \rho_2)^2} + \frac{y^2}{(\rho_1 - \rho_2)^2} = 1 \quad (3)$$

(канонический вид).

Теорема доказана.

Следствие 1. При $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ эллипс (2) вырождается в отрезок прямой линии длиной 4ρ .

Следствие 2. Корни характеристического уравнения эллипса равны

$$\lambda_1 = (\rho_1 + \rho_2)^2, \lambda_2 = (\rho_1 - \rho_2)^2.$$

Следствие 3. Эксцентриситет эллипса равен отношению среднегеометрического значения величин ρ_1 и ρ_2 к их среднearифметическому значению:

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\rho_1\rho_2}}{(\rho_1 + \rho_2)/2}.$$

Следствие 4. Фокусы эллипса (для канонической формулы (3)) равны

$$f_{1,2} = (\pm 2\sqrt{\rho_1\rho_2}, 0).$$

Теорема 3. Оси эллиптического годографа повернуты на угол $(\varphi_1 + \varphi_2)/2$ в системе отсчета xOy .

Доказательство.

При повороте координатных осей на угол $(\varphi_1 + \varphi_2)/2$ выражение (3) принимает вид:

$$\frac{\left(x \cos \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} + y \sin \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right)^2}{(\rho_1 + \rho_2)^2} +$$

$$+ \frac{\left(-x \sin \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} + y \cos \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right)^2}{(\rho_1 - \rho_2)^2} = 1,$$

$$\frac{x^2 [\rho_1^2 + \rho_2^2 - 2\rho_1\rho_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2)]}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} +$$

$$+ \frac{y^2 [\rho_1^2 + \rho_2^2 + 2\rho_1\rho_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2)]}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} -$$

$$- \frac{4xy\rho_1\rho_2 \sin(\varphi_1 + \varphi_2)}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} = 1,$$

что совпадает с (2).

Теорема доказана.

На (рис. 2) $\varphi_1 = 120^\circ$, $\varphi_2 = -30^\circ$, следовательно, оси эллипса повернуты на 45° .

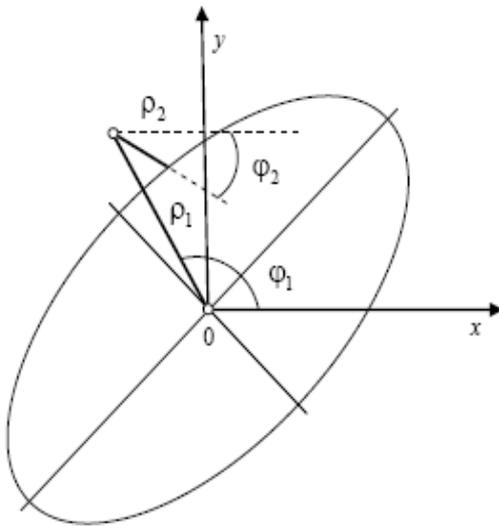


Рис. 2. Эллиптический годограф
Fig. 2. Elliptical hodograph

Теорема 4. Доказывается обратным ходом рассуждений.

Если годографом вектора A является эллипс с полуосями $(\rho_1 + \rho_2)$ и $|\rho_1 - \rho_2|$, то точка a вращается вокруг точки O' с постоянной угловой скоростью $-\omega$ в системе отсчета $x'O'y'$.

Однонаправленные вращения

Теорема 5. При однонаправленных вращениях точек a и O' годографом вектора A является окружность с центром в точке O .

Доказательство.

Координаты точки O' в системе xOy определяются выражением (1).

Координаты точки a в системе $x'O'y'$:

$$x_2 = \rho_2 \cos(\omega t + \varphi_2), \quad y_2 = \rho_2 \sin(\omega t + \varphi_2).$$

Координаты вектора A в системе xOy :

$$x_A = x_1 + x_2 = \rho_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + \rho_2 \cos(\omega t + \varphi_2),$$

$$y_A = y_1 + y_2 = \rho_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + \rho_2 \sin(\omega t + \varphi_2).$$

Квадрат вектора A равен

$$\begin{aligned} A^2 = x_A^2 + y_A^2 &= \rho_1^2 \cos^2(\omega t + \varphi_1) + \rho_2^2 \cos^2(\omega t + \varphi_2) + \\ &+ 2\rho_1\rho_2 \cos(\omega t + \varphi_1)\cos(\omega t + \varphi_2) + \\ &+ \rho_1^2 \sin^2(\omega t + \varphi_1) + \rho_2^2 \sin^2(\omega t + \varphi_2) + \\ &+ 2\rho_1\rho_2 \sin(\omega t + \varphi_1)\sin(\omega t + \varphi_2) = \\ &\dots \\ &= \rho_1^2 + \rho_2^2 + 2\rho_1\rho_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2). \end{aligned}$$

Длина вектора A неизменна, следовательно, его годографом является окружность.

Теорема доказана.

Следствие. Вектор A вращается с угловой скоростью ω в системе отсчета xOy .

Это вытекает из того, что форма треугольника $OO'a$ неизменна, а его сторона OO' вращается с угловой скоростью ω .

Теорема 6. Доказывается обратным ходом рассуждений.

Если годографом вектора A является окружность, то точка a вращается вокруг точки O' с постоянной угловой скоростью $+\omega$ в системе отсчета $x'O'y'$.

Теорема 7. Если точка a неподвижна в системе отсчета $x'O'y'$, то годографом вектора A является окружность радиуса ρ_1 , координаты центра которой в системе отсчета xOy равны $x_{\rho_1} = \rho_2 \cos \varphi_2$,

$$y_{\rho_1} = \rho_2 \sin \varphi_2.$$

Доказательство.

Координаты точки O' в системе xOy определяются выражением (1).

Координаты точки a в системе $x'O'y'$:

$$x_2 = \rho_2 \cos \varphi_2, \quad y_2 = \rho_2 \sin \varphi_2.$$

Координаты вектора A в системе xOy :

$$x_A = x_1 + x_2 = \rho_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + \rho_2 \cos \varphi_2,$$

$$y_A = y_1 + y_2 = \rho_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + \rho_2 \sin \varphi_2,$$

$$x_A - \rho_2 \cos \varphi_2 = \rho_1 \cos(\omega t + \varphi_1),$$

$$y_A - \rho_2 \sin \varphi_2 = \rho_1 \sin(\omega t + \varphi_1),$$

$$(x_A - \rho_2 \cos \varphi_2)^2 + (y_A - \rho_2 \sin \varphi_2)^2 = \rho_1^2.$$

Теорема доказана.

Пример сложения кратных вращений

Пусть точка a вращается вокруг точки O' в системе отсчета $x'O'y'$ с постоянной угловой скоростью $+2\omega$ и $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$.

Координаты точки O' в системе xOy :

$$x_1 = \rho_1 \cos \omega t, \quad y_1 = \rho_1 \sin \omega t.$$

Координаты точки a в системе $x'O'y'$:

$$x_2 = \rho_2 \cos 2\omega t, \quad y_2 = \rho_2 \sin 2\omega t.$$

Координаты вектора A в системе xOy :

$$x_A = \rho_1 \cos \omega t + \rho_2 \cos 2\omega t,$$

$$y_A = \rho_1 \sin \omega t + \rho_2 \sin 2\omega t.$$

Годограф вектора A (улитка) при $\rho_1 = \rho_2$ изображен далее (рис. 3).

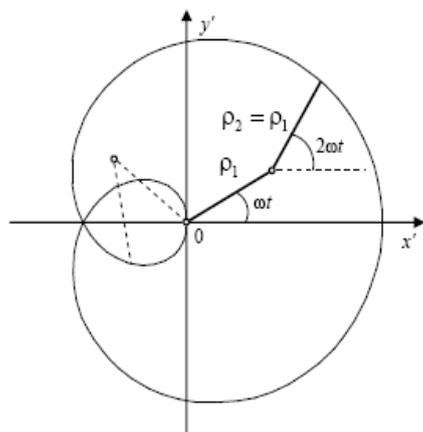


Рис. 3. Улиточный годограф
Fig. 3. Snail hodograph

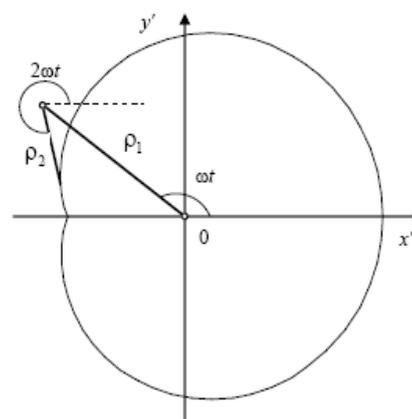


Рис. 4. Улиточный годограф без петли
Fig. 4. Snail hodograph without a loop

Уравнение этой улитки в полярных координатах имеет вид:

$$\rho = \rho_1 \sqrt{2 + 2 \cos \frac{2}{3} \varphi}.$$

Для сравнения дана формула улитки Паскаля, имеющая заметное внешнее сходство, –

$$\rho = b + a \cos \varphi.$$

Условием возникновения петли улиточного годографа является неравенство

$$\rho_1 \sin \omega t < \rho_2 \sin 2\omega t,$$

$$\rho_1 \sin \omega t < \rho_2 2 \sin \omega t \cos \omega t,$$

$$\rho_1 < 2\rho_2 \cos \omega t.$$

При $\rho_1 \geq 2\rho_2$ петля не возникает (рис. 4).

Заключение

Подобно тому, как результатом сложения двух равномерных прямолинейных движений является также равномерное прямолинейное движение, результатом сложения двух равномерных однонаправленных круговых движений является равномерное круговое движение.

Годографом при сложении двух равномерных противоположно направленных круговых движений является эллипс.

При сложении двух несинхронных вращений возможны годографы в виде улитки.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании механизмов, реализующих сложные вращательные движения.

Список литературы

1. Дубровин А.С., Хабибулина С.Ю. Принцип иерархичности в информатике и принципы физической относительности Галилея, Пуанкаре, Логунова // Междунар. журн. экспериментал. образования. 2014. № 5-2. С. 137–139.
2. Чилин В.И., Муминов К.К. Классификация путей в геометрии Галилея // Тавр. вестн. информатики и математики. 2017. № 1 (34). С. 95–111.
3. Бранец В.Н. Об изоморфизме математических описаний операции вращения // Изв. РАН. МТТ. 2018. № 2. С. 136–143.
4. Бычков Ю.П. О катании тела с ротором по подвижной опорной сфере // Прикладная математика и механика. 2015. Т. 79. Вып. 1. С. 99–111.
5. Сеницкий Ю.Э., Сеницкий А.Ю. К проблеме разложения по собственным вектор-функциям в нестационарных начально-краевых задачах динамики оболочек вращения // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер.: Физико-математические науки. 2004. № 30. С. 83–91.
6. Попов И.П. Теория мультиинертного осциллятора // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2020. № 1. С. 88–91.
7. Попов И.П. Моделирование триинертного осциллятора // Прикладная математика и вопросы управления. 2018. № 4. С. 73–79.
8. Приходько А.А., Смелягин А.И. Создание и исследование планетарных механизмов прерывистого движения с эллиптическими зубчатыми колесами // Вестн. Моск. гос. техн. ун-та им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2019. № 6 (129). С. 77–88.
9. Тимофеев Г.А., Самойлова М.В. Геометро-кинематическое исследование комбинированного планетарно-волнового механизма // Вестн. Моск. гос. техн. ун-та им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2012. № 1 (86). С. 70–80.
10. Борисенко Л.А., Калеев Д.Н. Типовой ряд планетарных механизмов на основе новой схемы двухступенчатого планетарного механизма // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. 2012. № 3 (36). С. 6–16.
11. Плеханов Ф.И., Молчанов С.М. Вопросы проектирования высоконагруженной планетарной передачи с роликовым механизмом снятия движения // Интеллектуальные системы в производстве. 2012. № 2 (20). С. 45–47.

12. Матасова Е.Ю., Виноградов Д.В. Корректировка подачи при фрезеровании криволинейных поверхностей // Изв. высш. учеб. заведений. Машиностроение. 2019. № 10 (715). С. 14–24.
13. Волошинов Д.В., Казначеева Е.С., Хайбрахманова Е.С. Преобразование инверсии в задачах проектирования поверхностей // Прикладная математика и вопросы управления. 2017. № 1. С. 14–26.
14. Маркеев А.П. О динамике спутника, несущего подвижную относительно него точечную массу // Изв. РАН. МТТ. 2015. № 6. С. 3–16.
15. Сумбатов А.С. О качении тяжелого диска по поверхности вращения отрицательной кривизны // Прикладная математика и механика. 2019. Т. 83. Вып. 2. С. 234–248.
16. Ван Л., Баранов А.А. Оптимальное удержание космического аппарата с двигателями малой тяги на солнечно-синхронной орбите // Вестн. Моск. гос. техн. ун-та им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2015. № 2 (101). С. 68–83.
17. Яшкин С.Н. К вопросу классификации вращений и связи мгновенных поворотов и непрерывных вращений // Изв. высш. учеб. заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2003. № 4. С. 3–15.
18. Усатая Т.В., Усатый Д.Ю., Свистунова Е.А. Трехмерное компьютерное моделирование в проектно-технологической деятельности // Автоматизированные технологии и производства. 2015. № 4 (10). С. 28–31.

References

1. Dubrovin A.S., Khabibulina S.Yu. Printsip ierarkhichnosti v informatike i printsipy fizicheskoi otnositel'nosti Galileya, Puankare, Logunova [The principle of hierarchy in computer science and the principles of physical relativity of Galileo, Poincaré, and Logunov]. *Mezhdunarodnyi zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya [International journal of experimental education]*, 2014. No. 5-2. Pp. 137–139.
2. Chilin V.I., Muminov K.K. Klassifikatsiya putei v geometrii Galileya [Classification of paths in the geometry of Galileo]. *Tavrisheskii vestnik informatiki i matematiki [Tavrishesky bulletin of informatics and mathematics]*, 2017. No. 1 (34). Pp. 95–111.
3. Branets V.N. Ob izomorfizme matematicheskikh opisaniy operatsii vrashcheniya [On the isomorphism of mathematical descriptions of the rotation operation]. *Izv. RAN. MTT [News RAS. MTT]*, 2018. No. 2. Pp. 136–143.
4. Bychkov Yu.P. O katanii tela s rotorom po podvizhnoi opornoj sfere [On the rolling of a body with a rotor on a movable support sphere]. *PMM [PMM]*, 2015. Vol. 79, iss. 1. Pp. 99–111.
5. Senitskii Yu.E., Senitskii A.Yu. K probleme razlozheniya po sobstvennym vektor-funktsiyam v nestatsionarnykh nachal'no-krayevykh zadachakh dinamiki obolochek vrashcheniya [On the problem of expansion in terms of eigenvector functions in nonstationary initial-boundary value problems of the dynamics of shells of revolution]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [The bulletin of Samara State Technical University. Series: Physics and Mathematics]*, 2004. No. 30. Pp. 83–91.
6. Popov I.P. Teoriya mult'itnertnogo ostsillyatora [The theory of a multi-inert oscillator]. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii [Problems of mechanical engineering and automation]*, 2020. No. 1, pp. 88–91.
7. Popov I.P. Modelirovanie triinertnogo ostsillyatora [Modeling a triinertial oscillator]. *Prikladnaya matematika i voprosy upravleniya [Applied mathematics and control issues]*, 2018, No. 4. Pp. 73–79.
8. Prikhod'ko A.A., Smelyagin A.I. Sozdaniye i issledovaniye planetarnykh mekhanizmov preryvistogo dvizheniya s ellipticheskimi zubchatymi kolesam [Creation and research of planetary mechanisms of intermittent motion with elliptical gears]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya Mashinostroenie [The bulletin of Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering]*, 2019. No. 6 (129). Pp. 77–88.
9. Timofeev G.A., SamoiloVA M.V. Geometro-kinematicheskoe issledovanie kombinirovannogo planetarno-volnovogo mekhanizma [Geometric-kinematic study of the combined planetary-wave mechanism]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya Mashinostroenie [The bulletin of Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering]*, 2012. No. 1 (86). Pp. 70–80.
10. Borisenko L.A., Kaleev D.N. Tipovoi ryad planetarnykh mekhanizmov na osnove novoi skhemy dvukhstupenchatogo planetarnogo mekhanizma [A typical series of planetary mechanisms based on a new scheme of a two-stage planetary mechanism]. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo universiteta [Bulletin of Belarusian-Russian University]*, 2012. No. 3 (36). Pp. 6–16.
11. Plekhanov F.I., Molchanov S.M. Voprosy proektirovaniya vysokonagruzhennoi planetarnoi peredachi s rolkovym mekhanizmom snyatiya dvizheniya [Issues of designing a highly loaded planetary gear with a roller mechanism for removing the motion]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve [Intelligent systems in production]*, 2012. No. 2 (20). Pp. 45–47.
12. Matasova E.Yu., Vinogradov D.V. Korrektirovka podachi pri frezerovanii krivolineinykh poverkhnostei [Correction of feed when milling curved surfaces]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie [News of higher educational institutions. Mechanical engineering]*, 2019. No. 10 (715). Pp. 14–24.
13. Voloshinov D.V., Kaznacheeva E.S., Khaybrakhmanova E.S. Preobrazovanie inversii v zadachakh proektirovaniya poverkhnostei [Inversion transformation in surface design problems]. *Prikladnaya matematika i voprosy upravleniya [Applied mathematics and control issues]*. 2017. No. 1. Pp. 14–26.
14. Markeev A.P. O dinamike sputnika, nesushchego podvizhnuyu otnositel'no nego tochechnuyu massu [On the dynamics of a satellite carrying a point mass moving relative to it]. *Izv. RAN. MTT [News RAS. MTT]*, 2015. No. 6. Pp. 3–16.
15. Sumbatov A.S. O kachenii tyazhelogo diska po poverkhnosti vrashcheniya otritsatel'noi krivizny [Rolling of a heavy disk on a surface of revolution of negative curvature]. *PMM [PMM]*, 2019. Vol. 83. No. 2. Pp. 234–248.
16. Van L., Baranov A.A. Optimal'noe uderzhanie kosmicheskogo apparata s dvigatelyami maloi tyagi na solnechno-sinkhronnoi orbite [Optimal retention of a spacecraft with low-thrust engines in a solar-synchronous orbit]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya Mashinostroenie [Bulletin of Bauman Moscow State Technical University.. Series: Mechanical Engineering]*, 2015. No. 2 (101). Pp. 68–83.

17. Yashkin S.N. K voprosu klassifikatsii vrashcheniy i svyazi mgnovennykh povorotov i nepreryvnykh vrashcheniy [On the question of the classification of rotations and the connection of instantaneous rotations and continuous rotations]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotos"yemka* [News of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography], 2003. No. 4. Pp. 3–15.

18. Usataya T.V., Usatyi D.Yu., Svistunova E.A. Trekhmernoe komp'yuternoe modelirovanie v proektno-tekhnologicheskoi deyatel'nosti [Three-dimensional computer modeling in design and technological activity]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production], 2015. No. 4(10). Pp. 28–31.

Информация об авторах

Попов Игорь Павлович – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры технологии машиностроения, металлорежущих станков и инструментов, Курганский государственный университет, г. Курган, e-mail: ip.popov@yandex.ru

Information about the authors

Igor' P. Popov – Ph.D. of Engineering Science, Senior Lecturer of the Subdepartment of Mechanical Engineering, Metal-Cutting Machines and Tools, Kurgan State University, Kurgan, e-mail: ip.popov@yandex.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.2(70).30-36

УДК 621.398.001.2

Методы эффективной организации и ведения специализированного информационного и программного обеспечения автоматизированной системы технологической подготовки производства коаксиальных радиокомпонентов для сверхвысокочастотной микроэлектроники спутниковой радиосвязи на железнодорожном транспорте

Ю. И. Карлина¹✉, А. П. Хоменко²

¹ *Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация*

² *Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация*

✉ karlinigor@mail.ru

Резюме

Потребность в импортозамещении, проектировании и производстве аппаратуры связи для железнодорожного транспорта выдвигает требования по взаимодействию участников рынка радиоаппаратуры. Предложено использование методик цифровизации для создания цифрового двойника продукции и технологии его изготовления. Приведены основные параметры конструктора коаксиальных радиокомпонентов для сбора информации о требованиях потребителей. При формировании представительства предприятия-производителя коаксиальных радиокомпонентов необходимо создать конструктор изделия для подбора и моделирования конструкции и характеристик потребителями продукции. Основные параметры конструктора должны включать в себя нормируемые характеристики с диапазоном допустимых значений по видам изделий. Сбор и обработка информации об использовании конструктора потребителями позволит начать формировать цифровой портрет потребителя, данные о котором должны быть дополнены информацией из других источников, в том числе не формализуемой информацией, получаемой из блогов, научных статей, тематических сообществ в Интернете. Создание цифрового двойника технологии производства коаксиальных радиокомпонентов позволит осуществлять дополнение и изменение параметров конструктора изделия по мере совершенствования технологий изготовления и расширения диапазона нормируемых характеристик, а данные цифрового портрета потребителя обозначат направления для совершенствования технологий и приведения их в соответствие требованиям потребителя. Возрастающие требования к аппаратуре передачи данных приводят к потребности применения новых изоляционных материалов, обеспечивающих радиационную стойкость и диэлектрическую проницаемость коаксиальных радиокомпонентов, оборудования, оснащенного программируемыми логическими контроллерами и техническими системами регулирования. Необходимым условием для обеспечения работоспособности автоматизированной системы технологической подготовки производства является применение высокоточных станков с числовым программным управлением для микромеханики, контрольно-измерительных машин, автоматизированных линий для гальванического покрытия и сборки, способных передавать данные о выполненных операциях и устанавливать рассчитанные в автоматизированной системе технологической подготовки производства параметры обработки с учетом фактических параметров качества, полученных на предыдущих операциях.

Ключевые слова

моделирование, информационное обеспечение автоматизированной системы технологической подготовки производства, коаксиальные радиокомпоненты, электроника, радиосвязь на железнодорожном транспорте, параметризация

Для цитирования

Карлина Ю. И. Методы эффективной организации и ведения специализированного информационного и программного обеспечения автоматизированной системы технологической подготовки производства коаксиальных радиокомпонентов для сверхвысокочастотной микроэлектроники спутниковой радиосвязи на железнодорожном транспорте /

Ю. И. Карлина, А. П. Хоменко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 2 (70). – С. 30–36. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).30-36

Информация о статье

поступила в редакцию: 07.03.2021, поступила после рецензирования: 12.03.2021, принята к публикации: 01.04.2021

Methods for effective organization and supervision of specialized information and software support of the automated system of production planning of coaxial radio components for super high frequency microelectronics for satellite radio communication in railway transport

Yu. I. Karlina¹✉, A. P. Khomenko²

¹ Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

² Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ karlinigor@mail.ru

Abstract

The need for import substitution, design and production of communication equipment for railway transport puts forward requirements for the interaction of participants in the radio equipment market. The article proposes using digitalization techniques to create a digital twin of products and technology for its manufacture. It presents the main parameters of the construction kit of coaxial radio components to collect information about consumer requirements. When forming a representative office of a manufacturer of coaxial radio components, it is necessary to create a product construction kit to select and model the design and characteristics of products by consumers. The main parameters of the construction kit should include standardized characteristics with a range of permissible values according to product types. Collecting and processing information about the use of the construction kit by consumers will make it possible to start forming a digital portrait of a consumer, data about which should be supplemented with information from other sources, including non-formalized information obtained from blogs, scientific articles, and thematic communities on the Internet. The creation of a digital twin of the technology for the production of coaxial radio components will allow adding and changing the parameters of the product construction kit as long as the manufacturing technologies improve and the ranges of standardized characteristics are expanded, and the data of the digital portrait of the consumer will indicate the directions for improving the technologies and bringing them in line with the consumer's requirements. Increasing requirements for data transmission equipment result in the need to use new insulating materials that provide radiation resistance and dielectric permittivity of coaxial radio components, devices equipped with programmable logic controllers and technical control systems. An essential prerequisite for ensuring the operability of the automated production planning system is the use of high-precision CNC machines for micromechanics, control and measuring machines, automated lines for electroplated coating and assembly, capable of transmitting data on the operations performed and setting processing parameters calculated in the automated production planning system, taking into account the actual quality parameters obtained in the previous operations.

Keywords

modeling, information support of the automated system of technological information support of automated production planning system, coaxial radio components, electronics, radio communication in railway transport, parameterization

For citation

Karlina Yu. I., Khomenko A. P. Metody effektivnoi organizatsii i vedeniya spetsializirovannogo informatsionnogo i programmno obespecheniya avtomatizirovannoi sistemy tekhnologicheskoi podgotovki proizvodstva koaksial'nykh radiokomponentov dlya sverkhvy-sokochastotnoi mikroelektroniki sputnikovoi radiosvyazi na zheleznodorozhnom transporte [Methods for effective organization and supervision of specialized information and software support of the automated system of production planning of coaxial radio components for super high frequency microelectronics for satellite radio communication in railway transport]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 2 (70), pp. 30–36. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).30-36

Article Info

Received: 07.03.2021, Revised: 12.03.2021, Accepted: 01.04.2021

Введение

Повышение надежности и качества радиосвязи, сокращение капиталовложений и снижение эксплуатационных расходов является одной из приоритетных задач ОАО «РЖД». Перспективность использования подвижной спутниковой связи на железнодоро-

жном транспорте определяется ее следующими достоинствами:

- возможность обеспечения связи непосредственно из подвижного объекта (вагон, локомотив и др.) на стоянке и в движении;
- практически неограниченная дальность связи;

– независимость качества и стоимости каналов от расстояния между абонентами;

– возможность работы в режиме многостанционного доступа, при котором несколько абонентских станций работают в общем стволе искусственных спутников Земли;

– высокое качество связи в специфических для железных дорог условиях;

– простота подключения потребителей к каналу связи независимо от вида передаваемой информации [1, 2].

Вследствие того, что в настоящее время отсутствуют отечественные системы подвижной спутниковой связи гражданского назначения на сети железных дорог, ОАО «РЖД» используются зарубежные системы спутниковой связи Globalstar и Inmarsat [3]. Предпосылкой к созданию систем подвижной спутниковой связи российского производства, а также СВЧ-систем радиорелейной связи, СВЧ-систем локальной передачи данных является создание технологической платформы «СВЧ технологии», которая включена в перечень технологических платформ, утвержденный решениями Правительственной комиссии по высоким технологиям и инновациям от 01 апреля 2011 г. протокол № 2, от 05 июля 2011 г. протокол № 3; решением президиума Правительственной комиссии по высоким технологиям и инновациям от 21 февраля 2012 г. протокол № 2. Создание этой платформы обусловило развитие и расширение элементной базы СВЧ-микроэлектроники.

Непрерывное совершенствование и расширение номенклатуры коаксиальных радиокомпонентов – соединителей, переходов, ВЧ- и НЧ-фильтров, обусловило жесткие требования к их производству. Производство коаксиальных радиокомпонентов является многономенклатурным и мелкосерийным, имеется тенденция к постоянному появлению новых требований потребителей, приводящих к изменению номенклатуры, индивидуализации конструктивных исполнений изделий. Постоянный рост требований к качеству и характеристикам коаксиальных радиокомпонентов, совершенствование технологий приводит к тому, что технологические процессы производства и конечная продукция становятся все сложнее и разнообразнее. Повышается спрос на максимальный учет индивидуальных требований заказчика. Возникает необходимость массовой кастомизации и даже персонализации продукции, когда изделие изготавливается под конкретного заказчика. Однако при этом конкуренция требует выводить продукты на рынок все быстрее, а это, в свою очередь, способствует ускорению производственных процессов. В результате такой трансформации проявились некоторые негативные тенденции – увеличение продолжительности и стоимости разработок, потеря качества изделий, снижение прибыли компа-

ний-разработчиков, а в некоторых случаях и репутационный ущерб [4].

Методы эффективной организации и ведения специализированного информационного и программного обеспечения автоматизированной системы технологической подготовки производства коаксиальных радиокомпонентов

Для повышения уровня автоматизации и эффективности применения автоматизированной системы технологической подготовки производства (АСТПП) коаксиальных радиокомпонентов необходимо изменить подход к проектированию. Теперь проектирование должно базироваться на результатах математического и численного моделирования. Применение моделирования на всех этапах проектирования позволит оптимизировать проектную деятельность за счет сокращения сроков и стоимости, а также повышения качества. Системы управления и контроля тоже усложняются и становятся более комплексными: согласно закону необходимого разнообразия Уильяма Эшби, невозможно управлять сложными процессами при помощи простой системы. Проблема роста сложности производственных технологий и продуктов наиболее актуальна для высокотехнологичных направлений производства высокотехнологичной электроники. Решить проблему сложности при помощи традиционных технологий вряд ли возможно. Необходимы новый подход к изготовлению материалов, автоматизация, интеллектуализация и цифровизация производства, а также переход к «системной инженерии», т. е. планированию не отдельных операций, а сразу всего жизненного цикла продукта, начиная от проектирования и заканчивая утилизацией. Решениями, реализующими новый подход, являются цифровые, «умные» и виртуальные фабрики будущего (Digital, Smart, Virtual Factories of the Future). Цифровое проектирование, моделирование, новые материалы и технологии применяются при создании таких предприятий. Ведущую роль в развитии концепции предприятий будущего играет новая парадигма цифрового проектирования и моделирования «Умные цифровые двойники», при которой моделирование и оптимизация происходят с использованием технологии интеллектуальной обработки больших данных, а проектирование и производство на продвинутом уровне [5].

Новый уровень развития автоматизированных систем проектирования основан на построении математических моделей с высокой степенью соответствия характеристикам реальных изделий, реальным производственным процессам и технологиям. Модели образованы трехмерными нестационарными нелинейными сложными дифференциальными уравнениями в частных производных. Эти модели

многосторонне и максимально полно отражают знания об изделии на всех этапах жизненного цикла (проектирования, производства, эксплуатации и утилизации) и включают:

1. Законы фундаментальных наук (математическая физика, теории колебаний, упругости, пластичности и т. д., механика разрушения, механика композиционных материалов и композитных структур, контактного взаимодействия, динамика и прочность машин, вычислительная механика, гидроаэродинамика, тепло-массообмен, электромагнетизм, акустика, технологическая механика и др.).

2. Геометрические (CAD) и вычислительные конечно-элементные (CAE) полномасштабные модели реальных объектов и физико-механических процессов.

3. Данные о конструкционных материалах, применяемых при изготовлении изделия, включая данные о поведении материалов при воздействии тепловых, электромагнитных и других полей, скоростном деформировании, вибрационном, ударном, мало- и многоцикловом нагружении [6].

4. Сведения об эксплуатационных режимах (нормальные условия эксплуатации, нарушение нормальных условий эксплуатации, аварийные ситуации и т. д.), включая сведения об обеспечении заданного поведения конструкции в регламентируемых режимах (так называемое программируемое поведение) [6].

5. Информацию о технологических процессах производства деталей, агрегатов, узлов и изделий.

6. Прочие нормируемые свойства.

Коаксиальные радиокомпоненты предназначены для передачи сигналов на частотах до 40 ГГц с микрополосковой линии на радиочастотный кабель, подачи питающих напряжений и управляющих сигналов, а также для подавления внутренних и внешних электромагнитных помех в современных герметизированных устройствах микроэлектроники СВЧ [7] (рис. 1).



Рис. 1. Миниатюрные коаксиальные радиокомпоненты
Fig. 1. Miniature coaxial radio components

Степень миниатюризации коаксиальных радиокомпонентов хорошо видна в сравнении с монетой 10 коп. (рис. 2).



Рис. 2. Степень миниатюризации коаксиальных радиокомпонентов
Fig. 2. The degree of miniaturization of coaxial radio components

Для создания цифрового двойника технологии производства коаксиальных радиокомпонентов необходимо обеспечить сбор информации о технологических и производственных процессах, применяемых материалах, инструменте, оснастке, оборудовании. Возрастающие требования к аппаратуре передачи данных приводят к потребности применять новые изоляционные материалы, обеспечивающие радиационную стойкость и диэлектрическую проницаемость коаксиальных радиокомпонентов, оборудование, оснащенное программируемыми логическими контроллерами и техническими системами регулирования. Необходимым условием для обеспечения работоспособности АСТПП является применение высокоточных станков с числовым программным управлением для микромеханики, контрольно-измерительных машин, автоматизированных линий для гальванического покрытия и сборки, способных передавать данные о выполненных операциях и устанавливать рассчитанные в АСТПП параметры обработки с учетом фактических параметров качества, полученных на предыдущих операциях. Расчет параметров обработки необходимо производить на основе научно-обоснованных зависимостей параметров качества от режимов обработки и внешних воздействий путем создания математических моделей процессов обработки.

Для создания цифрового двойника изделия необходимо провести классификацию изделий, определить их основные нормируемые потребительские характеристики.

Коаксиальные радиокомпоненты подразделяются на группы по видам изделий:

- микрополосковые коаксиальные переходы;
- адаптеры;
- соединители;
- СВЧ-вводы;
- НЧ-вводы и изоляционные стойки;
- фильтры помех.

Параметры коаксиальных радиокомпонентов, подлежащие нормированию:

- номинальное волновое сопротивление;
- номинальная площадь сечения канала и ее допустимые отклонения;
- диапазон частот;
- коэффициент стоячей волны по напряжению;
- прочность изоляции;
- диапазон напряжений;
- сопротивления контактов;
- вносимые потери.

При формировании представительства предприятия-производителя коаксиальных радиокомпонентов необходимо создать конструктор изделия для подбора и моделирования конструкции и характеристик потребителями продукции. Основные параметры конструктора должны включать в себя нормируемые характеристики с диапазоном допустимых значений по видам изделий [8–13]. Сбор и обработка информации об использовании конструктора потребителями позволит начать формировать цифровой портрет потребителя, данные о котором должны быть дополнены информацией из других источников, в том числе не формализуемой информацией, получаемой из блогов, научных статей, тематических сообществ в Интернете [14–18].

Создание цифрового двойника технологии производства коаксиальных радиокомпонентов позволит осуществлять дополнение и изменение параметров конструктора изделия по мере совершенствования технологий изготовления и расширения диапазонов нормируемых характеристик, а данные цифрового портрета потребителя обозначат направления для совершенствования технологий и приведения их в соответствие требованиям потребителя [19, 20].

Заключение

Имеется потребность в импортозамещении, проектировании и производстве аппаратуры связи для железнодорожного транспорта. Конструкторам такой радиоаппаратуры необходимо наиболее полно представлять информацию об имеющихся возможностях российских производителей коаксиальных радиокомпонентов с предоставлением удобного интерфейса для проектирования конструкции и характеристик этих изделий. При формировании представительства предприятия-производителя коаксиальных радиокомпонентов необходимо создать конструктор изделия для подбора и моделирования конструкции и характеристик потребителями продукции. Основные параметры конструктора должны включать в себя нормируемые характеристики с диапазоном допустимых значений по видам изделий. Сбор и обработка информации об использовании конструктора потребителями позволит начать формировать цифровой портрет потребителя, данные о котором должны быть дополнены информацией из других источников, в том числе не формализуемой информацией.

Для создания цифрового двойника технологии производства коаксиальных радиокомпонентов необходимо обеспечить сбор информации о технологических и производственных процессах, применяемых материалах, инструменте, оснастке, оборудовании. Расчет параметров обработки необходимо производить на основе научно-обоснованных зависимостей параметров качества от режимов обработки и внешних воздействий путем создания математических моделей процессов обработки.

Создание цифрового двойника технологии производства коаксиальных радиокомпонентов позволит осуществлять дополнение и изменение параметров конструктора изделия по мере совершенствования технологий изготовления и расширения диапазонов нормируемых характеристик, а данные цифрового портрета потребителя обозначат направления для совершенствования технологий и приведения их в соответствие требованиям потребителя.

Список литературы

1. Стратегия развития Холдинга «РЖД» на период до 2030 года. М. : ОАО «РЖД», 20.12.2013.
2. Урусов А.В. Цифровая железная дорога // Автоматика, связь, информатика. 2018. № 1. С. 6–8.
3. Оленцевич В.А., Гозбенко В.Е. Задачи приспособления транспортной инфраструктуры к новым технологиям // Современные технологии и научно-технический прогресс. 2021. № 8. С. 189–190.
4. От «ТехУспеха» к национальным чемпионам : аналитический доклад (краткая версия) / АО «РВК» // ТехУспех : сайт URL: https://www.rvc.ru/upload/iblock/293/Buklet_Rezultat_issledovaniya_TehUspeh.pdf (дата обращения 18.05.2021).
5. Цифровое производство. Методы, экосистемы, технологии : рабочий доклад Департамента Корпоративного обучения Московской школы управления СКОЛКОВО. URL: http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/11_november/17/tsifrovoe_proizvodstvo_112017.pdf (дата обращения 18.02.2021).
6. Новая парадигма цифрового проектирования и моделирования глобально конкурентоспособной продукции нового поколения (дополненная версия) // Инжиниринговый центр «Центр компьютерного инжиниринга» (CompMechLab®) СПбПУ : сайт. URL: <http://fea.ru/news/6721> (дата обращения 12.03.2021).

7. Джуринский К.Б. Миниатюрные коаксиальные радиокомпоненты для микроэлектроники СВЧ. Соединители, коаксиально-микроразветвляющиеся переходы, адаптеры, СВЧ-вводы, низкочастотные вводы, изоляционные стойки, фильтры помех. М. : Техносфера, 2006. 216 с.
8. Куликов Д.Д., Падун Б.С., Яблочников Е.И. Перспективы автоматизации технологической подготовки производства // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. № 8 (57). С. 7–12.
9. Зильбербург Л.И., Молочник В.И., Яблочников Е.И. Информационные технологии в проектировании и производстве. СПб. : Политехника, 2008. 304 с.
10. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы данных интеллектуальных систем. СПб. : Питер, 2000. 384 с.
11. Гозбенко В.Е. Управление динамическими свойствами механических колебательных систем. Иркутск : Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2000. 412 с.
12. Яблочников Е.И. применение многоагентных технологий для реализации системы управления виртуальным предприятием / М.Я. Афанасьев, А.А. Саломатина, Е.Е. Алёшина и др. // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 5(75). С. 105–111.
13. Куликов Д.Д., Яблочников Е.И. Применение оценочных метрик для анализа технологической подготовки производства // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 6 (76). С. 109–112.
14. Гозбенко В.Е. Методы управления динамикой механических систем на основе вибрационных полей и инерционных связей. М. : Машиностроение, 2004. 367 с.
15. Яблочников Е.И., Фомина Ю.Н., Саломатина А.А. Организация технологической подготовки производства в распределенной среде // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 6. С. 12–15.
16. Аверин В.В., Гусельников В.С. Автоматизация проектирования управляющих программ // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. № 6 (53). С. 67–71.
17. Вороненко В.П., Седых М.И., Шашин А.Д. Проектирование и эффективная эксплуатация производственных участков многономенклатурного машиностроительного производства // Вестник РГАТУ им. П.А. Соловьева. 2017. № 1 (40). С. 182–189.
18. Вороненко В.П., Шашин А.Д. Планирование опытного производства с учетом его текущего состояния // Автоматизированное проектирование в машиностроении : материалы V междунар. заочной науч.-практ. конф. Новокузнецк : НИЦ МС, 2017. № 5. 134 с.
19. Маданов А.В. Анализ проблем при обработке деталей сложной геометрии и путей их решения на этапе технологической подготовки производства // Проблемы науки. 2015. № 1 (1). С. 14–16.
20. Будущее машиностроения России : сб. тр. Всерос. конф. молодых ученых и специалистов. МГТУ им. Н.Э. Баумана. М., 2008. С. 48.

References

1. Strategiya razvitiya Kholdinga «RZhD» na period do 2030 goda [Development strategy of the Russian Railways Holding for the period up to 2030]. Moscow: OAO Russian Railways Publ., 20.12.2013.
2. Urusov A.V. Tsifrovaya zheleznaya doroga [Digital railway]. *Avtomatika, svyaz', informatika [Automation, communication, informatics]*, 2018. No. 1. Pp. 6–8.
3. Olentsevich V.A., Gozbenko V.E. Zadachi prispособleniya transportnoi infrastruktury k novym tekhnologiyam [Problems of adapting transport infrastructure to new technologies]. *Sovremennye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress [Modern technology and technological advance]*, 2021. No. 8. Pp. 189–190.
4. Ot «TekhUspekha» k natsional'nykh chempionam [From TekhUspekha to national champions] [Electronic media]. URL: https://www.rvc.ru/upload/iblock/293/Buklet_Rezultaty_issledovaniya_TehUspeh.pdf.
5. Tsifrovoe proizvodstvo. Metody, ekosistemy, tekhnologii [Digital production. Methods, ecosystems, technologies] [Electronic media]. URL: http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/11_november/17/tsifrovoe_proizvodstvo_112017.pdf.
6. Tsifrovoe proizvodstvo. Metody, ekosistemy, tekhnologii. Gl. 2. Novaya paradigma tsifrovogo proektirovaniya i modelirovaniya global'no konkurentosposobnoi produktsii novogo pokoleniya (dopolnennaya versiya) [Digital production. Methods, ecosystems, technologies. Chapter 2. A new paradigm of digital design and modeling of globally competitive products of a new generation (updated version)] [Electronic media]. URL: <http://fea.ru/news/6721>.
7. Dzhurinskii K.B. Miniaturnye koaksial'nye radiokomponenty dlya mikroelektroniki SVCh. Soediniteli, koaksial'no-mikropoloskovyye perekhody, adaptery, SVCh-vvody, nizkochastotnye vvody, izolyatsionnye stoiki, fil'try pomekh [Miniature coaxial radio components for microwave microelectronics. Connectors, coaxial-microstrip transitions, adapters, microwave inputs, low-frequency inputs, isolation racks, noise filters]. Moscow: Tekhnosfera Publ., 2006. 216 p.
8. Kulikov D.D., Padun B.S., Yablochnikov E.I. Perspektivy avtomatizatsii tekhnologicheskoi podgotovki proizvodstva [Prospects for the automation of technological preparation of production]. *Izv. vuzov. Priboroostroenie [Proceedings of universities. Instrument making]*, 2014. No. 8 (57). Pp. 7–12.
9. Zil'berburg L.I., Molochnik V.I., Yablochnikov E.I. Informatsionnye tekhnologii v proektirovani i proizvodstve [Information technologies in design and production]. St. Petersburg: Polytekhnika Publ., 2008. 304 p.
10. Gavrilova T.A., Khoroshevskii V.F. Bazy dannykh intellektual'nykh sistem [Databases of intelligent systems]. St. Petersburg: Piter Publ., 2000. 384 p.
11. Gozbenko V.E. Upravlenie dinamicheskimi svoystvami mekhanicheskikh kolebatel'nykh sistem [Control of dynamic properties of mechanical oscillatory systems]. Irkutsk, 2000.
12. Afanas'ev M.Ya., Salomatina A.A., Alyoshina E.E., Yablochnikov E.I. Primenenie mnogoagentnykh tekhnologii dlya realizatsii sistema upravleniya virtual'nym predpriyatiem [Application of multi-agent technologies for the implementation of a

virtual enterprise management system]. *Nauch.-tekhn. vestn. Informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki* [Nauch.-tekhn. vestn. Information technology, mechanics and optics], 2011. No. 5 (75). Pp. 105–111.

13. Kulikov D.D., Yablochnikov E.I. Primenenie otsenochnykh metrik dlya analiza tekhnologicheskoi podgotovki proizvodstva [Application of evaluative metrics for the analysis of technological preparation of production]. *Nauch.-tekhn. vestn. informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki* [Scientific and technical. vestn. information technology, mechanics and optics], 2011. No. 6 (76). Pp. 109–112.

14. Gozbenko V.E. Metody upravleniya dinamiki mekhanicheskikh sistem na osnove vibratsionnykh polei i inertsionnykh svyazei [Methods of controlling the dynamics of mechanical systems based on vibrational fields and inertial couplings]. Moscow, 2004.

15. Yablochnikov E.I., Fomina Yu.N., Salomatina A.A. Organizatsiya tekhnologicheskoi podgotovki proizvodstva v raspredelennoi srede [Organization of technological preparation of production in a distributed environment]. *Izv. vuzov. Priborostroenie* [Izv. universities. Instrumentation], 2010. Vol. 53. No. 6. Pp. 12–15.

16. Averin V.V., Gusel'nikov V.S. Avtomatizatsiya proektirovaniya upravlyayushchikh programm [Design automation of control programs]. *Izv. vuzov. Priborostroenie* [Proceedings of universities. Instrument-making], 2010. No. 6 (53). Pp. 67–71.

17. Voronenko V.P., Sedykh M.I., Shashin A.D. Proektirovanie i effektivnaya ekspluatatsiya proizvodstvennykh uchastkov mnogonomenklaturnogo mashinostroitel'nogo proizvodstva [Design and efficient operation of production areas of multi-product machine-building production]. *Vestnik RGATU imeni P.A. Solov'eva* [The Vestnik of P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University], 2017. No. 1 (40). Pp. 182–189.

18. Voronenko V.P., Shashin A.D. Planirovanie opytного proizvodstva s uchetom ego tekushchego sostoyaniya [Planning a pilot production taking into account its current state]. *Avtomatizirovannoe proektirovanie v mashinostroenii: Materialy V mezhdunarodnoi zaochnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Computer-aided design in mechanical engineering: Proceedings of the V international correspondence scientific and practical conference]. Novokuznetsk: SRC MS Publ., 2017. No. 5. 134 p.

19. Madanov A.V. Analiz problem pri obrabotke detalei slozhnoi geometrii i putei ikh resheniya na etape tekhnologicheskoi podgotovki proizvodstva [Analysis of problems in processing parts of complex geometry and ways to solve them at the stage of technological preparation of production]. *Problemy nauki* [Problems of science], 2015. No. 1 (1). Pp. 14–16.

20. Budushchee mashinostroeniya Rossii [The future of mechanical engineering in Russia]. *Sbornik trudov Vserossiiskoi konferentsii molodykh uchennykh i spetsialistov* [Proceedings of the All-Russian conference of young scientists and specialists]. Bauman MSTU Publ., 2008. Pp. 48.

Информация об авторах

Карлина Юлия Игоревна – научный сотрудник Научно-исследовательской части, аспирант, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, e-mail: karlinigor@mail.ru

Хоменко Андрей Павлович – д. т. н., профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: homenko_ap@irgups.ru

Information about the authors

Yuliya I. Karlina – Research officer of the Research Department, Ph.D. student, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: karlinigor@mail.ru

Andrei P. Khomenko – Doctor in Engineering Science, Prof., Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: homenko_ap@irgups.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.2(70).36-43

УДК 621,3; 629.14

Методологические аспекты информационного-измерительных комплексов функционального диагностирования динамических объектов электрифицированного железнодорожного транспорта

М. С. Якубов✉, **У. Ш. Исроилов**, **И. А. Каримов**

Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент, Республика Узбекистан

✉ etkmyakubov@yandex.ru

Резюме

В статье рассматриваются теоретические и практические аспекты разработки математических моделей информационно-измерительных комплексов функционального диагностирования и мониторинга технологических объектов тяговых подстанций, а также установок и элементов контактной сети высокоскоростного движения с преимущественным акцентом применения инновационных технологий. Отмечены характеристики электроснабжения находящихся под влиянием сложных динамических и взаимосвязанных технологических режимов энергонапряженных объектов контактной сети и тяговых подстанций, рассредоточенных на большой площади, которые должны обеспечивать надежное функционирование по требуемой мощности и параметрам качества электроэнергии, а также безопасности и устойчивости процесса управления подвижного состава. Для обеспечения взаимосвязанных технико-технологических режимов с учетом многокритериальных оптимальных показателей и формирования решений показана целесообразность непрерывной функциональной диагностики объектов посредством применения современных информационно-измерительных комплексов. Отмечена важность для эксплуатации наличия не только встроенных систем и достаточно достоверных средств для функционального диагностирования технологических объектов электроснабжения, но и конкретных методологических

рекомендаций по обработке результатов измерения на основе аналитических законов распределения случайной величины с использованием нормально-гауссовского, экспоненциального, логарифмически нормального и Вейбулла – Гнеденко законов для более точного определения глубины применения интегрированных совместных диагностических признаков. Указана материальная основа нового информационно-измерительного комплекса на основе современных измерительных средств с высокими метрологическими, динамическими и надежностными характеристиками, которые обеспечиваются микропроцессорными устройствами с частотным выходом в канал передачи данных.

Ключевые слова

информационно-измерительный комплекс, функциональное диагностирование, диагностические признаки, динамические объекты, системы тягового электроснабжения, законы распределения случайных величин

Для цитирования

Якубов М. С. Методологические аспекты информационно-измерительных комплексов функционального диагностирования динамических объектов электрифицированного железнодорожного транспорта / М. С. Якубов, У. Ш. Исроилов, И. А. Каримов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 2 (70). – С. 36–43. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).36-43

Информация о статье

поступила в редакцию: 08.04.2021, поступила после рецензирования: 17.04.2021, принята к публикации: 21.04.2021

Methodological aspects of information and measurement systems for functional diagnostics of dynamic objects of electrified railway transport

M. S. Yakubov✉, U. Sh. Isroilov, I. A. Karimov

Tashkent State Transport University, Tashkent, the Republic of Uzbekistan

✉ etkmyakubov@yandex.ru

Abstract

The article considers theoretical and practical aspects of developing mathematical models of information and measurement systems (IMS) of functional diagnostics and monitoring of propulsion substations and high-speed transmission systems and network components, with a preemptive focus on the application of innovative technologies. It notes the characteristics of the electricity supply, influenced by the complex dynamic and interconnected technological regimes of the energy-stressed units of contact and traction substations spread over a large area. They should provide reliable operation according to the required capacity and parameters of electrical quality, as well as safety and stability of the rolling stock management process. In order to ensure mutually coherent technical and technological regimes, taking into account multi-criteria optimum indicators and the formation of solutions, the usefulness of continuous functional diagnostics of objects with the application of modern information and measurement systems has been demonstrated. It is considered important to have not only built-in systems and sufficiently reliable means for functional diagnostics of technological power supply facilities, but also specific methodological recommendations for processing measurement results on the basis of analytical laws of random distribution using normal Gaussian, exponential, logarithmic normal and Weibull-Gnedenko laws to better define the application of integrated shared diagnostic features. The material framework of the new information and measurement system is specified on the basis of modern measuring means with high metrological, dynamic and reliable characteristics, provided by microprocessor devices with frequency output into the data transmission channel.

Keywords

information and measurement system, functional diagnostics, diagnostic features, dynamic objects, traction power supply systems, random values distribution laws

For citation

Yakubov M. S., Isroilov U. Sh., Karimov I. A. Metodologicheskie aspekty informatsionnogo-izmeritel'nykh kompleksov funktsional'nogo diagnostirovaniya dinamicheskikh ob'ektov elektrifitsirovannogo zheleznodorozhnogo transporta [Methodological aspects of information and measurement systems for functional diagnostics of dynamic objects of electrified railway transport]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 2 (70), pp. 36–43. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).36-43

Article Info

Received: 08.04.2021, Revised: 17.04.2021, Accepted: 21.04.2021

Введение

Эффективность функционального диагностирования динамических объектов электрифицированного

железнодорожного транспорта зависит от того, насколько разрешен вопрос получения достоверной измерительной информации об их техническом со-

стоянии, т. е. измеримостью, информативностью и инвариантностью диагностических признаков.

Под измеримостью понимают прямое измерение с помощью соответствующего датчика. Информативность означает наличие существенной информации о дефектах объекта и возможность количественного определения их характеристик. Свойство инвариантности характеризует нечувствительность к помехам возмущения [1–3].

Железнодорожный транспорт является фундаментальной отраслью экономики, обеспечивающей топливными, сырьевыми ресурсами промышленность, энергетику, сельское хозяйство, сферу перевозки пассажиров, он приносит существенную часть валютных поступлений.

Важнейшей частью тягового электроснабжения железной дороги является единая система контактной сети, питаемая тяговыми подстанциями, имеющими между собой технологические границы. Каждая часть тягового электроснабжения – исключительно сложная система, состоящая из рассредоточенных на большой площади тяговых подстанций и контактной сети [4, 5].

Система электроснабжения железной дороги должна обеспечивать устойчивое, надежное функционирование всех технологических объектов, устройств, которое заключается в обеспечении требуемой мощности и параметров качества электроэнергии: симметричности, синусоидальности, минимальных потерь электроэнергии посредством снижения потребления реактивной мощности, за счет экономической эффективности технического обслуживания и ремонта, а также повышения безопасности и устойчивости процесса управления подвижным составом.

Устойчивость и надежность электроснабжения обеспечивается путем использования информационно-измерительных систем автоматического регулирования и управления, а также системой оперативно-диспетчерского управления [5, 6].

В условиях большой протяженности контактной системы, высокого напряжения (27,5 кВ) и больших токов (порядка 500 А и более), многообразия и стохастического характера воздействия различных факторов возрастают требования к их эксплуатационной надежности, а, следовательно, и повышению надежности информационно-измерительных систем.

Из анализа статистики аварийных ситуаций, возникающих в системе тягового электроснабжения, видно, что основная часть повреждений и аварий различной степени сложности происходит в тяговой подвеске из-за износа контактного провода (более 232), обрыва струн (13 %), неисправностей зажимов и деталей (5,3 %), несущего троса (11,2 %), воздушных стрелок (3,4 %), анкеров и оттяжки (5,4 %) и др. [3].

Однако повреждения и отказы происходят и в установках тяговых подстанций, работающих в непрерывно энергонапряженном режиме: высоко-

вольтные выключатели (42 %), тяговые трансформаторы (16,4 %), разъединители и отделители (17,6 %), измерительные трансформаторы тока и напряжения (18,9 %). Отказы энергоустановок сопряжены, как правило, со значительным материальным и экономическим ущербом.

Задача обеспечения надежности, безопасности и эффективности энергоустановок непосредственно связана с применением инновационных информационно-измерительных комплексов (ИИК). При их функциональном диагностировании в системе тягового электроснабжения должно происходить формирование нового ИИК, который должен изменить роль существующей информации во всех его технологических процессах [1, 2, 7].

Материальной основой новой информационной среды будет ИИК с современными измерительными средствами, с высокими метрологическими и динамическими характеристиками, обеспечиваемыми микропроцессорными устройствами с выходом в канал передачи данных [6].

Новая информационная среда создаст условия для эффективного повышения функционального диагностирования технического состояния объектов электроснабжения и более точечных оценок надежности электроустановок.

Можно утверждать, что качество ИИК, особенно виброакустического диагностирования, определяется как метрологическими и надежностными характеристиками измерительных средств, так и информационными параметрами обрабатываемых массивов [8–12].

Для повышения качества информационного обеспечения функционального диагностирования и новой информационной среды необходимо совершенствовать математические модели обработки результатов измерения [11–14].

Изложенные факты обосновывают актуальность рассматриваемой в работе проблемы разработки теоретических и методических основ построения многофункционального ИИК, предназначенного для применения функционального диагностирования объектов тягового электроснабжения, создания самой системы в виде аппаратно-программной среды. Для решения указанной проблемы необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить и системно проанализировать недостатки существующих информационно-измерительных систем, разработать теоретические и методологические основы построения многофункционального ИИК, являющегося одним из основных факторов высокой надежности функционального диагностирования объектов тягового электроснабжения.

2. Разработать математическую модель, описывающую энергетические процессы, происходящие при групповом движении высокоскоростного электроподвижного состава (ЭПС) в магистральных путях, которая позволит обосновать метрологические, дина-

мические и надежность характеристики применяемых датчиков и преобразователей в системе функционального диагностирования.

3. С учетом структуры многофункционального ИИК, его особенностей и специфики объектов электроснабжения необходимо разработать алгоритмы сбора измерительной информации, ее обработки и выдачи во все компоненты информационно-управляющих систем функционального диагностирования динамических объектов тягового электроснабжения.

4. Разработать ИИК для функционального диагностирования системы отдельных участков и объектов тягового электроснабжения, с помощью которого появится возможность проводить не только процесс мониторинга технического состояния, но и решать оперативно-диспетчерские задачи и задачи оптимизационного управления, начиная с обнаружения неисправностей и отказов на ранних стадиях их возникновения.

Кратко остановимся на анализе диагностических моделей функционального диагностирования динамических объектов с последующей разработкой требований, предъявляемых к техническим средствам ИИК.

Известны наиболее распространенные математические модели функционального диагностирования динамических объектов с возможностью использования также в системе тягового электроснабжения:

- графические и логические модели;
- модели в виде конечных автоматов и сетей

Петро;

- линейные динамические модели;
- нелинейные динамические модели [1, 4, 11, 13, 15].

Независимо от выбора той или иной модели диагностирования выбор совокупности измеряемых диагностических параметров является самым ответственным этапом, от которого во многом зависит качество и точность функционального диагностирования.

К графическим моделям относится функциональная виброакустическая диагностика всех агрегатов, представляющая собой комплекс измерительно-информационных закономерностей, виброакустических характеристик и связей между ними, которые образуют систему диагностирования в рабочем режиме. Функциональная виброакустическая диагностика состоит из следующих взаимосвязанных элементов: объекта, вибродиагностических параметров и показателей, средств измерения, математических моделей и алгоритмов диагностирования [19–21].

В качестве контролируемых параметров моделей и алгоритмов роторных агрегатов используются средние квадратические значения: виброускорение $\frac{d^2S(t)}{dt^2}$ – вторая производная виброперемещения во

времени; виброскорость $\frac{dS(t)}{dt}$; виброперемещение

$S(t)$ – значение координат положения точки вибрации; частота вращения колесной пары Ω .

Как показывает практика, нецелесообразно уменьшать количество измерительных точек, а, следовательно, и число датчиков вибрации, так как сильно выраженной корреляции между различными измерительными точками не обнаруживается [10, 12].

Существует множество различных диагностических комплексов, однако применяемые в них методики диагностирования и их программно-аппаратная база обеспечивают недостаточный уровень достоверности диагностирования [7, 9]. Достоверность в системе вибродиагностики измерительных средств с высокими метрологическими характеристиками можно повысить, применяя более совершенные алгоритмы и полностью исключив влияние оператора на постановку диагноза.

Механическая вибрация описывается обычно матричной системой уравнений:

$$[A]\{\ddot{q}\} + [B]\{\dot{q}\} + [C]\{q\} = [h]\{\ddot{q}, \dot{q}, t\} = \mu\{P(t)\} + \{H(\ddot{q}, \dot{q}, t)\},$$

где $[A]$, $[B]$, $[C]$ – квадратные матрицы с постоянными коэффициентами; $\{q\}$ – вектор обобщенных координат; $\{h\}$ – вектор нелинейных и параметрических членов $\{h(\ddot{q}, \dot{q}, t)\}$ и внешних возбуждающих сил $\{P(t)\}$; μ – малый параметр [10].

Анализ уравнения (1) показывает что частотный состав вибросигнала характеризуется виброускорением $[A] = \{\ddot{q}\}$, виброскоростью – $[B] = \{\dot{q}\}$ и виброперемещением $[C] = \{q\}$. Обычно на практике измеряют основную составляющую – виброскорость. Виброускорение A является более чувствительным составляющим спектра вибрации, виброперемещение C характеризует более низкочастотную составляющую вибрации. Отсюда видно, что параметры A , B , C отражают различные виды дефектов, поэтому для адекватного представления диагностируемого оборудования измеряют их все [7, 9, 12]. Наряду с теоретическими исследованиями в области функционального диагностирования сложных объектов интенсивно ведется прикладное диагностирование разнообразных динамических устройств, таких как автоматическое регулирование напряжения тяговых подстанций, колесномоторных блоков, систем тягового управления электрического подвижного состава и другие бортовые автоматизированные системы контроля, предназначенные для непрерывной проверки технического состояния, имеющие в своем составе информационно-измерительное оборудование, обеспечивающие получение информации об основных параметрах проверяемых систем, включающие вычислительные

устройства и реализующие алгоритмы диагностики [6].

С точки зрения функционального диагностирования ИИК целесообразно подразделить на две системы: измерительную систему (ИС), состоящую из нескольких датчиков, измеряющих различные физические величины, и информационно-вычислительную систему (ИВС), предназначенную для формирования диагностических признаков путем решения математических вычислений и проблемных алгоритмов для указания места отклонений и их величины от допустимых параметров.

Для определения закона распределения значений диагностических признаков по полученным опытным экспериментальным данным и проведения расчетов плотности распределения вероятностей целесообразно использовать нормальное, экспоненциальное распределение, логарифмическое нормальное распре-

деление и распределение Вейбулла – Гнеденко [16].

Далее приведены аналитические выражения различных моментов для определения диагностических признаков, характеризующих техническое состояние (табл.). Применение функциональной диагностики в качестве метода определения фактического технического состояния динамических объектов требует проведения предварительных исследований законов распределения случайных величин, характеризующих техническое состояние агрегатов и основных узлов, разработки диагностических признаков и их измерения с целью достоверного определения и эксплуатационной готовности объекта.

В части проектирования и эксплуатации средств функционального диагностирования эти требования должны характеризоваться следующими показателями [3, 4, 9, 10]:

– номинальными допустимыми значениями вход-

Законы распределения непрерывной случайной величины для определения диагностических признаков

The laws of distribution of a continuous random value to determine diagnostic features

Закон распределения	Область значений случ. величины	Аналитическое выражения функционального распределения, $F(x)$	Определяющие параметры	Аналитическое выражение плотности, $p(x)$	Применение
Нормальный гауссовский закон	$-\infty < \infty$	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp \cdot \left[-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2} \right] dx$	m – математическое ожидание; $\sigma = \sqrt{D}$ – среднее квадратическое отклонение; D – дисперсия	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \cdot \left[-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2} \right]$	Этот закон хорошо описывает постепенные отказы, когда распределение времени безотказной работы в начале имеет низкую плотность, затем максимальную и потом плотность снижается из-за износа и старения
Экспоненциальный	$0 \leq x < \infty$	$\int_0^x \lambda \exp[-\lambda x] dx$	$\lambda(t)$ – параметр распределения, (интенсивность отказа)	$\lambda e^{-\lambda x}$	Экспоненциальным законом распределения вероятности можно описывать время безотказной работы сложных технических объектов
Логарифмический и нормальный	$0 \leq x < \infty$	$\frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp \cdot \left[-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] dx$	m, σ	$\frac{\log e}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \cdot \left[-\frac{(\log x - m)^2}{2\sigma^2} \right];$ $m = M(\log x);$ $\sigma = D(\log x).$	В машиностроении и в сложных электроэнергетических системах в период наступления усталости, вследствие изнашивания электроизоляции между отказами, а также в процессе восстановления нашло логарифмически нормальное распределение
Вейбулла – Гнеденко	$0 \leq x < \infty$	$\frac{\beta}{\alpha} \int_0^x \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} \cdot e \left[-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta \right] dx$	$c > 0, \alpha > 0$ – соответственно параметры масштаба и формулы	$c\alpha x^{\alpha-1} e^{-cx\alpha}$	Для описания многоциклового усталости систем радиоэлектронного, электромашинного управления подвижного состава

ных и выходных сигналов в пределах поля допуска;
 – статической и динамической точностью измерения, глубиной диагностирования;
 – достоверностью;
 – технической и метрологической надежностью (метрологической совместимостью и унификацией выходного сигнала);
 – способом связи с объектом диагностирования;
 – формой представления результатов.

Унификация приведет к объединению приборов в комплексы и присоединению датчиков к персональному компьютеру.

Функциональная вибродиагностика колесно-моторных блоков (и вообще подшипниковых узлов роторных машин) на основе спектрального анализа амплитуды отдельных гармоник вибрационного сигнала при применении быстрого преобразования Фурье является самым распространенным методом, позволяющим достоверно определять с вероятностью 70–80 % основные дефекты [5, 9, 10].

Главными недостатками вибродиагностики роторных машин является слабое определение электро-механических дефектов обмотки статора электродвигателей. Показано, что до 80 % электродвигателей выходят из строя из-за дефектов обмотки статора [4, 11, 15]. Методы акустической эмиссии также недостаточно чувствительны именно к электро-механическим параметрам двигателей [4].

Одним из эффективных методов функционального диагностирования асинхронных двигателей является спектральный анализ амплитудно-модулированного тока его статорной обмотки [11, 14, 15].

Установлено, что параметры амплитудно-модулированного тока статора в значительной мере определяются статическим и динамическим эксцентритетом ротора, повреждениями стержней ротора, электродинамической деформацией обмоток статора электродвигателя в результате коротких замыканий, а также механическими повреждениями магнитной системы. Применением прямого преобразования Фурье амплитудно-модулированного тока обмотки статора получено выражение спектральной плотности $F(\omega)$ независимой случайной величины x с известным математическим ожиданием, среднеквадратическим отклонением и дисперсией σ^2 . С учетом приведенного белого гауссовского шума $n(t)$ спектральная плотность $F(\omega)$ представлена в следующем виде:

$$F(\omega) = \frac{\sigma_\lambda^2}{\alpha} e^{\alpha\phi} \left\{ \sigma_\lambda^2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\sigma_\phi^2)^n (n + D_{cp})}{n! [(n + D_{cp})^2 + \Omega^2]} + \left(1 - 2\sigma_\phi^2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\sigma_\phi^2)^n (n + 1 + D_{cp})}{n! [(n + 1 + D_{cp})^2 + \Omega^2]} \right) + 2\sigma_\phi^2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\sigma_\phi^2)^n (n + 2 + D_{cp})}{n! [(n + 2 + D_{cp})^2 + \Omega^2]} \right\};$$

где $\sigma_\lambda^2 = \sigma_\phi^2 M_{am}^2$; $\sigma_\lambda^2 = \sigma_\phi^2 M_{\phi m}^2$; $M_{am}, M_{\phi m}$ – постоянные коэффициенты амплитудных и фазовых модуляций соответственно; $D_{cp} = \frac{1}{4\alpha} N_\phi$; N_ϕ – флуктуация фазы; $\Omega = (\omega - \omega_0) / \alpha$; $\Omega = n / 60$ – частота модуляции; ω_0 – круговая частота напряжения питания; n – скорость вращения ротора; ϕ – начальная фаза; $\omega > 0$, α – независимая случайная величина с известным математическим ожиданием ($m_\infty = 0$) и дисперсией (σ^2) [17].

Несмотря на универсальность метода спектрального анализа тока асинхронного электродвигателя, этот метод является сложным по оценке диагностических параметров, в частности, из-за отсутствия возможности увеличения числа анализируемых гармоник в связи с наложением частотной составляющей от различных повреждений [5]. Для исключения наложения дефектов вследствие наличия одновременных повреждений применяется спектральный метод векторов Парка тока (PI) и напряжения (PU) [11], что и является перспективным направлением его использования для целей функционального диагностирования асинхронных двигателей, постоянно работающих с частыми пусками и торможениями [6].

Вариантом функционального диагностирования может служить появление определенных гармоник в спектре их внешнего магнитного поля [17]. Наличие в высшем магнитном поле двигателя гармоник $k - 1$, $k + 1$ является диагностическим признаком погрешностей подшипников, а наличие $3k$ -гармоник – признаком межвитковых замыканий обмоток статора. Основной недостаток метода внешнего магнитного поля заключается в том, что применяться он может только для диагностирования асинхронных двигателей с немагнитическим корпусом.

Заключение

Отличительной особенностью ИИК, предназначенного для фундаментального диагностирования динамических объектов электрифицированного железнодорожного транспорта, является работа в энергонапряженном режиме под относительно большими величинами магнитной индукции и электрической напряженности, а также несимметричном и несинусоидальном режиме. Это обуславливает повышенные требования к метрологическим, динамическим и надежностным характеристикам измерительных средств. Для формирования диагностических признаков обоснована целесообразность применения нормального гауссовского, экспоненциального, логарифмически нормального распределения и распределения Вейбулла – Гнеденко.

Список литературы

1. Мироновский Л.А. Функциональное диагностирование динамических систем. СПб. Изд-во МГУ-Гриф, 1998. 256 с.
2. Якубов М.С. Мостовые преобразователи параметров комплексного сопротивления объектов железнодорожного транспорта. Ташкент : Fan va texnologiya, 2017. 184 с.
3. Четвергов В.А. Техническая диагностика локомотивов-М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп, 2014. 371 с.
4. Сидельников Л.Г., Афанасьев Д.О. Обзор методов контроля технического состояния асинхронных двигателей в процессе эксплуатации // Вестн. ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2013. № 7. С. 127–135.
5. Зеленченко А.Л., Федоров Д.В. Диагностические комплексы электрического подвижного состава. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп, 2014. 112 с.
6. Плакс А.В. Системы управления электрическим подвижным составом. М. : Маршрут, 2005. 360 с.
7. Костиков В.Н., Науменко А.П. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2014. 378 с.
8. Зайцев А.В. Определение возможности уменьшения числа датчиков вибрации при диагностировании // Наука, образование, бизнес : регион. науч.-практ. конф. Омск, 2009. С. 154–157.
9. Барков А.В. Вибрационная диагностика колесно-редукторных блоков на железнодорожном транспорте / А.В. Барков и др. СПб. Изд. Центр СПбМТУ, 2002. 103 с.
10. Randall R.B. Vibration-based condition monitoring industrial, aerospace and Automotive applications. Chichester, United Kingdom : John Wiley & Sons, 2011. 289 p.
11. Петухов В. Диагностика электродвигателей спектральный анализ модулей векторов Парка тока и напряжения. // Новости электротехники. 2008. № 1(50). С. 33–37.
12. Taylor Y.Y. The Vibration Analysis Handbook. Hawthorne : Vibration Consultants, 2003. 375 p.
13. Якубов М.С., Файзуллаев Ж.С. Информационно-математическая модель диагностирования эксплуатационного режима тягового электродвигателя // Химическая технология. Контроль и управление. 2018. № 3. С. 85–92.
14. Петухов В. Диагностика состояния электродвигателей: Метод контрольного анализа потребляемого тока // Новости электротехники. 2005. № 1(31). С. 23–28.
15. Разработка методики токовой диагностики асинхронных двигателей по нестационарным режимам работы / В.В. Кунцов и др. // Вестник Юж. урал. гос. ун-та. 2009. № 34 (167). С. 123–129.
16. ГОСТ-17509-72 Надежность изделий машиностроения. Система сбора и обработки информации, методы определения точечных оценок показателей надежности по результатам наблюдений. Введ. 1973–01–01. М. : Изд-во стандартов, 1974. 57 с.
17. Тонких В.Г. Метод диагностики асинхронных электродвигателей в сельском хозяйстве на основе анализа их внешнего магнитного поля. Барнаул, 2009. 181 с.
18. Статистическая радиотехника. Примеры и задачи / В.Т. Горяинов и др. М. : Сов. Радио, 1980. 544 с.
19. Vibration analysis as a diagnosis tool for health monitoring of industrial machines / J. P. Amezquita-Sanchez, D. Morinigo-Sotelo et al. // Hindawi. DOI:10.1155/2016/1235139.
20. Trout J. Vibration analysis explained. URL: <https://www.reliableplant.com/vibration-analysis-31569> (access date: 12.03.2021).
21. Vibration condition monitoring techniques for fault diagnosis of electromotor with 1,5 kW power / H. Mohamadi Monavar, H. Ahmadi, S.S. Mohtasebi et al. // Journal of Applied Sciences. DOI:10.3923/jas.2008.1268.1273.

References

1. Mironovskii L.A. Funktsional'noe diagnostirovanie dinamicheskikh system [Functional diagnostics of dynamic systems]. St. Petersburg, 1998. 256 p.
2. Yakubov M.S. Mostovye preobrazovateli parametrov kompleksnogo soprotivleniya ob"ektov zheleznodorozhnogo transporta [Bridge converters of parameters of complex resistance of railway transport objects]. Fan va texnologiya Publ., 2017. 184 p.
3. Chetvergov V.A. Tekhnicheskaya diagnostika lokomotivov [Technical diagnostics of locomotives]. Moscow: FGBOU Educational-Methodical Center of Education Publ., 2014. 71 p.
4. Sidel'nikov L.G., Afanas'ev D.O. Obzor metodov kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya asinkhronnykh dvigatelei v protsesse ekspluatatsii [Review of methods of monitoring the technical state of asynchronous motors during operation]. Vestnik PNIPIU. Geologiya. Neftgazovoe i gornoe delo [Bulletin of PNRPU. Geology. Oil and gas and mining], 2013. No. 7. Pp. 127–135.
5. Zelenchenko A.L., Fedorov D.V. Diagnosticheskie komplekxy elektricheskogo podvizhnogo sostava [Diagnostic complexes for electric rolling stock]. Moscow: FGBOU Publ., 2014. 112 p.
6. Plaks A.V. Sistemy upravleniya elektricheskim podvizhnym sostavom [Control systems for electric rolling stock]. Moscow: Marshrut Publ., 2005. 360 p.
7. Kostikov V.N., Naumenko A.P. Osnovy vibroakusticheskoi diagnostiki i monitoringa mashin [Fundamentals of vibroacoustic diagnostics and machine monitoring]. GOU Omsk State Technical University. Novosibirsk: SORAN Publ., 2014. 378 p.
8. Zaitsev A.V. Opredelenie vozmozhnosti umen'shcheniya chisla datchikov vibratsii pri diagnostirovanii [Determination of the possibility of reducing the number of vibration sensors during diagnosis]. Nauka, obrazovanie, biznes. Regional'naya nauch.-prak. konf. [Science, education, business: regional scientific-practical. conf.]. Omsk, 2009. Pp. 154–157.
9. Barkov A.V. et al. Vibratsionnaya diagnostika kolesno-reduktornykh blokov na zheleznodorozhnom transporte [Vibration diagnostics of wheel-gear units on railway transport]. St. Petersburg: SPBMTU Publ. center, 2002. 103 p.

10. Randall R.B. Vibration-based condition monitoring: industrial, aerospace and automotive applications. John Wiley & Sons. March 2011, 289 p.
11. Petukhov V. Diagnostika elektrodvigatelei. spektral'nyi analiz modulei vektorov Parka toka i napryazheniya [Diagnostics of electric motors. Spectral analysis of modules of vectors of the Park of current and voltage]. *Novosti elektrotehniki [Electrical Engineering News]*, 2008. No. 1(50). Pp. 33–37.
12. Taylor Y.Y. The Vibration Analysis Handbook. VC1, 2003. 375 p.
13. Yakubov M.S., Faizullaev Zh.S. Informatsionno-matematicheskaya model' diagnostirovaniya ekspluatatsionnogo rezhima tyagovogo elektrodvigateleya [Information-mathematical model for diagnosing the operating mode of a traction motor]. *Mezhdunarodnyi zhurnal «Khimicheskaya tekhnologiya. Kontrol' i upravlenie» [International journal "Chemical technology. Control and management"]*, 2018. No. 3. Pp. 85–92.
14. Petukhov V. Diagnostika sostoyaniya elektrodvigatelei: Metod kontrol'nogo analiza potrebyaemogo toka [Diagnostics of the state of electric motors: A method of control analysis of the consumed current]. *Novosti elektrotehniki [Electrical Engineering News]*, 2005. No. 1(31). Pp. 23–28.
15. Kuntsov V.V. et al. Razrabotka metodiki tokovoi diagnostiki asinkhronnykh dvigatelei po nestatsionarnym rezhimam raboty [Development of a methodology for current diagnostics of asynchronous motors by non-stationary operating modes] *Vestnik Yuzh. Ural. gos. un-ta [The bulletin of South Ural State University]*, 2009. No. 34 (167). Pp. 123–129.
16. GOST-17509-72 Nadezhnost' izdelii mashinostroeniya. Sistema sbora i obrabotki informatsii, metody opredeleniya tochnykh otsenok pokazatelei nadyozhnosti po rezul'tatom nablyudeni [GOST-17509-72. Reliability of mechanical engineering products. System for collecting and processing information, methods for determining point estimates of reliability indicators based on the results of observations]. 1972. 57 p.
17. Tonkikh V.G. Metod diagnostiki asinkhronnykh elektrodvigatelei v sel'skom khozyaystve na osnove analiza ikh vneshnego magnitnogo polya [A method of diagnostics of asynchronous electric motors in agriculture based on the analysis of their external magnetic field]. Barnaul, 2009. 181 p.
18. Goryainov V.T. Statisticheskaya radiotekhnika. Primery i zadashi [Statistical radio engineering. Examples and problems]. Moscow: Sov. Radio Publ., 1980. 544 p.
19. Juan Pablo Amezcua-Sanchez, Daniel Morinigo-Sotelo, Konstantinos N. Vibration analysis as a diagnosis tool for health monitoring of industrial machines [electronic media]. URL: <https://www.hindawi.com/journals/sv/about/>.
20. Trout J. Vibration analysis explained [Electronic media]. URL: <https://www.reliableplant.com/vibration-analysis-31569>.
21. Mohamadi Monavar H., Ahmadi H., Mohtasebi S.S. and Hasani S. "Vibration condition monitoring techniques for fault diagnosis of electromotor with 1,5 kW power [Electronic media]. URL: <https://scialert.net/abstract/?doi=jas.2008.1268.1273>.

Информация об авторах

Якубов Мирджалил Сагатович – канд. техн. наук, профессор, профессор кафедры электроснабжения, Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент, e-mail: etkmyakubov@yandex.ru

Исроилов Улугбек Шавкатович – старший преподаватель кафедры электротехники, Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент, e-mail: etkmyakubov@yandex.ru

Каримов Ислом Азим угли – ассистент кафедры электроснабжения, Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент, e-mail: Smartstar3009101@gmail.com

Information about the authors

Mirdzhalil S. Yakubov – Ph. D. of Engineering Science, Professor, Professor of the Subdepartment of Power Supply, Tashkent State Transport University, Tashkent, e-mail: etkmyakubov@yandex.ru

Ulugbek Sh. Isroilov – Senior Lecturer of the Subdepartment of Electrical Engineering, Tashkent State Transport University, Tashkent, e-mail: etkmyakubov@yandex.ru

Islom Azim ugli Karimov – assistant of the Subdepartment of Power Supply, Tashkent State Transport University, Tashkent, e-mail: Smartstar3009101@gmail.com

DOI 10.26731/1813-9108.2021.2(70).43-51

УДК 621.311.6

Устойчивость работы параметрического умножителя числа фаз на основной частоте

И. М. Бедрицкий, К. К. Жураева, Л. Х. Базаров

Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент, Республика Узбекистан

Резюме

Умножители числа фаз находят применение в устройствах автоматики, радиоэлектронной аппаратуры, средств связи в случаях, когда нет возможности воспользоваться многофазными цепями или их применение связано с определенными техническими или экономическими трудностями. Наибольшее распространение получили устройства такого типа в виде умножителя числа фаз, которые находят применение в однофазных цепях для питания трехфазных потребителей. С точки зрения схемотехники, наиболее простыми являются умножители числа фаз на базе нелинейных LC-цепей, имеющие высокую надежность и относительно невысокие габариты при питании устройств малой и средней мощности. Однако умножители числа фаз на базе LC-цепей при определенных условиях могут работать в резонансных режимах, следовательно, в них могут возникать скачки напряжений или токов. В статье рассматривается работа параметрического умножителя числа фаз, работающего на основной частоте, находящего применение в однофазных цепях для питания трех-

фазных потребителей, с точки зрения теории устойчивости колебательных процессов. Исследование устойчивости умножителя числа фаз проводится по критерию устойчивости Гурвица. Анализируются характерные как схемотехнические, так и режимные параметры умножителя числа фаз на базе LC-цепей и их влияние на его устойчивую работу. Получены данные, что изменение нагрузки преобразователя числа фаз на базе LC-цепей от короткого замыкания до холостого хода на режим устойчивости не влияет. Сделан вывод, что с точки зрения теории устойчивости колебаний предлагаемая цепь является пригодной для разработки реальных умножителей частоты малой и средней мощности.

Ключевые слова

устойчивость колебаний, параметрический умножитель числа фаз, критерий устойчивости, границы устойчивости, скачкообразное изменение параметров

Для цитирования

Бедрицкий И.М. Устойчивость работы параметрического умножителя числа фаз на основной частоте / И. М. Бедрицкий, К. К. Жураева, Л. Х. Базаров // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 2 (70). – С. 43–51. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).43-51

Информация о статье

поступила в редакцию: 12.01.2021, поступила после рецензирования: 09.02.2021, принята к публикации: 25.02.2021

Stability of the parametric phase number multiplier at the fundamental frequency

I. M. Bedritskii, K. K. Zhuraeva, L. Kh. Bazarov

Tashkent State Transport University, Tashkent, the Republic of Uzbekistan

Abstract

Phase number multipliers are used in automation devices, electronic equipment, communications in cases where there is no possibility to use multiphase circuits or their use is associated with certain technical or economic difficulties. Devices of this type in the form of a phase number multiplier, which found application in single-phase circuits for powering three-phase consumers, got the most widespread use. From the point of view of circuitry, the simplest are phase multipliers based on nonlinear LC circuits, which have high reliability and relatively small dimensions when powering devices of low and medium power. However, phase number multipliers based on LC circuits can operate in resonant modes under certain conditions, hence, voltage or current surges may occur in them. The article considers the work of a parametric phase number multiplier operating at the fundamental frequency, used in single-phase circuits for powering three-phase consumers from the point of view of the theory of stability of oscillatory processes. The stability of the phase number multiplier is studied according to the Hurwitz stability criterion. The characteristic circuit design and operating parameters of the phase multiplier based on LC circuits and their influence on its stable operation are analyzed. According to data obtained, the change in the load of the phase number converter based on LC circuits from short circuit to no-load does not affect the stability mode. It is concluded that from the point of view of the theory of vibration stability, the proposed circuit is suitable for the development of real frequency multipliers of low and medium power.

Keywords

stability of oscillations, parametric phase number multiplier, stability criterion, stability boundaries, abrupt change of parameters

For citation

Bedritskii I. M., Zhuraeva K. K., Bazarov L. Kh. Ustoichivost' raboty parametricheskogo umnozhitelya chisla faz na osnovnoi chastote [Stability of the parametric phase number multiplier at the fundamental frequency]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 2 (70), pp. 43–51. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).43-51

Article Info

Received: 12.01.2021, Revised: 09.02.2021, Accepted: 25.02.2021

Введение

Искусственные умножители числа фаз применяются для питания в устройствах автоматики, радиоэлектронной аппаратуры, средств связи и электро-технологических устройств в случаях, когда рядом нет многофазных цепей или их применение встречает технические или экономические трудности [1–5]. Наиболее распространенными устройствами такого типа являются умножители числа фаз, находящие применение в однофазных цепях для питания трех-

фазных потребителей. Самыми простыми с точки зрения схемотехники являются умножители числа фаз на базе нелинейных LC-цепей [3, 5–7], имеющие высокую надежность и относительно невысокие габариты при питании устройств малой и средней мощности. Однако умножители числа фаз на базе LC-цепей могут работать в резонансных режимах, следовательно, в них могут возникать скачки напряжений или токов. Поэтому исследование устойчивости работы LC-умножителей и определе-

ние границ его устойчивой работы представляет существенный научный интерес.

Постановка задачи

Рассмотрим параметрический множитель числа фаз по схеме (рис. 1) [7], где S_1, S_2, S_3 – площади сечений стержней; L_1, L_2, L_3 – средние длины магнитных линий; Φ_1, Φ_2, Φ_3 – мгновенные значения магнитных потоков в стержнях магнитопровода; g_1, g_2 – активные проводимости первичных обмоток; W_1, W_2 – числа витков первичных обмоток; i_1, i_2 – мгновенные значения тока в первичных обмотках; i_{g1}, i_{g2} – мгновенные значения тока в проводимостях первичных обмоток; C_1, C_2 – емкости конденсаторов, подключенных параллельно первичным обмоткам; i_{c1}, i_{c2} – мгновенные значения тока в конденсаторах; $i = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i)$ – мгновенное значение питающего тока, в первом приближении принятого синусоидальным; $u = U_m \cdot \sin(\omega t + \psi_u)$ – мгновенное значение питающего напряжения; W_3, W_4, W_5 – числа витков вторичных обмоток множителя; $A, B, C, 0$ – соответственно выводы начала искусственных фаз множителя и нулевой точки.

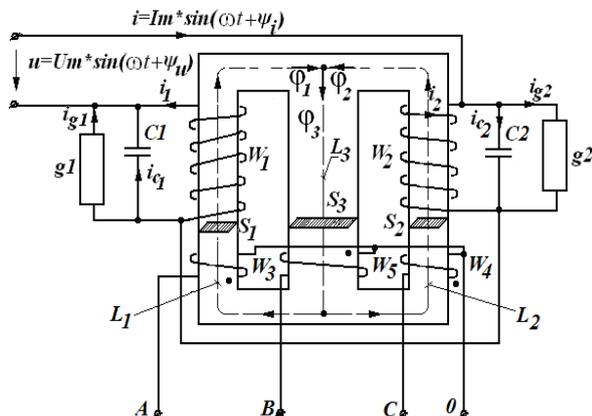


Рис. 1. Параметрический множитель числа фаз

Fig. 1. Parametric multiplier of the number of phase

С учетом аппроксимации кривой намагничивания $H = k \cdot b^9$ [8–14] после некоторых преобразований эта схема опишется системой уравнений

$$\begin{cases} b_1 \cdot S_1 + b_2 \cdot S_2 - b_3 \cdot S_3 = 0, \\ b_1^9 = \frac{k \cdot L_2 \cdot b_2^9 - i_2 \cdot W_2 + i_1 \cdot W_1}{k \cdot L_1}, \\ u = W_1 \cdot S_1 \frac{db_1}{dt} + W_2 \cdot S_2 \frac{db_2}{dt}, \\ i = i_2 + i_c + i_{g2}, \\ i = i_1 + i_{g1}, \end{cases} \quad (1)$$

где мгновенные значения токов в ветвях цепи могут быть найдены из выражений $i_2 = \frac{k \cdot L_2 \cdot b_2^9}{W_2}$;

$$i_c = W_2 \cdot C \cdot S_2 \cdot \frac{d_2 b_2}{dt^2}; \quad i_{g2} = W_2 \cdot g_2 \cdot S_2 \frac{db_2}{dt}$$

$$i_1 = \frac{k \cdot L_1 \cdot b_1^9}{W_1}; \quad i_{g1} = W_1 \cdot g_1 \cdot S_1 \cdot \frac{db_1}{dt}$$

В этой упрощенной модели множителя числа фаз не применяется модель характеристики намагничивания сердечника в виде петли гистерезиса [15, 16], так как нелинейные индуктивности L_1 и L_2 работают в режиме, близком к насыщению, а ширина петли гистерезиса близка к нулевому значению.

Преобразуем систему (1), для чего произведем замену переменных:

$$\frac{db_2}{dt} = F; \quad \frac{d_2 b_2}{dt^2} = \frac{dF}{dt} \quad (2)$$

Выразим через полученное выражение $\frac{dF}{dt}$ и после преобразования получим:

$$\begin{aligned} \frac{dF}{dt} = & b_1^9 \left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) - b_2^9 \left(\frac{L_2}{L_1} + \frac{W_1 \cdot L_2}{W_2 + L_1}\right) + \\ & + \frac{db_1}{dt} \left(\frac{W_1 \cdot W_2 \cdot g_1 \cdot S_1 + W_1^2 \cdot g_1 \cdot S_1}{k \cdot L_1}\right) - \\ & - F \left(\frac{g_2 \cdot S_2 \cdot W_2^2 + W_1 \cdot W_2 \cdot g_2 \cdot S_2}{k \cdot L_1}\right). \end{aligned}$$

Выразим $\frac{db_1}{dt}$ в соответствии с (1), получим

$$\frac{db_1}{dt} = \frac{u - W_2 \cdot S_2 \cdot F}{W_1 \cdot S_1}$$

Введем обозначения:

$$A = W_2 \cdot S_2; \quad B = W_1 \cdot S_1; \quad D = 1 + \frac{W_2}{W_1}; \quad K = \frac{L_2}{L_1} + \frac{W_1 \cdot L_2}{W_2 + L_1};$$

$$L = \frac{W_1 \cdot W_2 \cdot g_1 \cdot S_1 + W_1^2 \cdot g_1 \cdot S_1}{k \cdot L_1}; \quad M = \frac{W_2^2 \cdot g_2 \cdot S_2 + W_1 \cdot W_2 \cdot g_2 \cdot S_2}{k \cdot L_1};$$

$$N = \frac{W_2^2 \cdot C \cdot S_2 + W_1 \cdot W_2 \cdot C \cdot S_2}{k \cdot L_1}$$

С учетом принятых обозначений получим выражение для $\frac{dF}{dt}$:

$$\frac{dF}{dt} = \frac{b_1^9 \cdot D - b_2^9 \cdot k + \left(\frac{u - A \cdot F}{D} \cdot L\right) - F \cdot M}{N}.$$

Учитывая, что $u = U_m \cdot \sin(\omega t + \psi_u)$, выражение (1) преобразуется к виду

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{db_1}{dt} &= \frac{U_m \sin(\omega t + \psi_u) - A \cdot F}{B}, \\ \frac{dF}{dt} &= \frac{b_1^9 \cdot D - b_2^9 \cdot k + \frac{U_m \sin(\omega t + \psi_u) - A \cdot F}{D} \cdot L - F \cdot M}{N}, \\ \frac{db_2}{dt} &= F. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Эту систему используем как основу для исследования на устойчивость работы параметрического множителя числа фаз.

Решение задачи

Найдем общие выражения для исследования устойчивости множителя числа фаз по критерию устойчивости Гурвица [17, 18]. Известна система дифференциальных уравнений (3), описывающая электрическое состояние цепи. Для уменьшения числа неизвестных выразим F из (2) и, подставив его в (3), после преобразования получим:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{db_1}{dt} &= A_1 \cdot U_m \sin(\omega t + \psi_u) - A_2 \cdot \frac{db_2}{dt}; \\ \frac{d_2 b_2}{dt^2} &= D_1 \cdot b_1^9 - D_2 \cdot b_2^9 + D_3 \cdot U_m \sin(\omega t + \psi_u) - \\ &- D_4 \cdot \frac{db_2}{dt}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $A_1 = \frac{1}{B}$; $A_2 = \frac{A}{B}$; $D_1 = \frac{D}{N}$; $D_2 = \frac{K}{N}$;

$$D_3 = \frac{L}{BN}; D_4 = \frac{AL}{BN} - \frac{M}{N}.$$

Преобразуем (4) по методу медленно меняющихся амплитуд, считая, что неизвестные b_1 , b_2 могут быть представлены следующим образом:

$$\begin{aligned} b_1 &= x \sin \omega t + y \cos \omega t, \\ b_2 &= m \sin \omega t + n \cos \omega t, \end{aligned}$$

где x , y , m , n – медленно меняющиеся во времени амплитуды искоемых колебаний. Найдем производные $\frac{db_1}{dt}$, $\frac{db_2}{dt}$ и учитывая, что x , y , m , n медленно изменяются во времени, в первом приближении получим

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{db_1}{dt} &= x\omega \cdot \cos \omega t - y\omega \cdot \sin \omega t; \\ \frac{db_2}{dt} &= m\omega \cdot \cos \omega t - n\omega \cdot \sin \omega t; \\ \frac{d_2 b_2}{dt^2} &= -(\omega^2 m + 2\omega \cdot \frac{dn}{dt}) \sin \omega t + \\ &+ (-\omega^2 n + 2\omega \cdot \frac{dm}{dt}) \cos \omega t. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Подставив (5) в (4) получаем:

$$\left\{ \begin{aligned} x\omega \cdot \cos \omega t - y\omega \cdot \sin \omega t &= A_1 \cdot U_m \sin(\omega t + \psi_u) - \\ &- A_2(m\omega \cdot \cos \omega t - n\omega \cdot \sin \omega t), \\ -(\omega^2 m + 2\omega \cdot \frac{dn}{dt}) \sin \omega t + (-\omega^2 n + 2\omega \cdot \frac{dm}{dt}) \cos \omega t &= \\ = D_1(x \sin \omega t + y \cos \omega t)^9 - \\ - (D_2(m \sin \omega t + n \cos \omega t))^9 + D_3(U_m \sin(\omega t + \psi_u) - \\ - D_4(m\omega \cdot \cos \omega t - n\omega \cdot \sin \omega t)). \end{aligned} \right\}$$

Преобразуем полученные выражения по методу гармонического баланса. Для первого выражения имеем

$$\begin{aligned} x\omega \cdot \cos \omega t - y\omega \cdot \sin \omega t &= A_1 U_m \sin \omega t \cdot \cos \psi_u + \\ &+ A_1 U_m \cos \omega t \cdot \sin \psi_u - A_2 \omega \cos \omega t + A_2 n \omega \cdot \sin \omega t. \end{aligned} \quad (6)$$

Приравнивая в (6) коэффициенты при $\cos \omega t$ и $\sin \omega t$ получаем

$$\left\{ \begin{aligned} -y\omega &= A_1 U_m \cdot \cos \psi_u + A_2 n \omega, \\ x\omega &= A_1 U_m \cdot \sin \psi_u - A_2 m \omega. \end{aligned} \right. \quad (7)$$

Для второго выражения двучлены $(x \sin \omega t + y \cos \omega t)^9$ и $(m \sin \omega t + n \cos \omega t)^9$ преобразуем по биному Ньютона. В полученных выражениях степени $\cos \omega t$ и $\sin \omega t$ преобразуем в сумму гармоник в первой степени и, не учитывая четные гармоники, а также гармоники выше первой, будем иметь

$$\begin{aligned} (x \sin \omega t + y \cos \omega t)^9 &\approx \sin \omega t(0,5x^9 + 19,7x^7 y^2 + \\ &+ 29,5x^5 y^4 + 19,7x^3 y^6 + 2,5xy^8) + \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} + \cos \omega t(14,8x^8 y + 39,4x^6 y^3 + 29,5x^4 y^5 + \\ + 9,8x^2 y^7 + 0,5y^9), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (m \sin \omega t + n \cos \omega t)^9 &\approx \sin \omega t(0,5m^9 + \\ &+ 19,7m^7 n^2 + 29,5m^5 n^4 + 19,7m^3 n^6 + \\ &+ 2,5mn^8) + \cos \omega t(14,8m^8 n + 39,4m^6 n^3 + \\ &+ 29,5m^4 n^5 + 9,8m^2 n^7 + 0,5n^9). \end{aligned} \quad (9)$$

Обозначим коэффициент при $\sin \omega t$ в (8) через X , при $\cos \omega t$ – через Y , а в выражении (9) коэффициент при $\sin \omega t$ через M , а при $\cos \omega t$ – через N . Учитывая принятые обозначения и сравнивая коэффициенты при $\sin \omega t$ и $\cos \omega t$, преобразуем полученное выражение по методу гармонического баланса, получим систему:

$$\left\{ \begin{array}{l} -(\omega^2 m + 2\omega \frac{dn}{dt}) = D_1 X - D_2 M + D_3 U_m \cos \psi_u + D_4 n \omega, \\ -\omega^2 n + 2\omega \frac{dm}{dt} = D_1 Y - D_2 N + D_3 U_m \sin \psi_u - D_4 m \omega. \end{array} \right.$$

С учетом (6) и (7) имеем систему алгебраических и дифференциальных уравнений относительно медленно меняющихся амплитуд:

$$\left\{ \begin{array}{l} -y\omega = A_1 U_m \cos \psi_u + A_2 n \omega \\ x\omega = A_1 U_m \sin \psi_u - A_2 m \omega \\ -(\omega^2 m + 2\omega \frac{dn}{dt}) = D_1 X - D_2 M + D_3 U_m \cos \psi_u + D_4 n \omega \\ -\omega^2 n + 2\omega \frac{dm}{dt} = D_1 Y - D_2 N + D_3 U_m \sin \psi_u - D_4 m \omega \end{array} \right. \quad (10)$$

Преобразуем систему (10) относительно производных медленно меняющихся амплитуд, для чего выразим из первых двух выражений (10) соответственно y и x . Получаем

$$y = \frac{A_1 U_m \cos \psi_u - A_2 n}{\omega}; \quad x = \frac{A_1 U_m \sin \psi_u - A_2 m}{\omega}. \quad (11)$$

$$\text{Обозначим } C = \frac{A_1 U_m \cdot \cos \psi_u}{\omega}; \quad S = \frac{A_1 U_m \cdot \sin \psi_u}{\omega}.$$

Подставим (11) в два последних выражения из (10) с учетом вновь принятых обозначений. Так как X и Y являются функциями x и y , то с новой подстановкой они станут функциями m и n . Получим:

$$\begin{aligned} X_{mn} = & 0,5(s - A_{2m})^9 + 19,7(s - A_{2m})^7(-c - A_{2n})^2 + \\ & + 29,5(s - A_{2m})^5(-c - A_{2n})^4 + \\ & + 19,7(s - A_{2m})^3(-c - A_{2n})^6 + 2,5(s - A_{2m})(-c - A_{2n})^8, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} Y_{mn} = & 14,8(s - A_{2m})^8(-c - A_{2n}) + \\ & + 39,4(s - A_{2m})^6(-c - A_{2n})^3 + \\ & + 29,5(s - A_{2m})^4(-c - A_{2n})^5 + \\ & + 9,8(s - A_{2m})^2(-c - A_{2n})^7 + 0,5(-c - A_{2n})^9. \end{aligned} \quad (13)$$

При подстановке (12) и (13) в два нижних уравнения системы (10) после преобразований получим систему дифференциальных уравнений относительно производных медленно меняющихся амплитуд m и n :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dn}{dt} = \frac{-D_1 X_{mn} + D_2 M - D_3 U_m \cos \psi_u - D_4 \cdot n - \omega m}{2\omega} \\ \frac{dm}{dt} = \frac{D_1 Y_{mn} - D_2 N + D_3 U_m \sin \psi_u - D_4 \cdot m + \omega n}{2\omega} \end{array} \right. \quad (14)$$

Обозначим m и n в установившихся режимах через m_0 и n_0 . Подставив в (14) вместо m и n их установившиеся значения, а также приравняв $\frac{dn}{dt} = 0$; $\frac{dm}{dt} = 0$, получаем систему алгебраических уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{-D_1 X_{mn}(0) + D_2 M(0) - D_3 U_m \cos \psi_u}{2\omega} - \frac{D_4 n(0) - \omega m(0)}{2} = 0, \\ \frac{D_1 Y_{mn}(0) - D_2 N(0) + D_3 U_m \sin \psi_u}{2\omega} - \frac{D_4 m(0) + \omega n(0)}{2} = 0. \end{array} \right. \quad (15)$$

Решая систему (15), можно найти установившиеся значения амплитуд m_0 и n_0 .

Пусть в результате возмущения амплитуды колебаний получили малые приращения Δm и Δn , т. е. $m = m_0 + \Delta m$ $n = n_0 + \Delta n$. С учетом сказанного из (15) получаем:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d(n_0 + \Delta n)}{dt} = \frac{-D_1 \cdot X_{\left(\begin{smallmatrix} n_0 + \Delta n \\ m_0 + \Delta m \end{smallmatrix} \right)} + D_2 \cdot M_{\left(\begin{smallmatrix} n_0 + \Delta n \\ m_0 + \Delta m \end{smallmatrix} \right)} - D_3 U_m \cos \psi_u}{2\omega} - \frac{D_4 (n_0 + \Delta n) - \omega (m_0 + \Delta m)}{2} \\ \frac{d(m_0 + \Delta m)}{dt} = \frac{D_1 \cdot Y_{\left(\begin{smallmatrix} n_0 + \Delta n \\ m_0 + \Delta m \end{smallmatrix} \right)} - D_2 \cdot N_{\left(\begin{smallmatrix} n_0 + \Delta n \\ m_0 + \Delta m \end{smallmatrix} \right)} + D_3 U_m \sin \psi_u}{2\omega} - \frac{D_4 (m_0 + \Delta m) + \omega (n_0 + \Delta n)}{2} \end{array} \right.$$

Развернем значения $\frac{d(n_0 + \Delta n)}{dt}$ и $\frac{d(m_0 + \Delta m)}{dt}$ из последнего выражения в ряд

Тейлора по малым приращениям Δn и Δm , и в силу их малости ограничимся слагаемыми с первыми степенями Δn и Δm . Для указанного разложения найдем частные производные:

$$\begin{aligned} \frac{\partial X_{mn}}{\partial m} &= 4,5(s - A_{2m})^8 \cdot A_2 + 137,9(-c - A_{2n})^2(s - A_{2m})^6 \cdot A_2 + \\ &+ 147,5(-c - A_{2n})^4(s - A_{2m})^4 \cdot A_2 + 59,1(-c - A_{2n})^6(s - A_{2m})^2 \cdot A_2 + 2,5(s - A_{2m})(-c - A_{2n})^8 \cdot A_2 \\ \frac{\partial X_{mn}}{\partial n} &= -39,4(-c - A_{2n})(s - A_{2m})^7 \cdot A_2 - 118(-c - A_{2n})^3(s - A_{2m})^5 - \\ &- 118,2(-c - A_{2n})^5(s - A_{2m})^3 \cdot A_2 - 20(-c - A_{2n})^7(s - A_{2m}) \cdot A_2 \\ \frac{\partial Y_{mn}}{\partial m} &= 118,4(-c - A_{2n})(s - A_{2m})^7 \cdot A_2 + 236,4(s - A_{2m})^5(-c - A_{2n})^3 \cdot A_2 + \\ &+ 118(s - A_{2m})^3(-c - A_{2n})^5 \cdot A_2 + 19,6(s - A_{2m})(-c - A_{2n})^7 \cdot A_2 \\ \frac{\partial Y_{mn}}{\partial n} &= -14,8(s - A_{2m})^8 A_2 - 118,2(-c - A_{2n})^2(s - A_{2m})^6 \cdot A_2 - \\ &- 147,5(-c - A_{2n})^4(s - A_{2m})^4 \cdot A_2 - 68,6(-c - A_{2n})^6(s - A_{2m})^2 \cdot A_2 - 4,5(-c - A_{2n})^8 \cdot A_2 \\ \frac{\partial M_{mn}}{\partial m} &= 4,5m^8 + 137,9n^2m^6 + 147,5n^4m^4 + 59,1n^6m^2 + 2,5n^8. \\ \frac{\partial M_{mn}}{\partial n} &= 39,4m^7n + 118m^5n^3 + 118,2n^3m^5 + 20mn^7. \\ \frac{\partial N_{mn}}{\partial m} &= 118,4mn^7 + 2326,4n^3m^5 + 118n^5m^3 + 19,6n^7m. \\ \frac{\partial N_{mn}}{\partial n} &= 14,8m^8 + 118,2m^6n^2 + 147,5m^4n^4 + 68,6m^2n^6 + 4,5n^8. \end{aligned}$$

Подставим в найденные выражения значения m_0 и n_0 установившегося режима и введем обозначения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial X_{mn(m=m_0, n=n_0)}}{\partial m} &= X_1; \quad \frac{\partial X_{mn(m=m_0, n=n_0)}}{\partial n} = X_2; \\ \frac{\partial Y_{mn(m=m_0, n=n_0)}}{\partial m} &= Y_1; \quad \frac{\partial Y_{mn(m=m_0, n=n_0)}}{\partial n} = Y_2; \\ \frac{\partial M_{mn(m=m_0, n=n_0)}}{\partial m} &= M_1; \quad \frac{\partial M_{mn(m=m_0, n=n_0)}}{\partial n} = M_2; \\ \frac{\partial N_{mn(m=m_0, n=n_0)}}{\partial m} &= N_1; \quad \frac{\partial N_{mn(m=m_0, n=n_0)}}{\partial n} = N_2. \end{aligned} \quad (16)$$

Обозначим также

$$\begin{aligned} X_{mn(m=m_0, n=n_0)} &= X_0; \quad Y_{mn(m=m_0, n=n_0)} = Y_0; \\ M_{mn(m=m_0, n=n_0)} &= M_0; \quad N_{mn(m=m_0, n=n_0)} = N_0 \end{aligned} \quad (17)$$

Подставляя в выражения для производных выражения (16) и (17) после преобразований получаем систему уравнений, учитывающую приращения

$$\begin{aligned} \frac{D_1 \cdot X_{(m_0+\Delta m; n_0+\Delta n)}}{2\omega} + \frac{D_2 \cdot M_{(m_0+\Delta m; n_0+\Delta n)}}{2\omega} - \frac{D_3 \cdot U_m \cos \psi_u}{2\omega} - \\ \frac{D_4(n_0+\Delta n)}{2} - \frac{\omega(m_0+\Delta m)}{2} = \\ = \frac{D_1 X_0}{2\omega} + \frac{D_2 M_0}{2\omega} - \frac{D_3 U_m \cos \psi_u}{2\omega} - \frac{D_4 n_0}{2} - \frac{\omega m_0}{2} + \\ + \Delta m \left(\frac{D_1 X_1}{2\omega} + \frac{D_2 M_1}{2\omega} - \frac{\omega}{2} \right) + \Delta n \left(\frac{D_1 X_2}{2\omega} + \frac{D_2 M_2}{2\omega} - \frac{D_4}{2} \right); \end{aligned} \quad (18)$$

Учитывая, что $\frac{d_{(m0+\Delta m)}}{dt} = \frac{d_{\Delta m}}{dt}$, $\frac{d_{(n0+\Delta n)}}{dt} = \frac{d_{\Delta n}}{dt}$, выражение (18) запишется в виде

$$\begin{cases} \frac{d_{\Delta m}}{dt} = \left(\frac{D_1 X_1 + D_2 M_1}{2\omega} - \frac{\omega}{2}\right)\Delta m + \left(\frac{D_1 X_2 + D_2 M_2}{2\omega} - \frac{D_4}{2}\right)\Delta n \\ \frac{d_{\Delta n}}{dt} = \left(\frac{D_1 Y_1 + D_2 N_1}{2\omega} - \frac{\omega}{2}\right)\Delta m + \left(\frac{D_1 X_2 + D_2 M_2}{2\omega} - \frac{D_4}{2}\right)\Delta n \end{cases} \quad (19)$$

Обозначим

$$\alpha = \frac{D_1 X_1 + D_2 M_1}{2\omega} - \frac{\omega}{2}; \quad \beta = \frac{D_1 X_2 + D_2 M_2}{2\omega} - \frac{D_4}{2};$$

$$\gamma = \frac{D_1 Y_1 + D_2 N_1}{2\omega} + \frac{\omega}{2}; \quad \delta = \frac{D_1 Y_2 + D_2 N_2}{2\omega} - \frac{D_4}{2}. \quad (20)$$

Алгебраизируем (19) и с учетом (20), получим систему

$$\begin{aligned} P \cdot \Delta m &= \alpha \cdot \Delta m + \beta \cdot \Delta n \\ P \cdot \Delta n &= \gamma \cdot \Delta m + \delta \cdot \Delta n \end{aligned} \quad (21)$$

Реализация решений

На основании (21) составим характеристическое уравнение, для чего из верхнего выражения (21) выразим Δm и подставим в нижнее выражение. Сокращая полученное выражение на Δn , после преобразований получаем

$$P^2 - P(\alpha + \delta) - \alpha \cdot \delta - \gamma \cdot \beta = 0.$$

В соответствии с критерием Гурвица, для затухания Δm и Δn необходимо, чтобы выполнялись условия:

$$-(\alpha + \delta) > 0; \quad (\alpha \cdot \delta - \gamma \cdot \beta) > 0. \quad (22)$$

В выражении (22) заменим знаки неравенства на знаки равенства, выразим значение α из первого выражения, после подстановки во второе выражение, а также после преобразования получим выражение для некоторой функции, точки которой лежат на

поверхности раздела устойчивого и неустойчивого режимов работы цепи:

$$\alpha = \sqrt{-\gamma \cdot \beta}. \quad (23)$$

Для получения действительных значений α необходимо, чтобы подкоренное выражение было равно нулю или больше нуля, следовательно, возможны сочетания γ и β только с разными знаками.

Далее показан график зависимости $\alpha = \sqrt{-\gamma \cdot \beta}$, представляющий собой поверхности, расположенные над вторым (S1) и четвертым (S2) квадрантами.

В соответствии с (22), точки функции, лежащие под поверхностями S1 и S2 ($\alpha < \sqrt{-\gamma \cdot \beta}$) являются точками неустойчивой работы устройства; точки, принадлежащие поверхностям S1 и S2 ($\alpha = \sqrt{-\gamma \cdot \beta}$) характеризуют работу цепи на границе устойчивой и неустойчивой областей; точки, лежащие выше поверхностей S1 и S2 ($\alpha > \sqrt{-\gamma \cdot \beta}$) характеризуют работу цепи в устойчивой зоне.

На границе устойчивости возможны два режима работы:

1. При $-\gamma = \beta$ или $-\beta = \gamma$, когда одному значению α соответствует одно сочетание γ и β (режимная точка находится на кривых oA или oA'), принадлежащих соответственно поверхностям S1, S2, при-

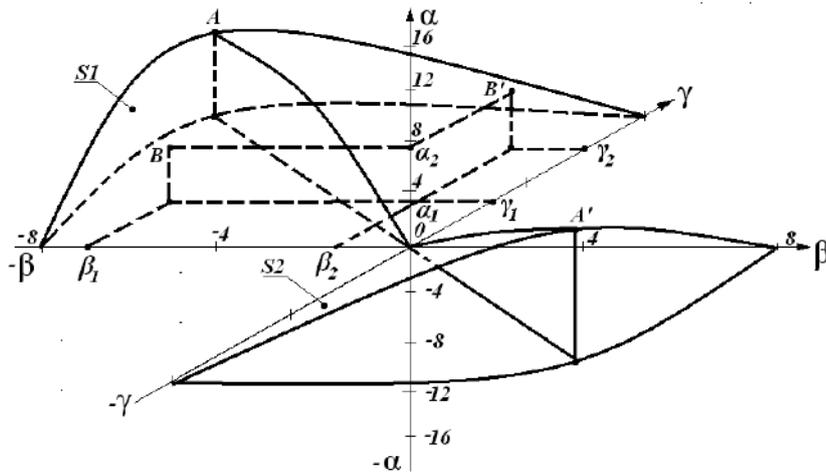


Рис. 2. График зависимости $\alpha = \sqrt{-\gamma \cdot \beta}$

Fig. 2. Dependency graph of $\alpha = \sqrt{-\gamma \cdot \beta}$

чем в этом сочетании γ и β в цепи невозможно скачкообразное изменение параметров.

2. При $\gamma > -\beta$ или $\beta > -\gamma$, когда одному значению α' соответствуют два сочетания γ и β , причем имеются две точки B и B' возможного неустойчивого равновесия, а в цепи возможны скачкообразные изменения параметров.

Заключение

Исследования работы умножителя с представленной схемой (см. рис. 1) при вариации параметров C_1 , $C_2 = 10\text{--}30$ мкФ, W_1 , $W_2 = 300\text{--}450$ витков, $g_1 =$

$= 0,0015 \text{ Ом}^{-1}$, $g_1 = 0,0015\text{--}0,05 \text{ Ом}^{-1}$, $H = 0,1146^9$, сталь магнитопровода – Э360 (3424), выполненные на основе выражения (23), показывают, что периодический процесс на основной частоте в данной цепи устойчив.

Изменение нагрузки преобразователя числа фаз от короткого замыкания до холостого хода на режим устойчивости не влияет.

С точки зрения теории устойчивости цепь пригодна для разработки реальных умножителей частоты.

Список литературы

1. Обзор схемных решений преобразователей числа фаз на трансформаторах / Г.Н. Ворфоломеев, С.В. Мятаж, Н.И. Щуров и др. // Совершенствование технических средств электрического транспорта. Новосибирск, 2001. С. 78–96.
2. Евдокимов С.А. Геометрический способ генерации схемных решений преобразователей числа фаз для выпрямителей // Науч. вестн. Новосиб. гос. техн. ун-та. 2008. № 2(31). С. 107–120.
3. Каримов А.С., Рахимов Г.Р. Автопараметрические преобразователи числа фаз и частоты переменного тока. Ташкент: Фан. 1995. 275 с.
4. Преобразователи числа фаз в электротехнологии / С.Л. Назаров, В.Н. Удинцев, С.А. Бычков и др. // Урал. федер. ун-т им. Б.Н. Ельцина. Екатеринбург. 2019.
5. Ферромагнитный преобразователь частоты и числа фаз в четыре раза: а. с. 1741239 / А.С. Каримов, М.Т. Турдыев, З.Р. Худайкулов и др. № 1741239; опубл. 15.06.1992.
6. Сидоров С.А., Рогинская Л.З. Фазопреобразовательное устройство для несимметричных нагрузок: Электроэнергетические системы и сети Энергосбережение: сб. тр. Уфа, 2013. С. 121–125.
7. Using of the parametric nonlinear LC-circuits in stabilized converters of the number of phases / I. Bedritskiy, K. Juraeva, L. Bazarov et al. // Jour. of Adv Research in Dynamical & Control Systems. 2020. Vol. 12. Iss. 06. P. 98–107.
8. Golubev A.N., Ignatenko S.V. Characteristics optimization for a frequency converter power filter as a function of phase number // Elektronechnic. 1999. № 7. P. 42–46.
9. Halilov N.A., Bedritsky I.M. To a question on approximation of curves of magnetization of electrotechnical steels // News of high schools of republic Uzbekistan. Engineering in Life Sciences. 2002. № 4. С. 33.
10. Привалов Е.Е. Электротехническое материаловедение: учеб. пособие. М.; Берлин: Директ-медиа, 2015. 234 с.
11. Алиев И.И. Электротехнический справочник. Изд. 4-е, испр. М.: Радио Софт, 2006. 384 с.
12. Глебов Б.А., Каюков Д.С., Недолужко И.Г. Модели магнитных компонентов // Практическая силовая электроника. 2003. № 11. С. 20–26.
13. Simple Mathematical Model for Ferromagnetic Core Inductance and Experimental Validation / B. Nana, S.B. Yamgoue, R. Tchitnga et al. American Journal of Electrical and Electronic Engineering. 2015. Vol. 3. № 2. P. 29–36.
14. Пентегов И.В., Красножон А.В. Универсальная аппроксимация кривых намагничивания электротехнических сталей // Электротехника і електромеханіка. 2005. № 7. С. 13–19.
15. Jiles D.C., Atherton D.L. Theory of ferromagnetic hysteresis // Journal of magnetism and magnetic materials. 1986. Vol. 61. № 06.
16. Nonlinear Transformer Model for Circuit Simulation / J.H. Chan, A. Vladimirescu, X.-C. Gao et al. Transactions on computer-aided design. 1991. Vol. 10. № 4. DOI: 10.1109/43.75630.
17. Файзиев М.М., Бейтуллаев Р.Х., Норбоев А.Э. Вопросы устойчивости решения феррорезонансного контура с линейной индуктивностью // Вестник науки и образования. 2017. № 1 (25). С. 15–18.
18. Данилов Л.В., Матханов П.Н., Филиппов Е.С. Теория нелинейных электрических цепей. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 256 с.

References

1. Vorfolomeev G.N., Myatezh S.V., Shurov N.I., Chemodanova O.V., Chemodanov S.S., Fleisher O.N. Obzor skhemykh reshenii preobrazovatelei chisla faz na transformatorakh [Review of circuit solutions of phase number converters on transformers]. *Sovershenstvovanie tekhnicheskikh sredstv elektricheskogo transporta [Improvement of technical means of electric transport]*. Novosibirsk, 2001. Pp. 78–96.
2. Evdokimov S.A. Geometricheskii sposob generatsii skhemykh reshenii preobrazovatelei chisla faz dlya vypryamitelei [The geometric method of generating circuit solutions of phase number converters for rectifiers]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [The Scientific Bulletin of Novosibirsk State Technical University]*, 2008. No. 2(31). Pp. 107–120.
3. Karimov A.S., Rakhimov G.R. Avtoparametricheskie preobrazovatelei chisla faz i chastoty peremennogo toka [Autoparametric converters of the number of phases and frequency of alternating current]. Tashkent: Fan Publ., 1995. 275 p.

4. Nazarov S.L., Udintsev V.N., Bychkov S.A., Tarasov F.E., Beavogi P., Abdullaev Zh.O. Preobrazovateli chisla faz v elektrotehnologii [Phase number converters in electrotechnology]. Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin. Ekaterinburg, 2019.
5. Karimov A.S., Turdiev M.T., Khudaikulov Z.R., Ibragimov N.R. *Ferromagnitnyi preobrazovatel' chastoty i chisla faz v chetyre raza* [Ferromagnetic frequency converter and four-fold phase number]. Copyright certificate SU 1741239 A1. June 15, 1992.
6. Sidorov S.A., Roginskaya L.Z. Fazopreobrazovatel'noe ustroystvo dlya nesimmetrichnykh nagruzok [A phase-converting device for asymmetric loads. Energy saving]. Ufa, 2013. Pp. 121–125.
7. Bedritskiy I., Juraeva K., Bazarov L., Saidvaliev B. Using of the parametric nonlinear LC-circuits in stabilized converters of the number of phases. *Jour. of Adv Research in Dynamical & Control Systems*, 2020. Vol. 12. Iss. 06. Pp. 98–107.
8. Golubev A.N., Ignatenko S.V. Characteristics optimization for a frequency converter power filter as a function of phase number. *Elektrotechnics*, 1999. No. 7. Pp. 42–46.
9. Halilov N.A., Bedritskiy I.M. To a question on approximation of curves of magnetization of electrotechnical steels. *News of high schools of republic Uzbekistan. Engineering in Life Sciences*, 2002. No. 4. P. 33.
10. Privalov E.E. *Elektrotekhnicheskoe materialovedenie: uchebnoe posobie* [Electrotechnical materials science: a textbook]. Moscow – Berlin: Direct-media Publ., 2015. 234 p.
11. Aliev I.I. *Elektrotekhnicheskii spravochnik*. Izd. 4-e, ispr. [Electrotechnical reference book. 4th ed., rev.]. Moscow: Radio Soft Publ., 2006. 384 p.
12. Glebov B.A., Kayukov D.S., Nedoluzhko I.G. Modeli magnitnykh komponentov [Models of magnetic components]. *Prakticheskaya silovaya elektronika* [Practical power electronics], 2003. No. 11.
13. Nana B., Yamgoue S.B., Tchitnga R., Wofo P. Simple mathematical model for ferromagnetic core inductance and experimental validation. *American Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 2015. Vol. 3. No. 2. Pp. 29–36.
14. Pentegov I.V., Krasnozhan A.V. Universal'naya approksimatsiya krivykh namagnichivaniya elektrotekhnicheskikh stalei [Universal approximation of magnetization curves of electrotechnical steels]. *Elektrotehnika i elektromekhanika*, 2005. No. 7. Pp. 13–19.
15. Jiles D.C., Atherton D.L. Theory of ferromagnetic hysteresis. *Journal of magnetism and magnetic materials*. 1986. Vol. 61. No. 06.
16. Chan J. H., Vladimirescu A., Gao X.-C., Liebmann P. and Valainis J. Nonlinear transformer model for circuit simulation. *Transactions on computer-aided design*. 1991. Vol. 10. No. 4.
17. Fayziev M.M., Beitullaev R.H., Norboev A.E. Voprosy ustoichivosti resheniya ferorezonansnogo kontura s lineinoi induktivnost'yu [Questions of stability of the solution of a feroresonance circuit with linear inductance]. *Vestnik nauki i obrazovaniya* [Bulletin of science and education], 2017. No. 1(25). Pp. 15–18.
18. Danilov L.V., Matkhanov P.N., Filippov E.S. *Teoriya nelineinykh elektricheskikh tsepei* [Theory of nonlinear electric circuits]. Leningrad: Energoatomizdat Publ., 1990. 256 p.

Информация об авторах

Бедрицкий Иван Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры электроснабжения, Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент
Жураева Камила Комиловна – PhD, доцент кафедры электроснабжения, Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент
Базаров Лазиз Холбобоевич – ассистент кафедры электроснабжения, Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент

Information about the authors

Ivan M. Bedritskiy – candidate of technical science, associate professor of the Department of Power Supply, Tashkent State Transport University, Tashkent
Kamila K. Jurayeva – PhD, associate professor of the Department of Power Supply, Tashkent State Transport University, Tashkent
Laziz Kh. Bazarov – assistant of the Department of Power Supply, Tashkent State Transport University, Tashkent

DOI 10.26731/1813-9108.2021.2(70).51-60

УДК 628.646

Компенсация действия давления рабочей среды в уплотнительных соединениях с тонкостенными элементами

Ю. И. Белоголов ✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ pr-mech@mail.ru

Резюме

Одним из направлений совершенствования уплотнительных соединений, в частности клапанов, работающих при высоких давлениях, температурах, различной агрессивности и в условиях эксплуатационных изменений рабочей среды (например, пульсация давления), может быть их частичная, либо полная разгрузка (уравновешивание). Под разгрузкой уплотнительного соединения обычно принято понимать компенсацию действия давления рабочей среды на элементы затвора с целью обеспечения в уплотнительном стыке соединения, постоянства усилия герметизации. Разгрузка уплотнительного соединения достигается за счет определенной конструкции затвора, на который действует давление герметизируемой среды, вследствие чего может достигаться эффект самоуплотнения соединения (при частичной

разгрузке). Кроме того, использование в затворе в качестве золотника и седла металлических элементов позволяет достичь определенных преимуществ и избавиться от недостатков, присущих соединениям с полимерными уплотнениями. При этом использование в качестве уплотнения (седла) со сниженной жесткостью (тонкостенной оболочкой), позволяет уменьшить усилие герметизации, масса-габаритные параметры, обеспечить постоянно усилие герметизации по периметру уплотнения (уйти от проблемы выбора отклонения формы седла). Предложенная схема разгруженного клапана отличается от существующих отсутствием жесткой связи между штоком и золотником затвора. Это позволяет минимизировать передачу действия давления рабочей среды со штока на золотник клапана, что, в свою очередь, позволит сделать седло еще более тонкостенным. При этом снижение приведенной жесткости седла также позволяет уменьшить герметизирующую нагрузку в зоне контакта золотника и седла, однако эти вопросы выходят за рамки данной статьи, и они не рассматривались.

Ключевые слова

трубопроводная арматура, уплотнительные соединения, клапан, разгрузка, уравнивание, тонкостенная оболочка, упругая кромка, герметизирующая нагрузка, соединения «метал – металл»

Для цитирования

Белоголов Ю. И. Компенсация действия давления рабочей среды в уплотнительных соединениях с тонкостенными элементами // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 2 (70). – С. 51–60. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).51-60

Информация о статье

поступила в редакцию: 12.04.2021, поступила после рецензирования: 19.04.2021, принята к публикации: 27.04.2021

Compensation of the influence of the pressure of the working medium in sealing joints with thin-walled elements

Yu. I. Belogolov✉

Irkutsk State University of Transport, Irkutsk, the Russian Federation

✉ pr-mech@mail.ru

Abstract

One of the ways to improve sealing joints, particularly valves operating at high pressures, temperatures, various aggressiveness and in conditions of operational changes (for example, pressure pulsation) of the working environment, can be to partially or completely unload (counterbalance) them. The unloading of the sealing joint is usually understood as the compensation of the influence of the pressure of the working medium on the valve gate elements in order to ensure a constant sealing pressure in the sealing joint. The unloading of the sealing joint is achieved due to a certain design of the valve gate, which is influenced upon by the pressure of the sealed medium, as a result of which the effect of self-sealing of the joint can be achieved (with partial unloading). Beyond that, using metal elements as a spool and seat guide in the valve gate allows us to achieve certain advantages and get rid of the disadvantages inherent in joints with polymer seals. At the same time, using a seat guide with reduced rigidity (a thin-walled shell) as a seal makes it possible to reduce the sealing force, mass-dimensional parameters, to provide the constancy of the sealing force around the seal perimeter (to avoid the problem of choosing the deflection of the seat guide shape). The proposed diagram of the unloaded valve differs from the existing ones primarily by the absence of a rigid connection between the stem and the spool of the valve. This will allow minimizing the transfer of the influence of the working medium pressure from the stem to the valve spool, which in turn will make the seat guide even more thin-walled. Among other things, a decrease in the reduced stiffness of the seat guide also makes it possible to reduce the sealing load in the contact zone of the spool and seat guide, but these issues are beyond the scope of this article and have not been considered.

Keywords

pipeline fittings, sealing joints, valve, unloading, counterbalancing, thin-walled shell, resilient edge, sealing load, metal-to-metal joints

For citation

Belogolov Yu. I., Kompensatsiya deistviya davleniya rabochei sredy v uplotnitel'nykh soyedineniyakh s tonkostennymi elementami [Compensation of the influence of the pressure of the working medium in sealing joints with thin-walled elements]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 2 (70), pp. 51–60. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).51-60

Article Info

Received: 12.04.2021, Revised: 19.04.2021, Accepted: 27.04.2021

Введение

Трубопроводная арматура как устройство, позволяющее управлять потоком рабочей среды, получила широкое распространение и применение в технике [1–7].

В качестве уплотнительных соединений в трубопроводной арматуре могут использоваться различные конструкции задвижек, клапанов, кранов и дисковых затворов. В зависимости от условий эксплуатации к конструкциям таких соединений могут предъявляться значительные требования по герметичности, скорости срабатывания (перекрытия), масса-габаритным характеристикам и другие требования. Герметизируемые среды могут значительно отличаться по своим физико-химическим свойствам, условиям транспортировки, хранения и класса опас-

ности для окружающей среды. Например, на железнодорожном транспорте применяются различные конструкции клапанов в сливных приборах вагонов-цистерн, предназначенные для обеспечения герметичности при транспортировке различных грузов (в том числе опасных): газов под давлением, легковоспламеняющихся жидкостей, окисляющихся веществ, едких и коррозионных сред (рис. 1).

В авиационной (рис. 2) и космической технике (рис. 3), где условия эксплуатации особенно сложные (ударные нагрузки в затворе, термическое воздействие, агрессивные рабочие среды и другие условия эксплуатации), обеспечение надежности соединений при заданной степени герметичности является сложной задачей.

Вопросам совершенствования уплотнительных

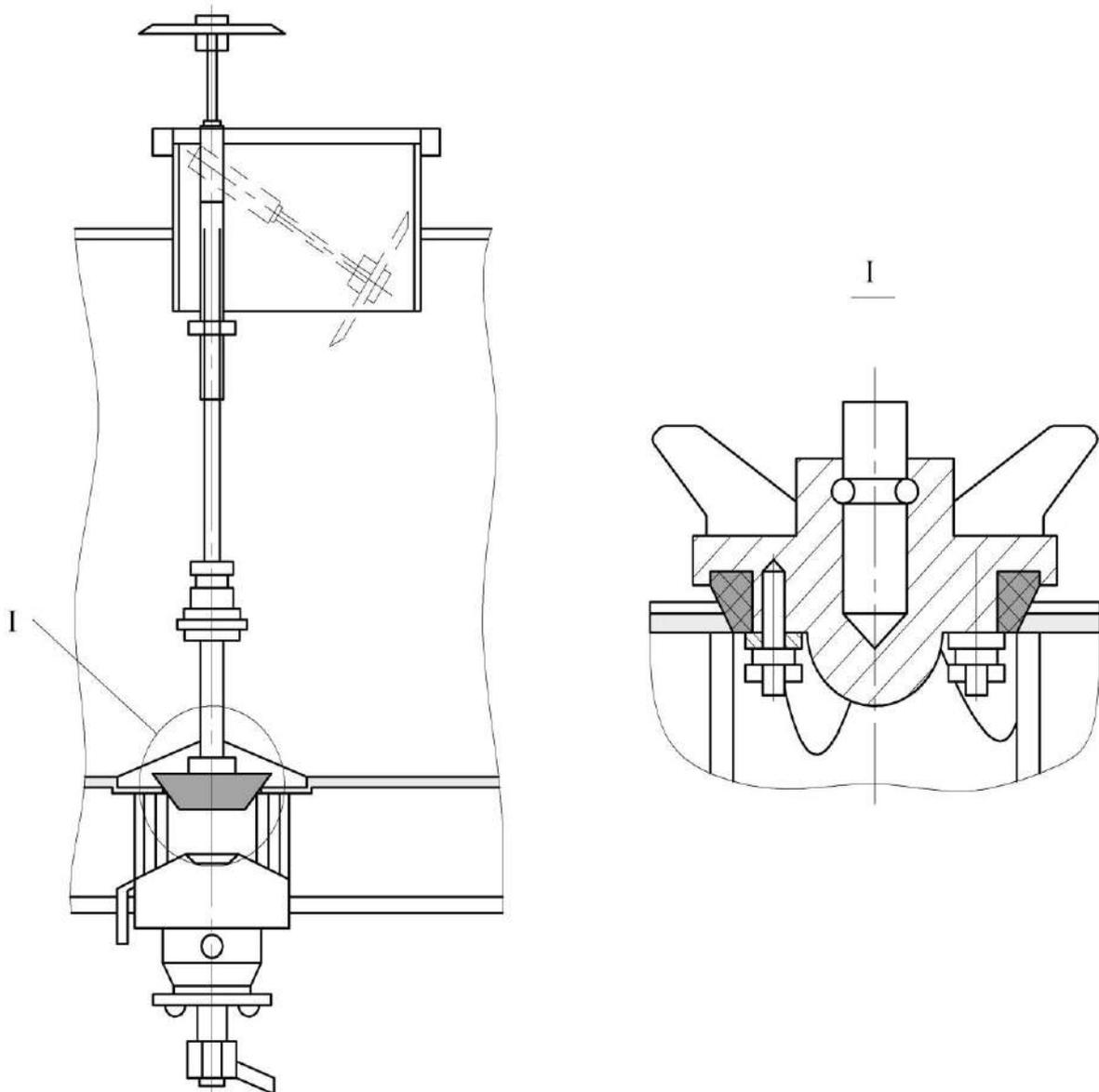


Рис. 1. Схема универсального сливного прибора
Fig. 1. Diagram of a universal drain device

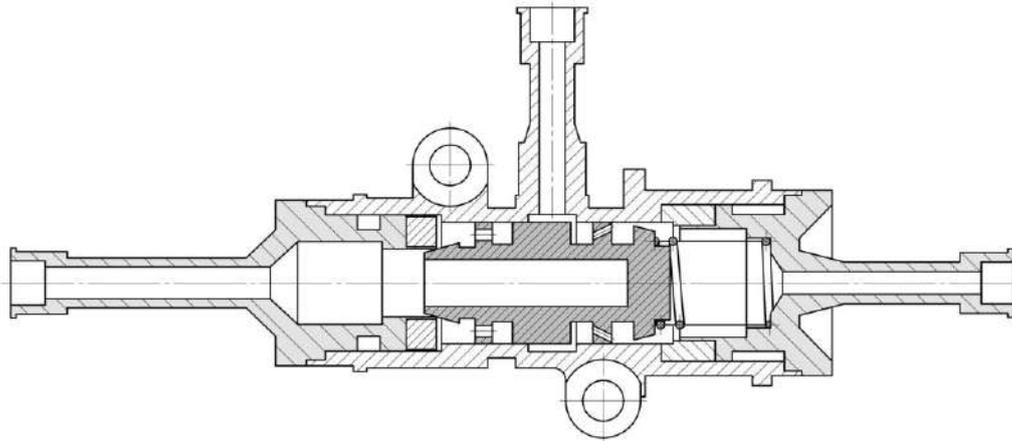


Рис. 2. Клапан, разработанный корпорацией «Энергия»
Fig. 2. Valves developed by “Energia” Corporation

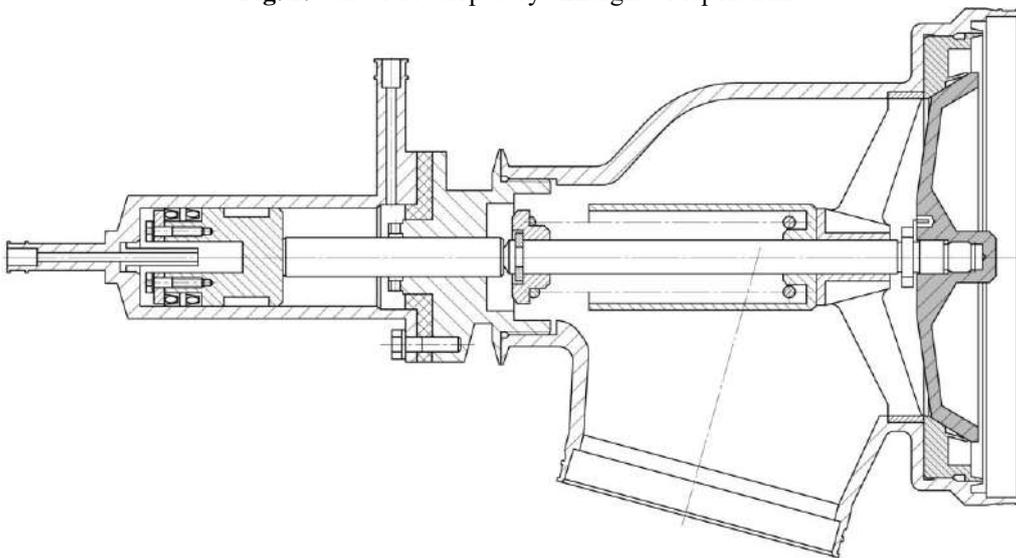


Рис. 3. Клапан самолета ТУ-156
Fig. 3. Valves of the TU-156 aircraft

соединений с тонкостенными элементами (упругой кромкой) посвящены работы [8–12], в которых одним из способов, направленных на повышение надежности соединения является использование только соединений типа «метал – металл», где в качестве седла [13] выступает тонкостенная оболочка.

Пути совершенствования

Дальнейшее совершенствование соединений с тонкостенными элементами может быть направлено на определение момента контакта запирающего элемента и уплотнения или компенсацию действия давления рабочей среды в затворе путем его разгрузки (уравновешивания) [14–15]. Рассмотрим второе направление.

Далее представлен пример разгруженного от давления рабочей среды уплотнительного соединения с тонкостенным элементом (упругой кромкой) (рис. 4).

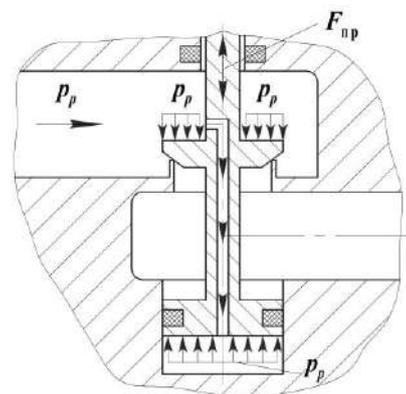


Рис. 4. Схема разгруженного клапана:
 p_p – давление рабочей среды; $F_{пр}$ – усилие со стороны привода

Fig. 4. Unloaded valve diagram:
 p_p – pressure of the working medium;
 $F_{пр}$ – force on the part of the drive

Компенсация действия давления рабочей среды под золотник происходит за счет конструкции клапана – подачи той же среды на золотник.

За последние годы интерес к разгруженным уплотнительным соединениям только возрастал. Это обусловлено, прежде всего, преимуществами, которых позволяют достигать такие конструкции. К основным преимуществам можно отнести:

- снижение усилия привода $F_{пр}$ за счет частичной либо полной разгрузки от действия давления рабочей среды p_p ;

- уменьшение масса-габаритных характеристик привода (при этом размеры самого уплотнительного соединения могут увеличиваться);

- повышение быстродействия срабатывания (за счет компенсации составляющей давления рабочей среды);

- повышение плавности и точности регулирования (за счет компенсации нестационарности давления рабочей среды p_p).

Кроме того, с повышением давления рабочей среды p_p и больших номинальных диаметрах DN конструкции, в которых используется разгрузка затвора, встречаются все чаще, что обусловлено уже частично указанными преимуществами.

Процесс нагружения уплотнительного соединения клапана с тонкостенным элементом представлен в виде схемы (рис. 5), где $F_{пр}$ – усилие, создаваемое приводом; $q_{гер}$ – герметизирующая нагрузка в месте сопряжения «золотник – седло»; p_p – давление рабочей среды; DN – диаметр условного прохода.

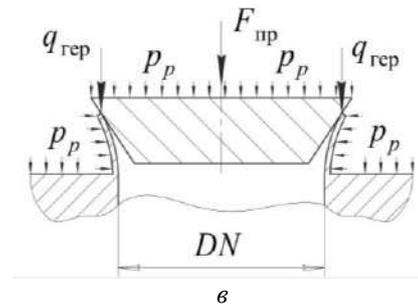
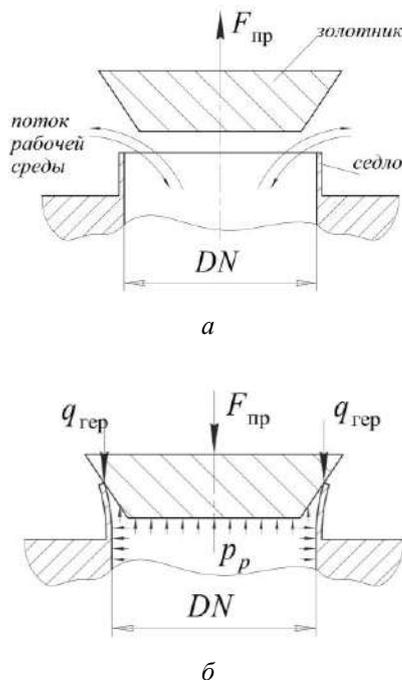


Рис. 5. Схема затвора клапана с тонкостенным элементом:

a – клапан открыт; *б* – клапан закрыт (давление среды «на золотник»); *в* – клапан закрыт (давление среды «под золотник»)

Fig. 5. Thin-walled valve gate diagram:

a – the valve is open; *b* – the valve is closed (medium pressure is “on the spool”); *c* – the valve is closed (medium pressure is “under the spool”)

Формула усилия, создаваемого приводом $F_{пр}$, будет зависеть от трех составляющих:

$$F_{пр} = F_3 + F_{p_p} + F_{тр},$$

где F_3 – сила, необходимая для перемещения золотника и обеспечения требуемой герметичности в затворе; F_{p_p} – сила, необходимая для преодоления давления рабочей среды на элементы затвора клапана; $F_{тр}$ – сила трения:

$$F_3 = q_{гер} \cdot \pi \cdot DN;$$

$$F_{p_p} = \frac{\pi \cdot DN^2}{4} \cdot p_p;$$

$$F_{тр} = F_{тр.1} + F_{тр.2}.$$

Здесь $F_{тр.1}$ – сила трения в месте сопряжения золотника и седла (угол трения); $F_{тр.2}$ – сила трения в штоке.

Компенсация F_{p_p} посредством разгрузки позволит проектировать уплотнительные соединения в расчете на требуемую степень герметичности без учета нестационарности давления рабочей среды.

Это особенно важно для уплотнительных соединений с тонкостенными элементами [8], где пульсация давления рабочей среды p_p может привести к значительному изменению нагрузки $q_{гер}$ и, как следствие, появлению избыточной герметизирующей нагрузки $q_{гер}^{изб}$, которая может разрушить тонкостенный элемент даже без учета динамики нагружения клапана:

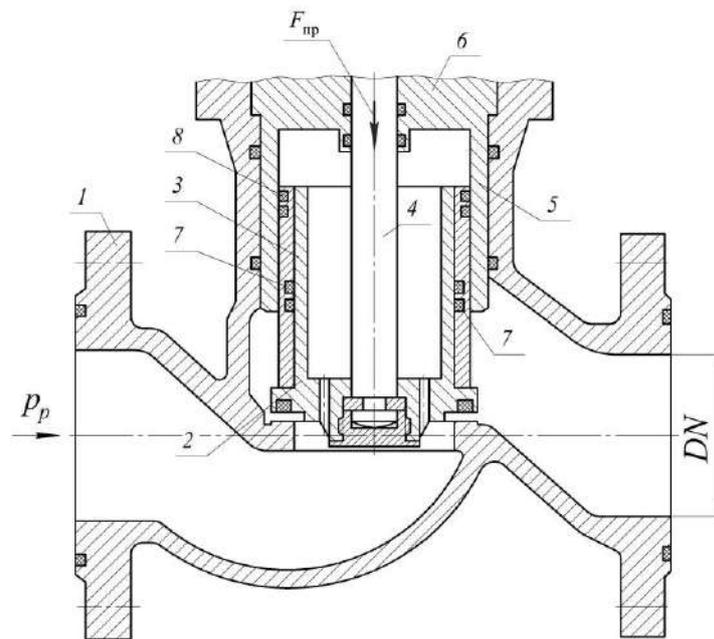


Рис. 6. Запорное устройство (авт. св-во № 481744):

1 – корпус; 2 – тарелка; 3 – плавающий поршень; 4 – шток; 5 – направляющая втулка;
6 – крышка; 7, 8, 9 – уплотнительное кольцо

Fig. 6. Locking device (author's certificate No. 481744):

1 – case; 2 – plate; 3 – floating piston; 4 – stock; 5 – guide bush;
6 – cover; 7, 8, 9 – O-ring

$$q_{\text{гер}}^{\text{изб}} = \frac{(p_p^{\text{изб}} - p_p)DN}{4},$$

где $p_p^{\text{изб}}$ – расчетное давление рабочей среды,

$$p_p^{\text{изб}} \geq p_p.$$

Существуют различные способы разгрузки [15], имеющие как положительные, так и отрицательные черты. Согласно [15], к наиболее перспективным способам разгрузки клапанов с тонкостенными элементами относятся:

– поршневой, при котором уравновешивающий элемент является конструктивной частью золотника, либо размещен отдельно и жестко связан со штоком клапана, способен воспринимать давление рабочей среды, за счет этого разгружая золотник клапана (рис. 6);

– сильфонный, при котором уравновешивающий элемент связан с золотником (плунжером) и образует за счет своей конструкции эффективную площадь, на которую воздействует давление рабочей среды (рис. 7).

На (рис. 6) изображена схема запорного устройства, конструкция которой состоит из корпуса, тарелки, плавающего поршня, подвешенного на штоке, направляющей втулки, верхней часть которой выполнена в виде крышки.

Согласно [16], при подаче рабочей среды под тарелку (рис. 6.), герметизирующее усилие будет пропорционально давлению, умноженному на разность площадей торцов плавающего поршня и тарелки:

$$F_{\text{гер}} = p_p \left[\frac{\pi(D_{\text{т.н}} - D_{\text{т.в}})^2}{4} - \frac{\pi(D_{\text{п.н}} - D_{\text{п.в}})^2}{4} \right],$$

где $D_{\text{т.н}}$, $D_{\text{т.в}}$ – наружный и внутренний диаметры тарелки; $D_{\text{п.н}}$, $D_{\text{п.в}}$ – наружный и внутренний диаметры плавающего поршня.

В случае изменения направления потока рабочей среды, герметизирующее усилие может быть определено из формулы:

$$F_{\text{гер}} = p_p \frac{\pi(D_{\text{п.в}} - D_{\text{т.ср}})^2}{4},$$

где $D_{\text{т.ср}}$ – средний диаметр тарелки; $D_{\text{п.в}}$ – внутренний диаметр поршня.

Плавающий поршень может перемещаться в осевом направлении. Частичная разгрузка происходит при подаче рабочей среды под тарелку, а при подаче на тарелку происходит самоуплотнение.

На (рис. 7) представлен клапан ПЗ 26288. Согласно [17], герметичность подвижной части затвора, относительно рабочей среды, достигается за счет

двух сильфонов, которые одновременно являются и разгружающими элементами в данной конструкции.

Конструкция клапана содержит корпус, стойки, золотник, мембрану (сильфон), седло, крышку, пружину, кожух, электромагнит и пробку. При обесточенной обмотке катушки электромагнита, золотник под действием пружины и давления рабочей среды на неразгруженную площадь золотника перекрывает проходной канал в седле корпуса. При подаче напряжения на обмотку электромагнита его сердечник вместе с золотником движется вверх и открывает проходной канал в седле корпуса.

Исходя из конструкции, коэффициент разгрузки можно рассчитать по формуле:

$$K = \frac{(S_1 - S_m)}{S_2},$$

где S_1 и S_2 – площадь верхнего и нижнего сильфонов соответственно; S_m – площадь поперечного сечения штока.

Разгруженные (с помощью поршня и сильфона) клапаны с тонкостенными уплотнительными элементами в затворе представлены далее (рис. 8).

Равнодействующая сила $F_{пр}$ для схем (см. рис. 8) может быть определена из выражений:

– для схемы *a* –

$$F_{пр} = q_{гер} \cdot \pi \cdot DN + \frac{\pi D_n^2}{4} \cdot p_p + F_{тр};$$

– для схемы *б* –

$$F_{пр} = q_{гер} \cdot \pi \cdot DN + \frac{\pi(D_n - D_p)^2}{4} \cdot p_p + F_{тр};$$

– для схемы *в* –

$$F_{пр} = q_{гер} \cdot \pi \cdot DN + \frac{\pi D_n^2}{4} \cdot p_p + F_{тр};$$

– для схемы *г* –

$$F_{пр} = q_{гер} \cdot \pi \cdot DN + \left(\frac{\pi \cdot D_{сп}^2}{4} - \frac{\pi(D_n - D_p)^2}{4} \right) \cdot p_p + F_{тр}.$$

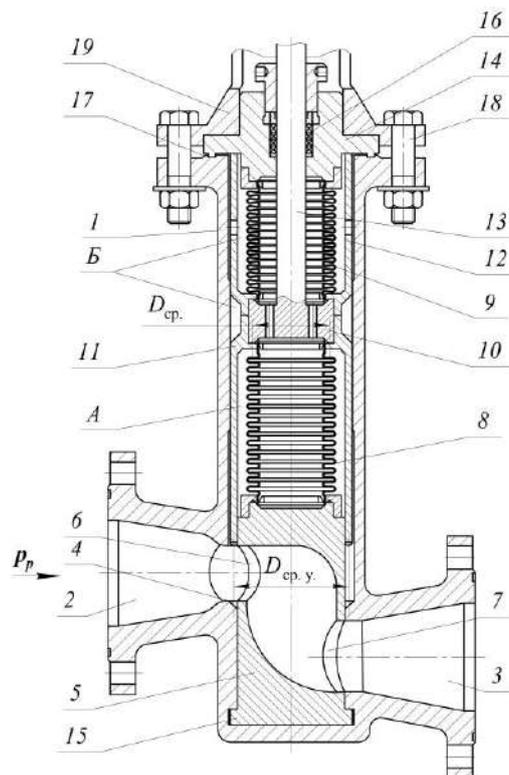


Рис. 7. Клапан (пат. № RU 2298127):

- 1 – корпус; 2, 6 – входное отверстие; 3, 7 – выходное отверстие; 4 – седло;
5 – цилиндрический вкладыш; 8, 9 – сильфоны; 10 – втулка; 11 – плунжер;
12 – ограничительный элемент; 13 – шток; 14 – фланец; 15 – байонетный замок;
16 – набивка; 17 – уплотнительный элемент; 18 – болты; 19 – фланец

Fig. 7. Valve (patent No. RU 2298127):

- 1 – case; 2, 6 – inlet; 3, 7 – outlet; 4 – seat guide; 5 – cylindrical insert; 8, 9 – bellows;
10 – bush; 11 – plunger; 12 – limiting element; 13 – stock; 14 – flange; 15 – bayonet lock;
16 – packing; 17 – sealing element; 18 – bolts; 19 – flange

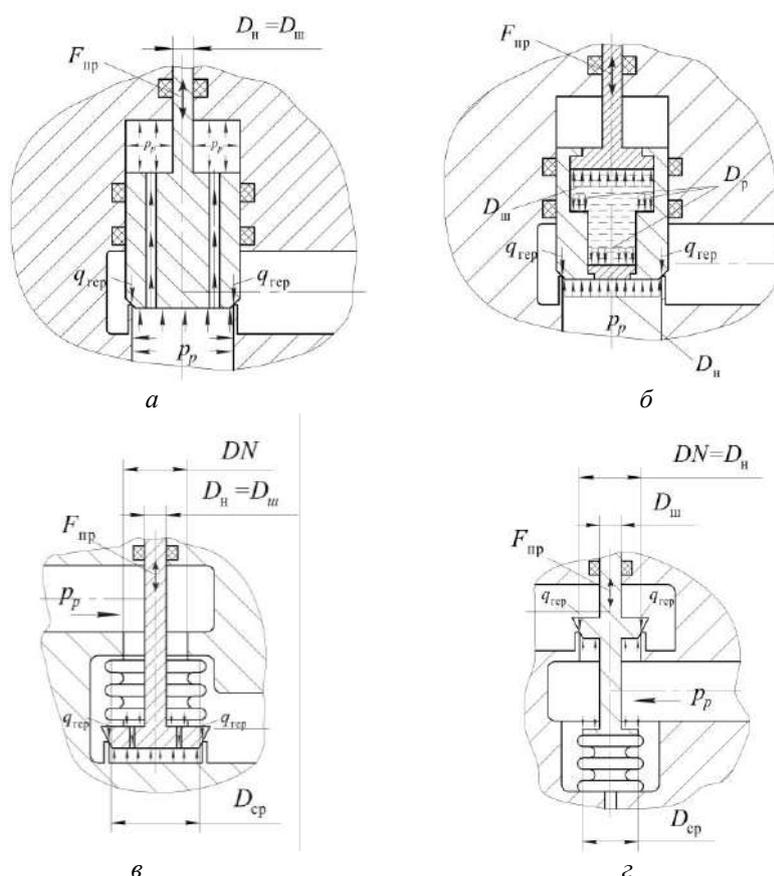


Рис. 8. Схемы разгруженных клапанов:

a, б – разгрузка за счет поршня; *в, г* – разгрузка за счет сильфона

Fig. 8. Diagrams of the unloaded valves:

a, b – unloading is due to piston; *c, d* – unloading is due to the bellows

В качестве $D_{ср}$ принимается усредненное значение диаметра сильфона, а $\frac{\pi \cdot D_{ср}^2}{4}$ определяет эффективную площадь сильфона при разгрузке.

Для схемы *б* возможна одна из трех ситуаций:

- $D_p < D_n$ – клапан разгружен частично;
- $D_p = D_n$ – клапан разгружен полностью;
- $D_p > D_n$ – самоуплотнение клапана.

Следует также отметить, что давление рабочей среды, действующее на $D_{шт}$ (см. рис. 8, *б*) не учитывается, так как шток не жестко связан с золотником клапана. Наличие такого конструктивного решения отличает представленную схему клапана от большинства разгруженных уплотнительных соединений, где шток и золотник связаны друг с другом.

Заключение

Выбор способа разгрузки производится исходя из условий эксплуатации и предъявляемых требований по герметичности, скорости срабатывания и

другим эксплуатационным параметрам уплотнительного соединения.

Использование в качестве уплотнения тонкостенной металлической оболочки позволяет исключить недостатки, указанные в [6, 7, 18–22], которые присущи метало-полимерным уплотнениям. При этом, тонкостенный оболочечный элемент чувствителен к условиям нагружения.

Постоянство герметизирующей нагрузки в зоне контакта конического золотника и тонкостенного седла может быть достигнуто за счет разгрузки (уравновешивания) затвора.

Дальнейшее совершенствование уплотнительных соединений с тонкостенными элементами может быть связано с использованием одновременной разгрузки и снижением приведенной жесткости тонкостенного элемента.

При этом отсутствие жесткой связи между золотником и штоком привода позволяет сделать конструкцию более компактной, а седло клапана более тонкостенным, что, в свою очередь, влияет на усилие герметизации.

Список литературы

1. Гошко А.И. Арматура трубопроводная целевого назначения. Кн. 1: Выбор. Эксплуатация. Ремонт. М.: Машиностроение, 2003. 427 с.
2. Гуревич Д.Ф. Трубопроводная арматура. Л.: Машиностроение, 1981. 386 с.
3. Кармугин Б.В., Стратиневский Г.Г., Мендельсон Д.А. Клапанные уплотнения пневмогидроагрегатов. М.: Машиностроение, 1983. 152 с.
4. Уплотнения и уплотнительная техника: справочник / Л.А. Кондаков, А.И. Голубев, В.Б. Овандер и др. М.: Машиностроение, 1986. 464 с.
5. Котелевский Ю.М. Современные конструкции трубопроводной арматуры для нефти и газа. М.: Недра, 1986. 496 с.
6. Долотов А.М. Разработка методов расчета и проектирование уплотнений с оболочечным элементом для летательных аппаратов: дис. ... д-ра тех. наук. М., 1994. 280 с.
7. Долотов А.М., Огар П.М., Чегодаев Д.Е. Основы теории и проектирования уплотнений пневмогидроарматуры летательных аппаратов: учеб. пособие. М.: Изд-во МАИ, 2000. 296 с.
8. Долотов А.М., Ермашонок С.М., Федяев А.А. Управление жесткостью тонкостенного седла клапана // Системы. Методы. Технологии. 2009. № 1 (1). С. 12–13.
9. Долотов А.М., Белоголов Ю.И. Определение перемещений в оболочечно-пластинчатом седле клапана // Системы. Методы. Технологии. 2013. № 2 (18). С. 22–28.
10. Долотов А.М., Белоголов Ю.И. Пути совершенствования клапанных уплотнительных соединений с оболочечными седлами // Энерго та ресурсозберігаючі технології при експлуатації машин та устаткування: матеріали 4-ої міжвузівської науково-технічної конференції викладачів, молодих вчених та студентів. Донецьк, 2012. С. 87–88.
11. Герасимов С.В., Долотов А.М., Белоголов Ю.И. Математическая модель динамического нагружения двухседельного клапана // Тр. Брат. гос. ун-та. Сер.: Естественные и инженерные науки. Братск: Изд-во БрГУ, 2012. С. 126–129.
12. Расчет седла уплотнительного соединения, нагруженного затвором и давлением герметизируемой среды / С.В. Герасимов, А.М. Долотов, Ю.И. Белоголов и др. // Механика XXI века: материалы Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов. Братск, 2012. № 11. С. 106–111.
13. ГОСТ Р 52720–2007. Арматура трубопроводная. Термины и определения. Введ. 2007–04–11. – М.: Стандартинформ, 2007. 16 с.
14. Белоголов Ю.И. Компенсация усилий, действующих на затвор со стороны герметизируемой среды // Проблемы транспорта Восточной Сибири: материалы Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов. Иркутск, 2012. С. 124–128.
15. Долотов А.М., Белоголов Ю.И. Обзор способов разгрузки золотника клапана от давления герметизируемой среды // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 3 (7). С. 30–36.
16. А.с. 481744 СССР. Запорное устройство / В.А. Горлин, Е.Н. Коротков. № 1877488/25-8; заявл. 06.02.73; опубл. 25.08.75, Бюл. № 31. 2 с.
17. Пат. 2298127 Рос. Федерация. Клапан / Евсиков В.Е.; заявитель и патентообладатель ОАО НПЦ «Анод». № 2005128192/06; заявл. 12.09.05; опубл. 27.04.07. 8 с.
18. Долотов А.М., Запарный В.А. К обоснованию выбора оптимального технологического процесса изготовления упругого седла клапана // Вестник Львов. политехн. ин-та № 179. Львов: Вища школа, 1983. С. 21–24.
19. Долотов А.М., Запарный В.А. Расчет жесткости упругих затворов // Вестник Львов. политехн. ин-та № 180. Львов: Вища школа, 1983.
20. Шпаков О.Н. Азбука трубопроводной арматуры: справ. пособие. СПб.: Питер, 2003. 218 с.
21. Results of the complex studies of microstructural, physical and mechanical properties of engineering materials using innovative methods / V.I. Shastin, S.K. Kargapol'tsev, V.E. Gozbenko et al. // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. № 12 (24). P. 15269–15272.
22. Долотов А.М., Гозбенко В.Е., Белоголов Ю.И. Уплотнительные соединения с использованием тонкостенных элементов. Деп. рукопись 22.11.2011, № 508-В2011.

References

1. Goshko A.I. Armatura truboprovodnaya tselevogo naznacheniya. V 3-kh kn. Kn. 1: Vyor. Ekspluatatsiya. Remont [Pipeline fittings for special purposes. In 3 books. Book. 1: Selection. Operation. Repair]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2003. ISBN 5-217-03182-2.
2. Gurevich D.F. Truboprovodnaya armatura [Pipeline fittings]. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1981. 386 p.
3. Karmugin B.V., Stratinevskii G.G., Mendel'son D.A. Klapannye uplotneniya pnevmogidroagregatov [Valve seals of pneumatic hydraulic units]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1983. 152 p.
4. Kondakov L.A., Golubev A.I., Ovander V.B., Gordeev V.V., Furmanov B.A. et al. Uplotneniya i uplotnitel'naya tekhnika: Spravochnik [Seals and sealing technology: a handbook]. In Golubev A.I., Kondakov L.A. (gen. eds). Moscow: Mashinostroenie Publ., 1986. 464 p.
5. Kotelevskii Yu. M. Sovremennye konstruksii truboprovodnoi armatury dlya nefi i gaza [Modern designs of pipeline valves for oil and gas]. Moscow: Nedra Publ., 1986. 496 p.
6. Dolotov A.M. Razrabotka metodov rascheta i proektirovanie uplotnenii s obolochecnym elementom dlya letatel'nykh apparatov. dis. ... dok. tekhn. nauk: 05.07.05, 05.02.02: zashchishchena 28.04.95; utv. 28.07.95 [Development of calculation methods and design of seals with a shell element for aircraft. A D. Sc. (Engineering) diss.: 05.07.05, 05.02.02: protected: April 28, 1995, approved July 28, 1995. Moscow, 1994. 280 p.

7. Dolotov A.M., Ogar P.M., Chegodaev D.E. Osnovy teorii i proektirovaniya uplotnenii pnevmogidroarmatury letatel'nykh apparatov: Uchebnoe posobie [Fundamentals of the theory and design of seals for pneumatic hydraulic fittings of aircraft: a study guide]. Moscow: MAI Publ., 2000. 296 p. ISBN 5-7035-2307-9.
8. Dolotov A.M., Ermashonok S.M., Fedyaev A.A. Upravlenie zhestkost'yu tonkostennogo sedla klapana [Control of the stiffness of a thin-walled valve seat] *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies]. Bratsk: BrSU Publ., 2009. No. 1 (1). Pp. 12–13.
9. Dolotov A.M., Belogolov Yu.I. Opredelenie peremeshchenii v obolochenchno-plastinchatom sedle klapana [Determination of displacements in a shell-plate valve seat]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies]. Bratsk: BrSU Publ., 2013. No. 2 (18). Pp. 22–28.
10. Dolotov A.M., Belogolov Yu.I. Puti sovershenstvovaniya klapannykh uplotnitel'nykh soedinenii s obolochecnymi sedlami [Ways of improving valve sealing connections with shell seats]. *Energo ta resursozberigayuchi tekhnologii pri ekspluatatsii mashin ta ustatkuvannya: Materiali 4-oi mizhvuziv's'koï naukovo-tekhnichnoi konferentsii vkladachiv, molodikh vchenikh ta studentiv* [Energy- and resource-saving technologies for the operation of machines and installation: Materials of the 4th scientific and technical conference of victories, young students and students]. Donetsk: 2012. Pp. 87–88.
11. Gerasimov S.V., Dolotov A.M., Belogolov Yu.I. Matematicheskaya model' dinamicheskogo nagruzheniya dvukhsedel'nogo klapana [Mathematical model of dynamic loading of a two-seat valve]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki* [Proceedings of the Bratsk State University. Series: Natural and Engineering Sciences]. Bratsk: BrSU Publ., 2012. Pp. 126-129.
12. Gerasimov S.V., Dolotov A.M., Belogolov Yu.I., Saakyan K.G. Raschet sedla uplotnitel'nogo soedineniya, nagruzhennogo zatvorom i davleniem germetiziruemoi sredy [Calculation of the saddle of the sealing joint, loaded with the seal and the pressure of the sealed environment]. *Mekhaniki XXI veku: materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov* [Mechanics of the XXI century: materials of the All-Russian scientific and practical conference of young scientists, graduate students and students]. Bratsk: BrSU Publishing House, 2012. No. 11. Pp. 106–111.
13. GOST R 52720–2007. Armatura truboprovodnaya. Terminy i opredeleniya. Vved. 2007–04–11 [GOST R 52720-2007. Pipeline fittings. Terms and definitions. Introduced 2007-04-11]. Moscow: Standartinform Publ., 2007. 16 p.
14. Belogolov Yu.I. Kompensatsiya usilii, deistvuyushchikh na zatvor so storony germetiziruemoi sredy [Compensation of efforts acting on the shutter from the side of the sealed environment]. *Problemy transporta Vostochnoi Sibiri: materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov* [Problems of transport of Eastern Siberia: materials of the All-Russian scientific-practical conference of young scientists, graduate students and students]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2012. Pp. 124–128.
15. Dolotov A.M., Belogolov Yu.I. Obzor sposobov razgruzki zolotnika klapana ot davleniya germetiziruemoi sredy [Review of methods for unloading the valve spool from the pressure of the sealed medium]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies]. Bratsk: BrSU Publ., 2010. No. 3 (7). Pp. 30–36.
16. Gorlin V.A., Korotkov E.N. Zapornoe ustroystvo [Locking device]. Author's certificate 481744 USSR, MPK5 F 16 K 39/02. No. 1877488 / 25-8; applied: July 02, 1973; published: August 08, 1975, Bull. No. 31. 2 p. : ill.
17. Evsikov V.E. Klapán [Valve]. Pat. 2298127 Russian Federation, IPC F 16 K 3/24, F 16 K 41/10. /; applicant and patentee of OAO NPTs "Anod". No. 2005128192/06; applied: December 09, 2005; published: April 27, 2007. 8 p.
18. Dolotov A.M., Zatsarnyi V.A. K obosnovaniyu vybora optimal'nogo tekhnologicheskogo protsessa izgotovleniya uprugogo sedla klapana [On the substantiation of the choice of the optimal technological process for manufacturing an elastic valve seat]. [The bulletin of Lvov Polytechnic Institute], No. 179. Lviv: Vishcha school, 1983. Pp. 21–24.
19. Dolotov A.M., Zatsarnyi V.A. Raschet zhestkosti uprugikh zatvorov [Calculation of the stiffness of elastic gates]. [The bulletin of Lvov Polytechnic Institute], No. 180. Lviv: Vishcha schkola Publ., 1983.
20. Shpakov O.N. Azbuka truboprovodnoi armatury. Spravochnoe posobie [The ABC of pipeline fittings. A reference manual]. St. Petersburg: Piter Publ., 2003. 218 p.
21. Shastin V.I., Kargapol'tsev S.K., Gozbenko V.E., Livshits A.V., Filippenko N.G. Results of the complex studies of microstructural, physical and mechanical properties of engineering materials using innovative methods. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017. 12(24). Pp. 15269–15272.
22. Dolotov A.M., Gozbenko V. E., Belogolov Yu. I. Uplotnitel'nye soedineniya s ispol'zovaniem tonkostennykh elementov. Deponirovannaya rukopis' № 508-V2011. 22.11.2011 [Sealing joints with the use of thin-walled elements. Deposited manuscript No. 508-B2011. 22.11.2011].

Информация об авторах

Белоголов Юрий Игоревич – канд. техн. наук, доцент; доцент кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: pr-mech@mail.ru.

Information about the authors

Yurii I. Belogolov – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor; Associate Professor of the Subdepartment of Operation Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: pr-mech@mail.ru.

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование

ТРАНСПОРТ

TRANSPORT

Автоматизированное исследование процесса набухания уплотнений сливных приборов вагонов-цистерн

Н. Г. Филиппенко✉, А. А. Беломестных, Т. Т. Чумбадзе

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ ifpi@mai.ru

Резюме

В статье представлены результаты физико-механических испытаний предварительно подготовленных резинотехнических образцов уплотнительного кольца клапана сливного прибора вагонов-цистерн марки МБС-С при атмосферном давлении. При проведении экспериментального исследования в качестве рабочих сред использовались наиболее агрессивная среда легких углеводородов (бензин марки АИ-95) и гидравлическая жидкость МГ-15-Б (нефтепродукт с высоким коэффициентом вязкости). За результат испытаний принималось среднеарифметическое значение массы пяти образцов, полученное в определенное время проведения исследования. Эксперимент показал, что наибольшая интенсивность изменения массы образцов в среде легких углеводородов наблюдается в первые 24 ч выдержки. При выдержке образцов в гидравлическом масле наибольшая интенсивность набухания наблюдается в первые 96 ч. Так как длительность экспериментальных исследований процесса набухания резинотехнических изделий будет неприемлемой для промышленных предприятий, было принято решение на основании опыта предыдущих исследований изготовить автоматизированную экспериментально-исследовательскую установку на базе промышленного оборудования термовакуумного наполнения. Для управления электронными устройствами, с целью контроля и регулирования температуры в камере установки использовался программируемый контроллер Atmega 328. Автоматизированный метод исследования показал, что каждые 5 мин. выдержки образцов в среде легких углеводородов приводят к незначительному росту набухания, в среднем масса изменяется на 3,1 %. Наибольшая интенсивность поглощения при испытании в среде гидравлического масла наблюдается в первые 5 мин. испытаний, масса образцов за это время увеличилась на 0,82 % от первоначальной.

Ключевые слова

клапан сливного прибора, сливной прибор, вагон-цистерна, резинотехнические изделия, бензин, гидравлическая жидкость, автоматизация, термовакуум

Для цитирования

Филиппенко Н.Г. Автоматизированное исследование процесса набухания уплотнений сливных приборов вагонов-цистерн / Н. Г. Филиппенко, А. А. Беломестных, Т. Т. Чумбадзе // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 2 (70). – С. 62–68. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).62-68

Информация о статье

поступила в редакцию: 09.01.2021, поступила после рецензирования: 22.01.2021, принята к публикации: 07.02.2021

Automated research of the process of the swelling of sealings of draining devices in the tank railcars

N. G. Filippenko✉, A. A. Belomestnykh, T. T. Chumbadze

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ ifpi@mai.ru

Abstract

The article presents the results of physical and mechanical tests of previously prepared industrial rubber samples of the sealing ring of the drain valve of the MBS-S tank railcars at atmospheric pressure. Gasoline AI-95 (the most aggressive medium among light hydrocarbons) and a hydraulic fluid MG-15-B (an oil product with a high viscosity coefficient) were used as working media for the experimental study. The arithmetic mean of the mass of five samples, obtained at a certain time of the study, was taken for the test result. Experimental studies have shown that the highest rate of change in the mass of the samples, in the medium of light hydrocarbons, is observed in the first 24 hours of exposure. When the samples are kept in hydraulic oil, the highest swelling rate is observed in the first 96 hours. Since the duration of experimental studies of the rubber products' swelling will be unacceptable for industrial enterprises, it was decided, following on from the experience of previous studies, to make an automated experimental research installation on the basis of industrial equipment for thermal vacuum filling. To control the electronic devices, in order to monitor and regulate the temperature in the chamber of the installation, the programmable controller Atmega 328 was used. The automated research method showed that every 5 minutes of exposure of the samples in the medium of light hydrocarbons, are accompanied by a slight increase

in swelling, the mass changes by 3,10% on average. The highest absorption intensity, when tested in a medium of hydraulic oil, is observed in the first five minutes of testing, the mass of the samples during this time increased by 0,82% from the initial one.

Keywords

drain valve, draining device, tank railcar, industrial rubber goods, gasoline, hydraulic fluid, automation, thermal vacuum

For citation

Filippenko N. G., Belomestnykh A. A., Chumbadze T. T. Avtomatizirovannoe issledovanie protsessa nabukhaniya uplotnenii slivnykh priborov vagonov-tsistern [Automated research of the process of the swelling of sealings of draining devices in the tank railcars]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 2 (70), pp. 62–68.– DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).62-68

Article info

Received: 09.01.2021, Revised: 22.01.2021, Accepted: 07.02.2021

Введение

Проблема протекания перевозимых в цистернах жидких углеводородов достаточно широко известна и ее решение является актуальной задачей современности. Одной из основных причин потерь перевозимых жидкостей является изменение конструктивных свойств материала уплотнений в процессе их эксплуатации.

Для исследования процесса изменения физических свойств резинотехнических изделий вследствие их набухания в агрессивной среде перевозимого груза были взяты образцы резины уплотнительного кольца клапана сливного вагона-цистерны марки МБС-С [1]. В качестве агрессивной среды использовались смесь легких углеводородов (бензин марки АИ-95) и гидравлическая жидкость марки МГ-15-Б.

Каждый образец исследования перед проведением эксперимента был осмотрен на предмет наличия пор и наружных повреждений. Для проведения эксперимента использовались стеклянные емкости с плотными крышками объемом 390 мл. В каждую емкость помещалось пять предварительно взвешенных образцов, после чего они заливались жидкостью при соотношении жидкости и образцов 20:1 [2, 3]. Образцы выдерживались в среде испытания в течение определенного времени.

За результат испытаний принималось среднее арифметическое значение суммарной массы образцов (г) в определенный промежуток времени \bar{M} , рассчитанное по формуле (1):

$$\bar{M} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N M_i, \quad (1)$$

где M_i – отдельное значение массы, изменяется от 1 до N , г; N – количество образцов, шт.

Результат полученных при проведении исследований представлен далее (табл. 1).

Таблица 1. Результаты исследования изменения массы образца

Table 1. The results of the study of changes in the mass of the sample

Время проведения исследования, ч	Среднее арифметическое значение массы образца при набухании в исследуемых средах, г	
	Бензин марки АИ-95	МГ-15-Б
Начальное значение	2,3351	2,4211
24	2,9818	2,4486
96	3,1275	2,4709
144	3,1517	2,4741
288	3,1684	2,4775

По результатам проведенных исследований были построены диаграммы зависимости изменения массы образцов в бензине (рис. 1) и гидравлическом масле (рис. 2), рассчитанные по формуле (2):

$$\Delta M = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где M_1 – масса предварительно взвешенных образцов, г; M_2 – масса образца, взвешенного в определенный момент времени выдержки, г.

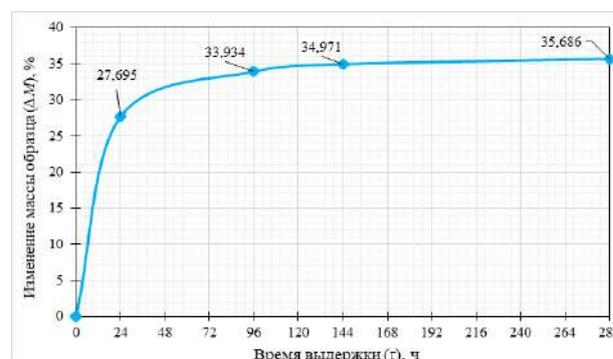


Рис. 1. Диаграмма набухания образцов при взаимодействии с бензином марки АИ-95

Fig. 1. Diagram of the swelling of samples when interacting with gasoline AI-95

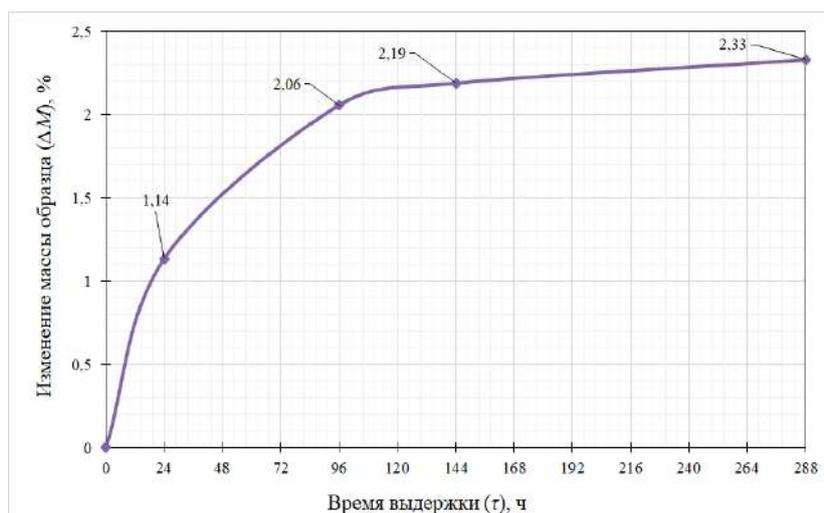


Рис. 2. Диаграмма изменения массы образцов при взаимодействии с гидравлической жидкостью МГ-15-Б
Fig. 2. Diagram of the change in the mass of samples when interacting with hydraulic fluid MG-15-B

Анализ диаграммы (см. рис. 1) показывает, что при контакте образцов со смесью легких углеводородов (бензином марки АИ-95) с течением времени наибольшая интенсивность поглощения наблюдается в первые 24 ч выдержки. Масса образца за первые сутки испытания при температуре 23 °С, увеличилась на 27,695 %. Полное насыщение образцов наблюдается уже через 96 ч выдержки. Общая же масса образца за полный период проведенных экспериментальных исследований (288 ч) изменилась на 35,686 %.

Анализ диаграммы (см. рис. 2) показывает, что при контакте образцов уплотнительного кольца сливного прибора со смесью рабочей жидкости МГ-15-Б с течением времени степень их набухания увеличивается менее значительно. Наибольшая интенсивность поглощения наблюдается в первые 96 ч исследования, масса образцов за это время увеличилась на 2,06 %. В период времени эксперимента от 96 до 288 ч масса образцов изменяется незначительно, полного насыщения не происходит.

Проведение автоматизированного метода испытаний резины в термовакууме

Проведенные исследования показали, что длительность экспериментальных исследований на предмет набухания резинотехнических изделий будет неприемлемой для промышленных предприятий, поэтому, взяв за основу работы по наполнению полимеров моторными маслами, проведенными на кафедре автоматизации производственных процессов Иркутского государственного университета путей сообщения, была изготовлена экспериментально-исследовательская установка на базе промышленного оборудования AZ pre-ink N2 для термовакуумного наполнения [4, 5].

Технология автоматизированного метода исследования заключается в погружении образцов в ванну термовакуумной камеры, которая заполнена агрессивной средой испытания (см. рис. 3). Контрольно-управляющими параметрами процесса исследования являются температура в ванне вакуумной камеры ($t = 23 \pm 2$ °С), давление в камере ($P = 10$ кПа) и вес образцов.

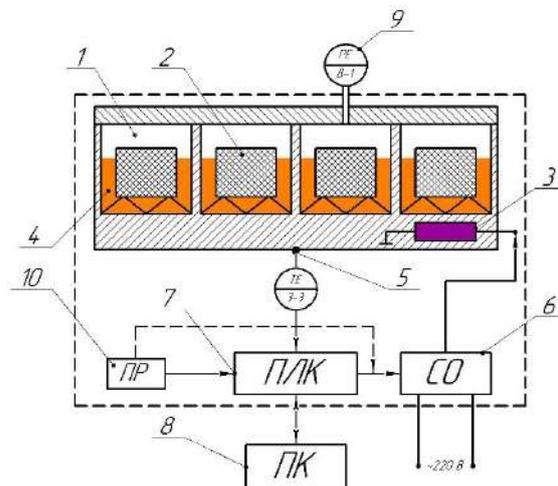


Рис. 3. Схема экспериментальной установки:

- 1 – вакуумная камера; 2 – образец;
- 3 – нагревательный элемент; 4 – агрессивная среда;
- 5 – терморезистор; 6 – симистор с оптопарой;
- 7 – микроконтроллер; 8 – персональный компьютер;
- 9 – манометр; 10 – переменный резистор

Fig. 3. Diagram of the experimental setup:

- 1 – vacuum chamber; 2 – sample;
- 3 – heating element; 4 – aggressive environment;
- 5 – thermal resistor; 6 – triac with an optical coupler;
- 7 – microcontroller; 8 – personal computer;
- 9 – manometer; 10 – variable resistor

Давление в камере установки контролируется с помощью манометра, установленного на верхней крышке. Регулировку температуры производим с помощью переменного резистора, через микроконтроллер и симистор с оптопарой [6, 7]. Контроль температуры осуществляем посредством снятия информации с терморезистора. Для управления электронными устройствами и передачи данных на ПК используем микроконтроллер Atmega 328, предварительно прошитый программным кодом, основанным на работах [8] и написанным в среде программирования Arduino IDE. Программный код представлен на рис. 4.

Результаты испытаний по термовакуумному наполнению образцов представлены далее (табл. 2).

По результатам проведенных исследований были построены диаграмма зависимости изменения массы образцов в бензине (рис. 5) и гидравлическом масле (рис. 6).

Таблица 2. Результаты автоматизированного испытания в термовакууме

Table 2. Results of automated testing in thermal vacuum

Продолжительность исследования, мин	Среднее арифметическое значение массы образца при набухании в исследуемых средах, г	
	Бензин АИ-95	МГ-15-Б
Предварительный	2,7313	2,6111
5	2,8593	2,6324
10	2,9105	2,6407
15	3,0132	2,6439
20	3,0883	2,6416
25	3,1529	2,6425
30	3,2076	–
35	3,2821	–
40	3,3567	–
45	3,4256	–
50	3,4657	–
55	3,4734	–
60	3,4824	–

```
#include <math.h>

float dim = 0; // переменная Диммер хранит данные с A0
float E; // коэффициент ошибки
float Up; //
float Ui;
//float Ud ПИД составляющая
float E0;
float U;
float Kp=2, Ki=5, Kd=0; // задаем коэффициенты ПИД-регулятора

float A=1.009249522e-03, B=2.378405444e-04, C=2.019202697e-07;
// задаем значения констант в уравнении Стейнхарта-Харта (из даташита на терморезистор)
float T, logRt, Tc; // переменные присутствующие в переводе в град.
float Vo;

void setup() {
  Serial.begin(250000); // открыть порт для связи
  pinMode(9, OUTPUT); // назначим нагревательный элемент heater как выход
  pinMode(A1, INPUT); // A1 считывает сигнал с терморезистора
}
void loop()
{
  Vo = analogRead(A1); // считывает значение с аналогового пина A1
  T = (1.0 / (A + B * logRt + C * logRt * logRt * logRt)); // расчет T в Кельвинах
  Tc = T - 273.15; // переводим из K в градусы

  dim = analogRead(A0) / 20.5; // считывает положения диммера с аналогового вывода A0

  E = dim - Vo; // коэффициент ошибки
  Up = E * Kp; // П-составляющая
  Ui = Ui + Ki * E; // И-составляющая
  U = Ui + Up; // ПИ регулятор
  if (U > 255) { U = 255; } // назначаем условие максимальной температуры
  if (U <= 0) { U = 0; } // условие минимальной температуры
  // E = dim - TR = диммер - температура
  analogWrite(9, U); // согласовываем нагревательный элемент и ПИД-регулятор
  Serial.println(Vo);
}
```

Рис. 4. Алгоритм программы регулирования и контроля температуры

Fig. 4. Algorithm of the temperature regulation and control program

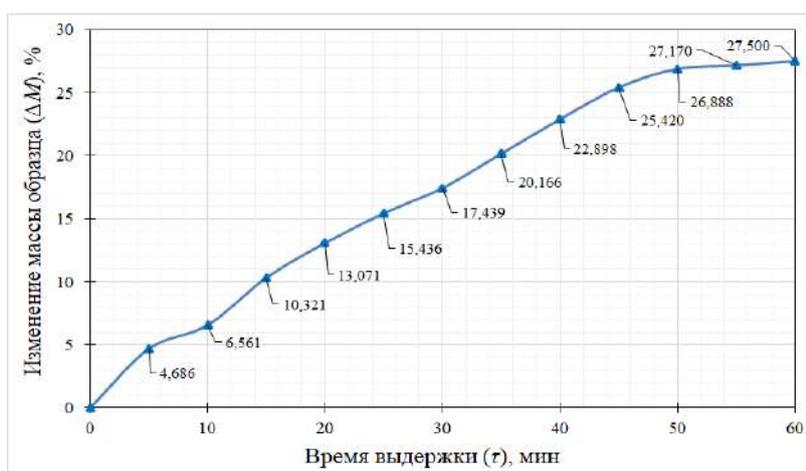


Рис. 5. Диаграмма набухания образцов в термовакуумной камере при взаимодействии с бензином марки АИ-95

Fig. 5. Diagram of the swelling of samples in a thermal vacuum chamber when interacting with gasoline AI-95

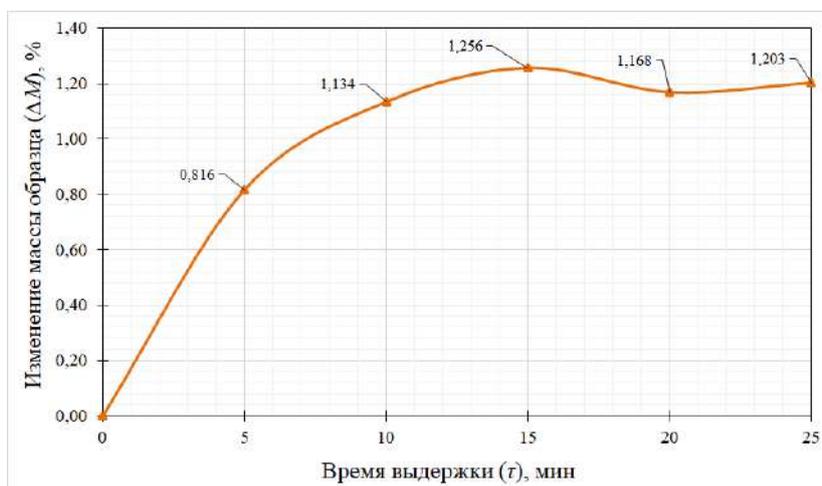


Рис. 6. Диаграмма набухания образцов в термовакуумной камере при взаимодействии с гидравлическим маслом марки МГ-15-Б

Fig. 6. Diagram of the swelling of samples in a thermal vacuum chamber when interacting with hydraulic oil brand MG-15-B

При взаимодействии исследуемых образцов в термовакуумной камере с бензином (см. рис. 5) при температуре 23 °С в течение 25 мин. имеет место изменение массы от первоначальной на 27,5 %. Каждые 5 мин. выдержки происходит незначительный рост набухания, в среднем масса изменяется на 3,1 %.

При проведении экспериментальных исследований в термовакуумной камере с гидравлической жидкостью марки МГ-15-Б (см. рис. 6) при температуре 23 °С в течение 25 мин. имеет место максимальное изменение массы образцов на 1,256 %. Наибольшая интенсивность поглощения наблюдается в первые 5 мин. испытаний, масса образцов за это время увеличилась на 0,82 % от первоначальной.

Заключение

На основании проведенных физико-механических испытаний с образцами уплотнительного кольца клапана сливного прибора можно сделать вывод, что в условиях промышленного предприятия наиболее эффективным будет проведение автоматизированного ускоренного испытания резинотехнических изделий, так как это позволит сэкономить время.

Предварительно можно сказать, что 24 ч выдержки образцов в бензине (марка АИ-95) при атмосферном давлении соответствуют 50–55 мин. выдержки испытуемых образцов в термовакуумной камере.

При проведении автоматизированного испытания образцов в среде гидравлического масла МГ-15-Б

невозможно провести соответствие с результатами испытаний, проведенных при атмосферном давлении, ввиду получения отличных друг от друга результатов. Это дает перспективу для проведения дальнейших исследований процесса набухания резинотехнических изделий в среде вязких нефтепродуктов.

Результаты проведенного эксперимента указывают на необходимость замены материала уплотнительного кольца клапана сливного прибора вагонов-цистерн для перевозки светлых нефтепродуктов в связи с потерей его физико-механических свойств при перевозке легких углеводородов более 96 ч.

Список литературы

1. ГОСТ 7338-90. Пластины резиновые и резинотканевые. Технические условия. Введ. 1991-07-01. М.: Межгосударственный стандарт: Изд-во стандартов, 1991. 43 с.
2. ГОСТ 269-66. Резина. Общие требования к проведению физико-механических испытаний. Введ. 01.07.66. М.: Межгосударственный стандарт: Изд-во стандартов, 1966. 18 с.
3. ГОСТ 9.030-74. Резины. Методы испытаний на стойкость в ненапряженном состоянии к воздействию жидких агрессивных сред. Введ. 01.07.75. М.: Межгосударственный стандарт: Стандартиформ, 2008. 13 с.
4. Буторин Д.В., Чукай И.В., Филиппенко Н.Г. Технология маслоснаполнения полимерных и композитных антифрикционных материалов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: материалы Седьмой международной научно-практической конференции, посвященной 355-летию со дня основания города Иркутска, 29 марта – 01 апреля 2016 г. Иркутск: в 2 т., Т. 2. Иркутск: ИрГУПС, 2016. С. 490–495.
5. Морчиладзе И.Г., Никодимов А.П., Соколов М.М., Третьяков А.В. Железнодорожные цистерны: учеб. пособ. для работников железнодорожного транспорта. М.: ИБС-Холдинг, 2006. 516 с.
6. Филиппенко Н.Г. Определение фазовых и релаксационных переходов в полимерных материалах / Н.Г. Филиппенко, Д.В. Буторин, А.В. Лившиц // Автоматизация. Современные технологии. 2017. Т. 71. № 4. С. 171–175.
7. Патент на полезную модель RU 132209 U1 Устройство диагностики деталей из полиамидных материалов А.Г. Ларченко, А.В. Лившиц, Н.Г. Филиппенко, С.И. Попов, 10.09.2013. Заявка № 2013115531/28 от 05.04.2013.
8. Филиппенко Н.Г. Автоматизация измерения температуры полимерного материала при высокочастотном электротермическом нагреве / Н.Г. Филиппенко, Д.В. Буторин, А.В. Лившиц, М.С. Попов, В.Е. Гозбенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 1 (53). С. 96–103.
9. Беломестных А.А. Анализ конструкции сливного прибора вагонов-цистерн и наличие автоматизированных систем контроля его работоспособности [Электронный ресурс] / А.А. Беломестных, И.В. Матвеев, Н.А. Чипизубов, Т.Т. Чумбадзе // Молодая наука Сибири: электрон. науч. Журн. 2021. № 1(11). URL: <https://mnv.irgups.ru/toma/111-2021>. Загл. с экрана.
10. Губенко В.К., Никодимов А.П., Жилин Г.К. и др. Цистерны (устройство, эксплуатация, ремонт): справочное пособие. М.: Транспорт. 1990. 151 с.
11. Ворон О.А., Челохьян А.В., Криворудченко В.Ф., Довгаль Е.А., Риполь-Сарагоси Л.Ф., Стрельченко Г.В., Шаповалов В.В. Особенности конструкции современных грузовых вагонов: учеб. пособие для вузов железнодорожного транспорта. Ростов: РГУПС, 2010. 403 с.
12. Григорьев А.Н., Асламазов Г.М., Кузьмин С.П. Железнодорожные цистерны: Устройство, эксплуатация и ремонт. Москва: Трансжелдориздат, 1959. 215 с.
13. Филиппов В.Н., Козлов И.В., Курыкина Т.Г., Подлесников Я.Д. Сливно-наливная и предохранительная арматура цистерн для опасных грузов 2-го и 3-го классов опасности: Методические указания. М.: МГУПС (МИИТ), 2015. 41 с.
14. Резниченко С.В., Морозова Ю.Л. Большой справочник резинщика. Ч. 2. Резины и резинотехнические изделия. М.: ООО «Издательский центр «Техинформ» МАИ», 2012. 648 с.
15. Медведев В.И., Тесленко И.О. Перевозка опасных грузов железнодорожным транспортом: учеб. пособие. М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2015. 151 с.
16. Быков Б.В. Конструкция, техническое обслуживание и текущий ремонт грузовых вагонов / М.: Желдориздат, Трансинфо, 2005. 416 с.
17. Лукин В.В., Анисимов П.С., Федосеев Ю.П. Вагоны. Общий курс: Учебник для вузов ж.-д. трансп. / под ред. В.В. Лукина. М.: Маршрут, 2004. 424 с.
18. Пастухов И.Ф. Конструкция вагонов: учебник для колледжей и техникумов ж.-д. транспорта / И.Ф. Пастухов, В.В. Пигунов, Р.О. Кошкалда. Изд. 2-е. М.: Маршрут, 2004. 504 с.
19. Андросюк В.Н. и др. Опасные грузы. Классификация. Знаки опасности. Идентификация. Справочник. М.: Маршрут, 2004. 231 с.

References

1. GOST 7338-90. Plastiny rezinovyie i rezinotkanevyye. Tekhnicheskie usloviya. Vved. 1991-07-01. [GOST 7338-90. Rubber and rubber-fabric plates. Technical conditions. Introduced 1991-07-01]. Moscow: Interstate standard: Izd-vo standartov Publ., 1991. 43 p.
2. GOST 269-66. Rezina. Obshchie trebovaniya k provedeniyu fiziko-mekhanicheskikh ispytaniy. Vved. 01.07.66 [GOST 269-66. Rubber. General requirements for physical and mechanical tests. - Introduction. 01.07.66]. Moscow: Interstate standard: Izd-vo standartov Publ., 1966. 18 p.
3. GOST 9.030-74. Reziny. Metody ispytaniy na stoikost' v nenapryazhyennom sostoyanii k vozdeystviyu zhidkikh agresivnykh sred. Vved. 01.07.75 [GOST 9.030-74. Rubber. Test methods for resistance in unstressed state to the effects of aggressive liquid media. Introduction. 07/01/75]. Moscow: Interstate standard: Standartinform Publ., 2008. 13 p.

4. Butorin D.V., Chuklai I.V., Filippenko N.G. Tekhnologiya maslonapleneniya polimernykh i kompozitnykh antifriktsionnykh materialov [Technology of oil filling of polymer and composite antifriction materials]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona: materialy Sed'moi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 355-letiyu so dnya osnovaniya goroda Irkutsk, 29 marta – 01 aprelya 2016 g.* [Transport infrastructure of the Siberian region: materials of the Seventh international scientific and practical conference dedicated to the 355th anniversary of the founding of the city of Irkutsk, March 29 – April 01, 2016 Irkutsk: in 2 vols. Vol. 2]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2016. Pp. 490–495.

5. Morchiladze I.G., Nikodimov A.P., Sokolov M.M., Tret'yakov A.V. Zheleznodorozhnye tsisterny: ucheb. posob. dlya rabotnikov zheleznodorozhnogo transporta [Railway tanks: A textbook for railway workers]. Moscow: IBS-Holding Publ., 2006. 516 p.

6. Filippenko N.G., Butorin D.V., Livshits A.V. Opredelenie fazovykh i relaksatsionnykh perekhodov v polimernykh materialakh [Determination of phase and relaxation transitions in polymeric materials]. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii [Automation. Modern technologies]*, 2017. Vol. 71. No. 4. Pp. 171–175.

7. Larchenko A.G., Livshits A.V., Filippenko N.G., Popov S.I. *Ustroistvo diagnostiki detalei iz poliamidnykh materialov [A device for diagnostics of parts made of polyamide materials]*. Utility model patent RU 132209 U1, 10.09.2013. Application No. 2013115531/28 dated April 05, 2013.

8. Filippenko N.G., Butorin D.V., Livshits A.V., Popov M.S., Gozbenko V.E. Avtomatizatsiya izmereniya temperatury polimernogo materiala pri vysokochastotnom elektrotermicheskom nagreve [Automation of measuring the temperature of a polymer material during high-frequency electrothermal heating]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie [Modern technologies. System analysis. Modeling]*, 2017. No. 1 (53). Pp. 96–103.

9. Belomestnykh A.A., Matveev I.V., Chipizubov N.A., Chumbadze T.T. Analiz konstruksii slivnogo pribora vagonov-tsitern i nalichie avtomatizirovannykh sistem kontrolya ego rabotosposobnosti [Analysis of the design of the drain device for tank cars and the availability of automated control systems for its performance [Electronic media]]. *Molodaya nauka Sibiri: elektron. nauch. zhurn. [Young Science of Siberia: an electronic scientific journal]*, 2021. No. 1(11). URL: <https://mnv.irgups.ru/toma/111-2021>.

10. Gubenko V.K., Nikodimov A.P., Zhilin G.K. et al. Tsisterny (ustroistvo, ekspluatatsiya, remont): spravochnoe posobie [Tanks (device, operation, repair); a reference manual]. Moscow: Transport Publ., 1990. 151 p.

11. Voron O.A., Chelokhyan A.V., Krivorudchenko V.F., Dovgal' E.A., Ripol'-Saragossi L.F., Strel'chenko G.V., Shapovalov V.V. Osobennosti konstruksii sovremennykh gruzovykh vagonov: ucheb. posobie dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta [Features of the design of modern freight cars: a textbook for railway transport universities]. Rostov: RGUPS Publ., 2010. 403 p.

12. Grigor'ev A.N., Aslamazov G.M., Kuz'min S.P. Zheleznodorozhnye tsisterny: Ustroistvo, ekspluatatsiya i remont [Railway tanks: Device, operation and repair]. Moscow: Transzheldorizdat Publ., 1959. 215 p.

13. Filippov V.N., Kozlov I.V., Kurykina T.G., Podlesnikov Ya.D. Slivo-nalivnaya i predokhranitel'naya armatura tsistern dlya opasnykh gruzov 2-go i 3-go klassov opasnosti: Metodicheskie ukazaniya [Unloading and filling and safety valves of tanks for dangerous goods of the 2nd and 3rd hazard classes: Methodical instructions]. Moscow: MGUPS (MIIT) Publ., 2015. 41 p.

14. Reznichenko S.V., Morozova Yu.L. Bol'shoi spravochnik rezinshchika. Ch. 2. Reziny i rezinotekhnicheskie izdeliya [A comprehensive reference book of the rubber-maker. Part 2. Rubber and general mechanical rubber goods]. Moscow: OOO "Publishing Center" Tekhinform "MAI" Publ., 2012. 648 p.

15. Medvedev V.I., Teslenko I.O. Perevozka opasnykh gruzov zheleznodorozhnym transportom: ucheb. posobie [Transportation of dangerous goods by rail: a textbook]. Moscow: FGBOU "Educational and methodological center for education on railway transport" Publ., 2015. 151 p.

16. Bykov B.V. Konstruksiya, tekhnicheskoe obsluzhivanie i tekushchii remont gruzovykh vagonov [Construction, maintenance and current repair of freight cars]. Moscow: Zheldorizdat, Transinfo Publ., 2005. 416 p.

17. Lukin V.V., Anisimov P.S., Fedoseev Yu.P. Vagony. Obshchii kurs: Uchebnik dlya vuzov zh.-d. transp. [Wagons. The general course: A textbook for higher educational institutions of railway transport]. In Lukin V.V. (ed) Moscow: Marshrut Publ., 2004. 424 p.

18. Pastukhov I.F., Piginov V.V., Koshkalda R.O. Konstruksiya vagonov: uchebnik dlya kolledzhei i tekhnikumov zh.-d. transporta [The construction of cars: a textbook for colleges and technical schools of the railway transport]. 2nd ed. Moscow: Marshrut Publ., 2004. 504 p.

19. Androsyuk V.N. et al. Opasnye gruzy. Klassifikatsiya. Znaki opasnosti. Identifikatsiya. Spravochnik [Dangerous goods. Classification. Danger signs. Identification. A reference book]. Moscow: Marshrut Publ., 2004. 231 p.

Информация об авторах

Филиппенко Николай Григорьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации производственных процессов, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: ifpi@mai.ru

Беломестных Артем Александрович – кафедра автоматизации производственных процессов, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: artiom.belomestnyh@yandex.ru.

Чумбадзе Тамара Темуриевна – кафедра автоматизации производственных процессов, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: tamriko98@yandex.ru

Information about the authors

Nikolai G. Filippenko – Associate Professor of the Subdepartment of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: ifpi@mai.ru

Artyom A. Belomestnykh – Subdepartment of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: artiom.belomestnyh@yandex.ru

Tamara T. Chumbadze – Subdepartment of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: tamriko98@yandex.ru

Электрическая система обеспечения теплового режима стрелочных переводов железнодорожных путей

Д. В. Герциг¹✉, О. Л. Маломыжев², А. Г. Семенов³, Д. О. Маломыжев²

¹Октябрьская железная дорога (Зеленогорская дистанция пути), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

²Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

³Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ angel.777@mail.ru

Резюме

Стрелочные переводы являются неотъемлемой частью железнодорожных путей и обеспечивают движение поездов и рациональное функционирование железнодорожного транспорта. Стрелочные переводы в основном используются на открытых участках рельсовой колее, они подвергаются воздействию окружающей среды и, в первую очередь атмосферных осадков – дождь, снег, град, а также влиянию температуры воздуха, которая может изменяться от отрицательных до положительных значений. При этом между подвижными частями стрелочных переводов, на их поверхностях может скапливаться снег, лед, что вызывает затруднение перевода стрелок, вплоть до полного прекращения их функционирования. Для обеспечения бесперебойной работы стрелочных переводов применяют различные способы их очистки от снега и льда – механическая очистка, обогрев, обеспечивающий таяние замерзшей влаги и др. Обогрев стрелочных переводов обладает бесспорным преимуществом по сравнению с механической очисткой, так как не требует прекращения движения поездов на период проведения очистительных работ. В свою очередь, подогрев стрелочных переводов приводит к постоянным энергозатратам, что требует создания рациональных конструкций, обеспечивающих необходимый температурный режим при минимальном энергопотреблении. В статье рассматривается одно из возможных технических решений усовершенствования системы автоматической очистки стрелочных переводов от снега и льда, которое основано на обеспечении рациональной температуры ответственных участков железнодорожных путей с помощью электронагревательных элементов с системой автоматического управления. Предложенное техническое решение апробировано в Санкт-Петербурге на Зеленогорской дистанции пути Октябрьской железной дороги и защищено патентом Российской Федерации № 0056908 U1.

Ключевые слова

железная дорога, стрелочный перевод, очистка от льда и снега, электрическая система подогрева, автоматическое обеспечение теплового режима

Для цитирования

Герциг Д. В. Электрическая система обеспечения теплового режима стрелочных переводов железнодорожных путей / Д. В. Герциг, О. Л. Маломыжев, А. Г. Семенов, Д. О. Маломыжев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 2 (70). – С. 69–75. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).69-75

Информация о статье

поступила в редакцию: 02.02.2021, поступила после рецензирования: 12.02.2021, принята к публикации: 23.02.2021

Electrical system of ensuring the thermal regime of railway turnout switches

D. V. Gertsig¹✉, O. L. Malomyzhev², A. G. Semenov³, D. O. Malomyzhev²

¹The Oktyabrskaya railway (The Zelenogorskaya track maintenance section), Saint Petersburg, the Russian Federation

²Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

³Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, the Russian Federation

✉ angel.777@mail.ru

Abstract

Turnout switches are an integral part of railway tracks that ensure the movement of trains and the rational functioning of the railway transport. Due to the fact that turnout switches are mainly used on open sections of track, they are exposed to the environment and, first of all, to atmospheric precipitation – rain, snow, hailstones, as well as to the influence of air temperature that can vary from negative to positive values. At the same time, snow, ice, etc. can accumulate between the moving parts of the turnout switches, on their surfaces, which in turn causes difficulty in the turnout switch operation, up to the complete termination of their functioning. To ensure the smooth operation of turnout switches, various methods of cleaning them from snow and ice are used – mechanical cleaning, heating, which provides for the melting of frozen moisture, etc. The heating of turnout switches has an in-

disputable advantage over cleaning, since it does not require stopping the movement of trains for the period of cleaning work. In turn, the heating of turnout switches results in constant energy consumption, which requires the creation of rational structures that make provision for the necessary temperature with minimal energy consumption. The article considers and tests one of the possible technical solutions for improving the system of automatic cleaning of turnout switches from snow and ice. This technical solution is based on ensuring the rational temperature of the critical sections of railway tracks with the help of electric heating elements with an automatic control system. The proposed technical solution was tested in St. Petersburg on the Zelenogorskaya track maintenance section of the Oktyabrskaya Railway track and is protected by the patent of the Russian Federation No. 0056908 U1.

Keywords

railway, switch, ice and snow removal, electric heating system, automatic provision of thermal regime

For citation

Gertsig D. V., Malomyzhev O. L., Semyonov A. G., Malomyzhev D. O. Elektricheskaya sistema obespecheniya teplovogo rezhima strelochnykh perevodov zheleznodorozhnykh putei [Electric system for thermal re-press switches the train tracks]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 2 (70), pp. 69–75. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).69-75

Article Info

Received: 02.02.2021, Revised: 12.02.2021, Accepted: 23.02.2021

Введение

Атмосферные осадки в виде снега и льда, а также замерзающая влага воздуха при перепадах температуры, препятствует функционированию стрелочных переводов (далее – СП) вплоть до полного прекращения их работы. Представляемая научно-техническая разработка позволяет автоматически очищать стрелки от снега, льда, замерзшего конденсата и обеспечивает их бесперебойное функционирование.

Предложенное устройство представляет собой совокупность термоэлектрических нагревателей (ТЭН), которые устанавливаются (крепятся) на элементы одного или нескольких СП – острия, рельсы, прочие элементы, которые необходимо нагревать до температуры таяния снега и льда. ТЭНы соединяются электрическими проводами с элементами сигнализации, управления, аварийного отключения и централизованного управления.

В настоящее время широко используется достаточно большое количество устройств электрического подогрева, обеспечивающих предотвращение в зимний период времени отказов в работе СП, тормозов-замедлителей и пр. [1–9]. Одним из наиболее характерных устройств, является конструкция [10], в которой ТЭНы смонтированы вдоль рамного рельса в зоне контакта с поверхностью его подошвы и вдоль острия. Также в качестве источников тепловой энергии в виде ТЭНов, обеспечивающих необходимый тепловой режим работы СП и соответственно их очистки от снега и льда, предложены в работе [11].

Одной из важных задач при электрическом подогреве СП с использованием ТЭН является возможность применения дистанционного ручного и (или) автоматического управления, контроля работоспособности, а также автоматического отключения в случае возникновения неисправности.

Для реализации таких возможностей наиболее распространены автоматические устройства изменения сопротивления изоляции и ТЭН, и проводов, и прочих исполнительных элементов [12]. В результате научных и опытно-конструкторских исследований установлена необходимость аварийного отключения устройств электрического подогрева СП при снижении сопротивления изоляции до 27 кОм.

Анализ задачи

При разработке предлагаемой конструкции локального обогрева железнодорожных СП был учтен опыт эксплуатации устройства, предложенного в [13], которое нашло широкое применение в России, в том числе на Октябрьской железной дороге (ОЖД), а также в некоторых зарубежных странах – Франции, Швеции, Китае и др. В данном устройстве используются группы термоэлектрических нагревателей, которые подсоединяются силовым электрическим кабелем параллельно через разъединители к трехфазной сети переменного тока, а также к устройствам питания АПЭ-2-1. Электропитание контролируется по силе тока и его утечкам через изоляцию, при возникновении короткого замыкания и снижении сопротивления изоляции ниже минимально-допустимого значения имеется возможность отключать ТЭНы. Также, предусмотрена возможность отключения питания электронагревательных элементов при возникновении чрезвычайных событий или несанкционированного вмешательства посторонних лиц.

В устройстве ТЭНы объединяются в группы, каждая из которых может содержать 4–10 единиц, предназначенных для обогрева определенного фрагмента – острия, поверхность подошвы рельса и др. Электропитание ТЭН осуществляется через силовой трансформатор, обеспечивающий снижение

напряжения до необходимого безопасного уровня, а также гальваническую развязку для каждой зоны обслуживания.

Для управления и контроля за состоянием теплоэлектронагревателей используются соответственно электромагнитные реле и устройства автоматического контроля изоляции моделей РКИ и АКИ-2 или АКИ-2М [14]. Данные приборы требуют наличия заземляющего контура.

Несмотря на широкое использование рассмотренного устройства разными странами, оно имеет ряд недостатков, основными из которых являются:

1. ТЭНы в виду их конструктивной особенности имеют ограниченный срок службы, причем вероятность выхода из строя носит случайный и практически не поддающийся прогнозированию характер. В итоге, при возникновении неисправности в одном устройстве происходит автоматическое отключение питания всех групп электронагревателей. Сразу определить, в каком конкретно теплоэлектронагревателе возникла неисправность нельзя. В итоге восстановительные работы занимают длительный промежуток времени, так как для поиска и замены неисправного ТЭНа, необходимо отсоединение питающих электропроводов и применение переносных приборов для измерения сопротивления электронагревательных устройств, а также сопротивления изоляции. Проведение восстановительных работ обуславливает необходимость прекращения движения поездов, что вызывает значительные материальные затраты. Следует отметить, что за зимний период в России возникает необходимость замены 16–75 % ТЭН.

2. Устройства автоматического контроля сопротивления изоляции АКИ и РКИ имеют достаточно высокую стоимость, которая составляет, включая все исполнительные работы, до 300 тыс. руб.

3. Электрошкаф контроля и управления имеет большие габариты (1,1×1,2×2,0 м), а его вес достигает 1 000 кг.

4. Устройство требует обязательного наличия заземляющего контура, обеспечивающего его исправное функционирование, с этой целью выполняются специальные работы. Для его размещения также нужен свободный участок территории.

5. Применение понижающего трансформатора, обеспечивающего гальваническую развязку участка подогрева стрелочных переводов также существенно повышает стоимость конструкции и повышает риск несанкционированного доступа посторонних лиц с целью похищения медного провода.

6. Невозможность использования малогабаритных клеммных коробок, что вызывает необходимость применения специальных металлических коробок, расположенных в непосредственной близости от ТЭН.

На основе анализа конструкции подогрева стрелочных переводов [13] установлены основные ее недостатки, были сформулированы задачи исследования, решение которых позволило создать устройство, имеющее более высокую техническую эффективность и меньшие затраты на его изготовление, обслуживание и ремонт в процессе эксплуатации:

- сокращение времени задержки движения поездов при замене неисправных ТЭН;
- уменьшение стоимости устройства;
- снижение затрат на обслуживание и ремонт, а также габаритов и массы контрольно-управляющего оборудования;
- повышение безопасности при проведении работ по обслуживанию и ремонту;
- снижение требований к заземляющему контуру.

Реализация электрического устройства обогрева стрелочного перевода

Решение поставленной задачи конкретно (в строгой сжатой формулировке совокупности существенных признаков с разделением последних на две части – ограничительную и отличительную) обеспечивается следующими условиями:

- устройство локального обогрева СП, замедлителей и пр. содержит одну и более групп ТЭН, которые параллельно подсоединяются к клеммам разъединителей и имеют возможность подключения как к одной трехфазной сети трехфазного переменного тока, так и ко всем трем фазам;
- элементы контроля, управления и защиты при возникновении короткого замыкания, возникновения утечек тока при снижении сопротивления изоляции и (или) ее повреждении;
- защита каждого ТЭНа осуществляется путем применения индивидуального дифференциального и автоматического устройства отключения;
- снижаются требования к сопротивлению заземляющего контура;
- использование автономных клеммных разъединителей для каждого ТЭНа и индивидуальных устройств отключения не приводит к приращению функционирования всего устройства;
- не требуется длительный поиск неисправного электронагревательного элемента;
- не нуждается в длительном отключении устройства при проведении работ по замене неисправных ТЭН.

Поставленная задача решена путем внесения изменений в схемы подключения теплоэлектронагревательных элементов к сети трехфазного переменного тока, применения новых элементов контроля и управления и соединительных устройств (рис. 1, 2) [14].

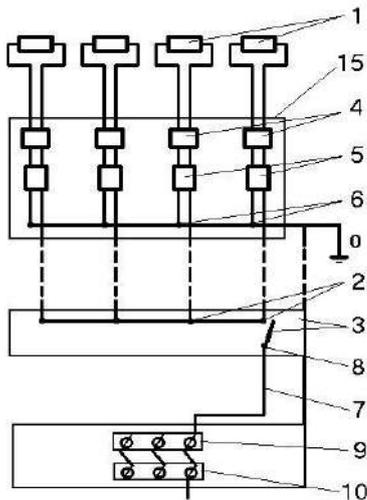


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема одной группы термоэлектрических нагревателей (одного фрагмента пути)

Fig. 1. Schematic electrical circuit diagram of one group of thermal electric heaters (one fragment of the track)

Предлагаемое устройство включает от одной до нескольких (в большинстве случаев не превышает шести) групп ТЭН 1, которые независимо друг от друга присоединяются к клеммам 2, индивидуальным для каждого нагревателя разъединителями 3, представляющих собой разъединители электрической цепи с ручным или дистанционным электромагнитным управлением. Последовательно разъединителям подключаются устройства защитного отключения 4 и автоматические выключатели 5, либо устанавливается дифференциальный автоматический разъединитель. Перечисленные устройства 4 и 5 стандартные, изготавливаемые промышленностью, позволяющие выполнять отключение ТЭН при возникновении короткого, длинного замыканий, а также снижении сопротивления изоляции и возникновении утечки тока.

В свою очередь, разъединитель 3 подсоединяется одним выводом 6 к нулевому проводу, а другим 8 через провод 7 к клеммам трехфазного устройства защитного отключения 9 и соединенного с ним последовательно трехфазного автомата отключения по току и короткому замыканию 10. В свою очередь, устройства автоматического отключения 9 и 10 могут быть заменены трехфазным дифференциальным автоматическим разъединителем, включающим в себя обе описанные функции.

Устройства дистанционного управления разъединителем 3, сигнализации о наличии либо отсутствии неисправностей, устройства переключения режимов работы системы обогрева и управления СП, заземляющий контур не имеют принципиальных отличий от устройства обогрева, описанного в [13].

Представленные ТЭНы 1 располагаются вдоль подогреваемых участков путей, при применении ТЭНов на стрелочных переводах 11, 12, вдоль рельсов 13 и остряка 14 (рис. 2).

Работа устройства локального электрообогрева СП заключается в следующем.

При включении разъединителя 3 напряжение переменного тока (220 В, 50 Гц) идет на ТЭНы 1 подключенной группы электронагревателей. Информация о включении и исправной работе поступает на централизованный пульт управления. Тепловыделение в электронагревателях приводит к повышению температуры участков железнодорожного пути, к которым прикреплены последние, что обеспечивает таяние льда и снега на фрагментах 11, 12 пути. Образовавшаяся при этом вода самостоятельно стекает под действием силы тяжести вниз.

Защита элементов системы управления, сигнализации и защитного отключения от воздействия атмосферных факторов (осадков, пыли, влаги и т. д.), а также несанкционированного доступа посторонних лиц обеспечивается путем применения специальной, горизонтально расположенной клеммной коробки 15, установленной возле обогреваемых фрагментов

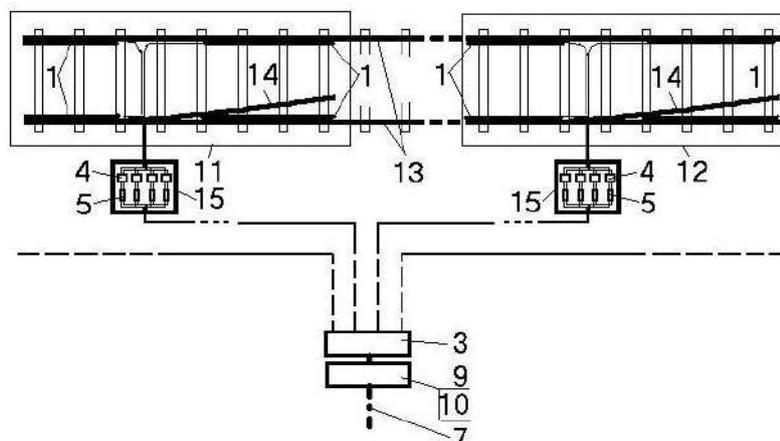


Рис. 2. Схема соединения обогреваемых участков пути с устройством энергообеспечения

Fig. 2. Diagram of connection of heated track sections with a power supply device

11 (12), в которую встроены устройства дистанционного 4 и автоматического отключения 5 группы нагревателей 1. Фактически уменьшение габаритов и веса электрического шкафа за счет применения более компактных элементов управления, а также снижения их количества по сравнению с устройством [14] позволило создать прочную и защищенную конструкцию.

В предлагаемом устройстве при возникновении неисправности в одном из ТЭН в виде утечки тока либо возникновении замыкания происходит его отключение элементами 4 и (или) 5. При этом исправные ТЭНы остаются подключенными к электропитанию и продолжают функционировать. В случае автоматического отключения одного или нескольких нагревателей, на центральный пульт поступает информация о неисправности, включающая в себя количество отключенных ТЭН и месте их расположения.

Ремонтная бригада заранее проинформирована о количестве нагревателей, подлежащих замене. Для их замены достаточно отключить питание только одного неисправного, в худшем случае одной группы или групп, содержащих неисправности. Время замены значительно сокращается, так как полностью устраняется необходимость поиска неисправного нагревателя. Может не возникнуть необходимость прекращения движения поездов вследствие как малых затрат времени на устранение неисправности.

Возникновение неисправностей в двух и более нагревателях, относящихся к разным группам, приводит лишь к количественному изменению ситуации, в которой может произойти разъединение в токовом выключателе 9 и (или) трехфазном устрой-

стве защитного отключения 10, аналогично разъединению цепи элементами 4 и 5.

Практическое применение предлагаемой установки обогрева СП, а также локальных участков железнодорожных путей позволит снизить стоимость систем управления и разъединения питания до 10 раз. Применение серийно выпускаемых устройств отключения по току утечки или замыканию составляет около 20–30 тыс. руб. Масса и габариты устройств снижаются до 8–10 раз. Повышается безопасность проведения ремонтных работ, а также значительно снижается время их проведения и, соответственно, время задержки движения поездов вплоть до полного сохранения графика их движения.

Приведенные данные подтверждены экспериментальным исследованием предложенной системы на одном из участков Зеленогорской дистанции пути ОЖД (гл. механик Д. В. Герцик).

Представляется заманчивым организация опытного участка в Иркутской области – регионе с более выраженной, чем в Санкт-Петербурге, температурой зимой, снегопадами, обледенением. В идеале с последующим широким внедрением.

Устройство запатентовано в Российской Федерации [15], а также апробировано [16–20].

Заключение

Подтверждена актуальность модернизации устройств локального обогрева железнодорожных путей с применением новой элементной базы и внедрения более эффективной материальной части. Представляется эффективным, по ряду показателей, разработанное, экспериментально проверенное, апробированное устройство электрической системы обеспечения теплового режима железнодорожных СП.

Список литературы

1. Брискин В.М. Электрообогрев стрелочных переводов // Железнодорожный транспорт. 1988. № 2. С. 58.
2. Геотермический обогрев стрелок // Железные дороги мира. 2013. № 1. С. 73–76.
3. Глюзберг Б.Э., Королев В.В. Удаление снега на стрелочных переводах // Путь и путевое хозяйство. 2014. № 3. С. 26–30.
4. Колисниченко Е.А. Устройство инфракрасного излучения как один из способов удаления снега и льда с остряковых рельсов // Путь XXI века : сб. науч. тр. III междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 205-летию создания Института Корпуса инженеров путей сообщения. СПб. : ПГУПС, 2015. С. 44–49.
5. Королев В.В. Системы удаления снега со стрелочных переводов в зимних условиях // Современные и перспективные конструкции железнодорожного пути для различных условий эксплуатации : сб. тр. ученых ОАО «ВНИИЖТ». М., 2013. С. 138–147.
6. Очистка стрелочных переводов от снега и льда на железных дорогах Северной Америки // Железные дороги мира. 1998. № 10. С. 72.
7. Твердохлеб Н.Ф. О способах электрообогрева стрелочных переводов // Промышленный транспорт. 1988. № 7 (199). С. 11.
8. А.с. 21200 А1 СССР. Устройство железнодорожного пути / Поярков С.С. № 66751 ; заявл. 20.03.1930 ; опубл. 31.07.1931
9. Ходырев Ю.А., Жамбал М. Удаление снега и песка с элементов пути и стрелочных переводов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. Т 1. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2017. С. 282–285.
10. Патент 151783 РФ, Устройство для очистки стрелочных переводов от снега и льда / Е.А. Колисниченко, Ю.А. Ходырев. № 2014135955/11 ; заявл. 03.09.2014 ; опубл. 20.04.2015.
11. Пат. № 20108, Рос. Федерация. Устройство для обогрева стрелочного перевода / Е.Ю. Новосельский, Г.Ю. Полишко, И.А. Иванов и др. № 2001106022 ; заявл. 06.03.2001 ; опубл. 20.10.2001.

12. Автомат контроля изоляции АКИ-2М: Техническое описание и инструкция по эксплуатации 36201-00-00ТО. Харьков : Харьк. завод электротехн. оборудования, 1987. 29 с.
13. Аппаратура питания устройств электрообогрева стрелочных переводов АПЭ-2-1 : паспорт Э189.1.00.00.000 ПС. М. : Министерство путей сообщения, Главное управление электрификации и электроснабжения, Проектно-конструкторское бюро. 1990. 10 с.
14. Ким К.К. Оптимизация энергопотребления систем электрообогрева железнодорожных стрелочных переводов // Бюл. результатов науч. исследований. 2021. Вып.1. С. 50–60. DOI: 10.20295/2223-9987-2021-1-50-60.
15. Пат. 2470108 Рос. Федерация. Устройство для обогрева стрелочного перевода / А.С. Дубинин. № 2008117757/11 ; заявл. 25.04.2008 ; опубл. 27.10.2009.
16. Пат. 56903 Рос. Федерация. Устройство локального электрообогрева железнодорожных путей / Д.В. Герциг, В.В. Разманов. № 2006117997 ; заявл. 24.05.2006 ; опубл. 27.09.2006.
17. Герциг Д.В., Семенов А.Г. Об актуальности модернизации путевого хозяйства на железной дороге // Изобретатели в инновационном процессе России : материалы науч.-практ. конф. с междунар. участием. СПб., 2014. С. 153–156.
18. Герциг Д.В., Семенов А.Г. Инновации на железных дорогах в суровом климате: модернизация системы электрообогрева стрелочных переводов // Транспортные и транспортно-технологические системы : материалы Междунар. науч.-техн. конф. Тюмень, 2016. С. 79–84.
19. Герциг Д.В., Семенов А.Г. Инновации на железных дорогах: альтернатива электрообогреву стрелочных переводов // Транспортные и транспортно-технологические системы : материалы Междунар. науч.-техн. конф. Тюмень, 2016. С. 84–88.
20. Семенов А. Инновации на железной дороге: системы обогрева стрелочных переводов // LAP LAMBERT Academic Publishing. Saarbrücken. Berlin. Leipzig, Deutschland 04.2017. ISBN 978-3-330-07000-4.

References

1. Briskin V.M. Elektroobogrev strelochnykh peregodov [The electrical heating of turnout switches]. *Zheleznodorozhnyi transport [Railway transport]*, 1988. No 2. P. 58.
2. Geotermicheskiy obogrev strelok [Geothermal heating of railway turnout switches]. *Zheleznye dorogi mira [Railways of the world]*, 2013, No. 1. Pp. 73–76.
3. Glyuzberg B.E., Korolev V.V. Udalenie snega na strelochnykh peregodakh [Removal of snow on turnout switches]. *Put' I putevoe khozyaistvo [Railway track and facilities]*, 2014. No. 3. Pp. 26–30.
4. Kolisnichenko E.A. Ustroistvo infrakrasnogo izlucheniya kak odin iz sposobov udaleniya snega i l'da s ostryakovykh rel'sov [Device of infrared radiation as one of the ways to remove snow and ice from switch rails]. *Sbornik nauchnykh trudov III mezhdunarodnoi nauchno – prakticheskoi 119 konferentsii, posvyashchyonnoi 205-letiyu sozdaniya Instituta Korpusa inzhenerov putei soobscheniya [Proceeding of scientific papers of the III International scientific and practical conference No. 119 to mark the 205th anniversary of the establishment of the Institute of the Corps of Railway Engineers]*. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2015. Pp. 44–49.
5. Korolyov V.V. Sistemy udaleniya snega so strelochnykh peregodov v zimnikh usloviyakh [Systems for removing snow from turnout switches in winter conditions]. *Sbornik trudov uchenykh OAO «VNIIZHT» «Sovremennye i perspektivnye konstruktivnyye zheleznodorozhnogo puti dlya razlichnykh uslovii ehkspluatatsii» [Collected works of scientists of OAO "VNIIZHT" «Modern and promising designs of the railway track for various operating conditions»]*. Moscow, 2013. Pp. 138–147.
6. Ochistka strelochnykh peregodov ot snega i l'da na zheleznykh dorogakh Severnoi Ameriki [Cleaning turnout switches from snow and ice on the railways of North America]. *Zheleznye dorogi mira [Railways of the world]*, 1988. No 10. P. 72.
7. Tverdokhlyob N.F. O sposobakh ehlektroobogreva strelochnykh peregodov [On the methods of the electric heating of turnout switches]. *Promyshlennyy transport [Industrial transport]*, 1988. No 7 (199). P. 11.
8. Poyarkov S.S. Ustroistvo zheleznodorozhnogo puti [Railway track arrangement]. Author's certificate 21200 A1 (USSR), application No. 66751 dated March 20, 1930; published July 31, 1931.
9. Khodyrev Yu.A., Zhambal M. Udalenie snega i peska s ehlementov puti i strelochnykh peregodov [Removal of snow and sand from the elements of the track and turnout switches]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona: materialy VIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii: v 2 chastyakh [Transport infrastructure of the Siberian region: materials of the eighth international conference: in 2 parts]*. Irkutsk, 2017. Vol. 1. Pp. 282–285.
10. Kolisnichenko E.A., Khodyrev Yu. A. Ustroistvo dlia ochistki strelochnykh peregodov ot snega i l'da [A device for cleaning turnout switches from snow and ice]. Patent RU 151783 U1, applied September 03, 2014, published April 20, 2015.
11. Novosel'skii E.Yu., Polishko G.Yu., Ivanov I.A., Bogdanovich V.A. et al. Patent RU 20108 U1, applied March 06, 2001, published October 20, 2001.
12. Avtomat kontrolya izolyatsii AKI-2M: Tekhnicheskoe opisaniye i instruktziya po ehkspluatatsii 36201-00-00TO [Automatic insulation control system AKI-2M: Technical description and operating instructions 36201-00-00TO]. Kharkov, the Kharkiv plant of electrical equipment Publ., 1987, 29 p.
13. Apparatura pitaniya ustroystv ehlektroobogreva strelochnykh peregodov APEH-2-1: Pasport EH189.1.00.00.000 PS [Power supply equipment for electric heating devices of switches APE-2-1: Passport E189. 1. 00. 00. 000 PS]. The Ministry of Railways, The General Directorate of Electrification and Power Supply, Design Bureau Publ., 1990, 10 p.
14. Kim K.K. Optimizatsiya energopotrebleniya sistem elektroobogreva zheleznodorozhnykh strelochnykh peregodov [Optimization of energy consumption of electric heating systems of railway switches]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy [Bulletin of the results of scientific research]*, 2021. No 1. Pp. 50–60. DOI: 10.20295/2223-9987-2021-1-50-60.

15. Dubinin A. S. *Ustroistvo dlya obogreva strelochnogo perevoda* [A device for the thermal heating of a turnout switch]. Patent RU 2470108 C2. Application No. 2008117757/11 dated April 25, 2008; publ. October 27, 2009.

16. Gertsig D.V., Razmanov V.V. *Ustroistvo lokal'nogo elektroobogreva zheleznodorozhnykh putei* [A device for the local electric heating of railway tracks]. Patent RF No. 56903, Russian Federation. Application No. 2006117997 dated May 24, 2006; publ. September 27, 2006.

17. Gertsik D.V., Semyonov A.G. Ob aktual'nosti modernizatsii putevogo khozyaistva na zheleznoi doroge [On the relevance of modernization of railway track facilities]. *Izobretateli v innovatsionnom protsesse Rossii: materialy Nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Inventors in the innovative process of Russia: proceeding of the scientific and practical conference with international participation]. St. Petersburg, 2014. Pp. 153–156.

18. Gertsik D.V., Semyonov A.G. Innovatsii na zheleznykh dorogakh v surovom klimate: modernizatsiya sistemy ehlektroobogreva strelochnykh perevodov [Innovations on railways in a harsh climate: modernization of the electric heating system of turnout switches]. *Transportnye i transportno-tekhnologicheskie sistemy: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Transport and transport-technological systems: materials of the International scientific and technical conference]. Tyumen', 2016. Pp. 79–84.

19. Gertsig D.V., Semyonov A.G. Innovatsii na zheleznykh dorogakh: al'ternativa ehlektroobogrevu strelochnykh perevodov [Innovations on railways: an alternative to the electric heating of turnout switches]. *Transportnye i transportno-tekhnologicheskie sistemy: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Transport and transport-technological systems: materials of the International scientific and technical conference]. Tyumen, 2016 Pp. 84–88.

20. Aleksandr Semyonov. Innovatsii na zheleznoi doroge: sistemy obogreva strelochnykh perevodov (Monografiya) [Innovations on the railway: heating systems for switch crossings (a monograph)]. LAP LAMBERT Academic Publishing. Saarbrücken – Berlin – Leipzig, Deutschland 04.2017. ISBN 978-3-330-07000-4.

Информация об авторах

Герциг Дмитрий Викторович – инженер, главный механик, Октябрьская железная дорога (Зеленогорская дистанция пути), г. Санкт-Петербург, e-mail: angel.777@mail.ru

Маломыжев Олег Львович – канд. техн. наук, доцент кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: olm@bk.ru

Семенов Александр Георгиевич – канд. техн. наук, старш. науч. сотрудник, доцент Высшей школы транспорта, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, e-mail: agenntnomer117@mail.ru

Маломыжев Дмитрий Олегович – кафедра электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: kbprf13@gmail.com

Information about the authors

Dmitrii V. Gertsig – engineer, chief mechanic, the Oktyabrskaya railway (the Zelenogorskaya track maintenance section), Saint-Petersburg, e-mail: angel.777@mail.ru

Oleg L. Malomyzhev – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Subdepartment of Railcars and Railcar Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: olm@bk.ru

Alexander G. Semyonov – Ph.D. in Engineering Science, Senior Researcher, Associate Professor of the Higher School of Transport, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, e-mail: agenntnomer117@mail.ru

Dmitrii O. Malomyzhev – The Subdepartment of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: kbprf13@gmail.com

DOI 10.26731/1813-9108.2021.2(70).75-84

УДК 342.9

Использование специальных средств фото- и видеофиксации в целях профилактики дорожно-транспортных происшествий в Иркутской области

Д. П. Алейников✉, А. В. Зык

Восточно-Сибирский институт МВД России, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ dmitriy-aleinikov@mail.ru

Резюме

Проблема аварийности на автотранспорте приобрела особую остроту в последнее десятилетие в связи с несоответствием существующей дорожно-транспортной инфраструктуры потребностям общества и государства в безопасном дорожном движении, недостаточной эффективностью функционирования этой системы, а также крайне низкой дисциплиной участников дорожного движения. Эффективным способом профилактики дорожно-транспортных происшествий является применение специальных средств фото- и видеофиксации, осуществляющих контроль за соблюдением водителями правил дорожного движения. Современные программно-аппаратные средства на основе применения технологий обработки «больших данных» позволяют анализировать и определять дорожные участки с наиболее частыми случаями дорожно-транспортных происшествий и способствуют оптимизации дорожно-транспортной сети. В данной статье приводится обзор специальных программно-аппаратных средств фото- и видеофиксации, используемых на территории Иркутской области, представлены их основные и сравнительные характеристики, рассмотрены принципы работы. На основе проведенного анализа применяющихся средств фото- и видеофиксации сформулированы следующие выводы: использование средств автоматизированной фото- и видеофиксации административных правонарушений в области дорожного

движения в рамках профилактики и обеспечения безопасности дорожного движения на наиболее аварийно-опасных участках автомобильных дорог позволит влиять на уровень аварийности; передислокация мест контроля скорости при небольшом количестве комплексов позволяет существенно повысить эффективность профилактики дорожно-транспортных происшествий и дисциплинирует водителей на различных участках дорог Иркутской области.

Ключевые слова

дорожное движение, дорожно-транспортное происшествие, аварийно-опасный участок автодороги, административное правонарушение, автоматическая фиксация правонарушений, специальные средства фото- и видеофиксации

Для цитирования

Алейников Д. П. Использование специальных средств фото- и видеофиксации в целях профилактики дорожно-транспортных происшествий в Иркутской области / Д. П. Алейников, А. В. Зык // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 2 (70). – С. 75–84. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).75-84

Информация о статье

поступила в редакцию: 22.12.2020, поступила после рецензирования: 25.01.2021, принята к публикации: 05.02.2021

Use of special means of photo and video recording for the prevention of road accidents in the Irkutsk region

D. P. Aleinikov✉, A. V. Zyk

The East Siberian Institute of the Russian Federation Ministry of Internal Affairs, Irkutsk, the Russian Federation

✉ dmitriy-aleinikov@mail.ru

Abstract

The problem of road traffic accidents has become especially sensitive in the last decade due to the inconsistency of the existing road transport infrastructure with the needs of society and the state in safe road traffic, insufficient efficiency of the functioning of this system, as well as extremely low discipline of road users. An effective way to prevent road traffic accidents is to use special photo and video recording tools that monitor the compliance of drivers with the requirements of road rules. Modern software and hardware based on the use of Big Data processing technologies allow one to analyze and identify road sections with the most frequent cases of road traffic accidents and contribute to the optimization of the road transport network. This article provides an overview of special software and hardware for photo and video recordings used in the Irkutsk region. It presents the main and comparative characteristics of special software and hardware for photo and video recording and considers their principles. Based on the analysis of the photo and video recording tools used, the following conclusions were formulated: the use of automated photo and video recording of administrative offenses in the field of road traffic as part of the prevention and safety of road traffic on the most hazardous sections of highways will affect the accident rate; redeployment of speed control places with a small number of complexes can significantly increase the effectiveness of road traffic accidents prevention and discipline drivers on various sections of the roads of the Irkutsk region.

Keywords

road traffic, road traffic accident, hazardous sections of highways, administrative offense, automated photo and video recording of administrative offenses, special means of photo and video recording

For citation

Aleinikov D. P., Zyk A. V. Ispol'zovanie spetsial'nykh sredstv foto i videofiksatsii v tselyakh profilaktiki dorozhno-transportnykh proissheshtvii v Irkutskoi oblasti [Use of special means of photo and video recording for the prevention of road accidents in the Irkutsk region]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2021, No. 2 (70), pp. 75–84. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).75-84

Article Info

Received: 22.12.2020, Revised: 25.01.2021, Accepted: 05.02.2021

Введение

В связи с ростом количества автомобильного транспорта проблема обеспечения безопасности всех участников дорожного движения становится как никогда актуальной. На решение данной проблемы государство затрачивает значительные ресурсы, выстраивая и создавая при этом комплексные системы профилактики, направленные на повыше-

ние культуры участников дорожного движения водителей и пешеходов. Так же выполняются мероприятия по созданию и поддержке объединений, деятельность которых направлена на реализацию социальных проектов связанных с воспитанием детей и подростков; улучшается качество подготовки водителей за счет применения современных обучающих технологий, тренажеров и виртуальных поли-

гонов. Современные программно-аппаратные средства на основе применения технологий обработки «больших данных» позволяют анализировать и определять участки дорог с наиболее частыми случаями дорожно-транспортных происшествий и способствуют оптимизации дорожно-транспортной сети [1, 2]. Также рост микропроцессорной техники позволяет внедрять современные инженерные системы мониторинга транспортного потока и средств обеспечения дорожного движения, специальных технических средств и автоматизированных систем контроля движением [3, 4]. Существенное внимание уделяется решению задач, направленных на формирование у участников дорожного движения навыков безопасного поведения, проектирование оптимальных схем управления системой безопасности дорожного движения на различных уровнях, в том числе обеспечивающих экономическую заинтересованность субъектов РФ муниципальных образований в финансировании на долевой основе с федеральным бюджетом мероприятий по обеспечению безопасности дорожного движения в регионах и муниципальных образованиях [5–12].

В соответствии с реализацией национальных целей и стратегических задач, утвержденных указом Президента Российской Федерации «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» от 7 мая 2018 г. № 204, основной задачей государственной политики в сфере безопасности дорожного движения на ближайшие пять лет (начиная с 2019 г.) является сокращение смертности населения от дорожно-транспортных происшествий (ДТП) до уровня, не превышающего четырех погибших на 100 тыс. населения к 2024 г. По итогам 2019 г. показатель социального риска не должен превышать 13,6, а по итогам 2020 г. – 12,6 [13, 14].

В связи с вышеизложенными проблемами, целью

настоящего исследования является анализ используемых в Иркутской области специальных средств фото и видеофиксации в целях профилактики дорожно-транспортных происшествий, а также определение возможности накопления и обработки «больших данных», способствующих оптимизации дорожно – транспортной сети.

Сравнительный анализ специальных средств фото- и видеофиксации

Анализ показывает, что 90 % ДТП происходит по причине сознательного нарушения водителями автотранспортных средств существующих правил дорожного движения (ПДД) [15]. Одним из наиболее эффективных способов предотвращения нарушений ПДД является применение систем автоматической фиксации нарушений в области дорожного движения [16].

На сегодняшний день на территории Иркутской области установлено и введено в эксплуатацию 136 комплексов автоматизированной фиксации административных правонарушений: «Скат», «Арена», «Автоураган-ВСМ», «Вокорд», которые выполняют функции профилактики и контроля за соблюдением ПДД. Данные комплексы позволяют выявлять и зафиксировать следующие нарушения: превышение установленного скоростного порога, выезд на запрещающий сигнал светофора, выезд на встречную полосу движения, нарушение правил остановки / стоянки, выезд за стоп-линию, нарушение правил расположения транспортного средства (ТС) на проезжей части, игнорирование требований ПДД уступать дорогу пешеходам [17, 18].

В Иркутской области используются следующие комплексы фото- и видеофиксации:

1. Аппаратно-программный комплекс Vocord Traffic R (рис. 1) для фото- и видеофиксации нарушений ПДД на линейных участках дорог. В этом



Рис. 1. Аппаратно-программный комплекс Vocord Traffic R
Fig. 1. Hardware and software complex Vocord Traffic R

случае Vocord Traffic R устанавливается на придорожную опору за рубежом контроля либо же размещается на специальной треноге, как в случае с Vocord Cyclops Portable. Один комплекс обеспечивает мониторинг и контроль минимум над четырьмя полосами движения в одном или двух направлениях и измеряет скорость движения ТС радарным или оптическим методом (рис. 2). Возможности комплекса позволяют контролировать и фиксировать мгновенную и среднюю скорость движения ТС. Имеется возможность посредством использования беспроводных каналов связи, таких как Wi-Fi, 3G/4G, GPRS, экспортировать необходимую базу данных, содержащую доказательную информацию с фиксацией геопозиции, времени, идентификационных параметров ТС.

Фиксация средней скорости (рис. 3) позволяет бороться с нарушителями, которые осведомлены о нахождении рубежа контроля скорости и снижающими скорость непосредственно перед ними. Для этого применяются программно-аппаратные комплексы Vocord Traffic A, которые устанавливаются на начальных и конечных участках зон контроля. Принцип данной системы основан на фиксации времени проезда ТС рубежа контроля в начале и в конце зоны и определения средней скорости движения. Данный метод контроля невозможно определить антирадарными устройствами, которыми оснащаются ТС, так как радарный способ определения скорости не используется. Минимальное расстояние между начальным и конечным участком рубежа контроля средней скорости составляет не

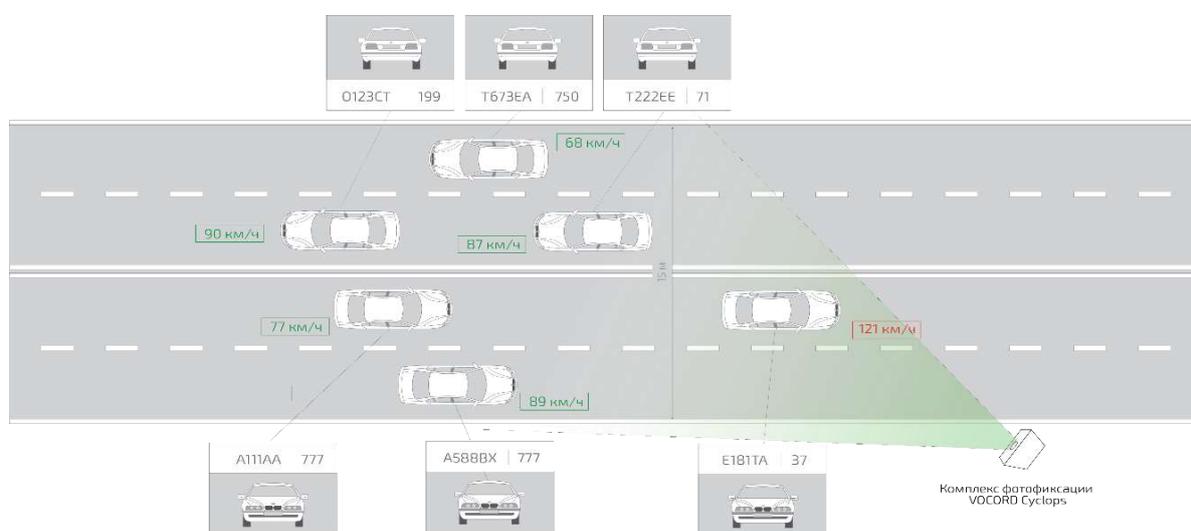


Рис. 2. Фиксация скорости движения транспортного средства радарным методом
Fig. 2. Determination of vehicle speed by the radar method

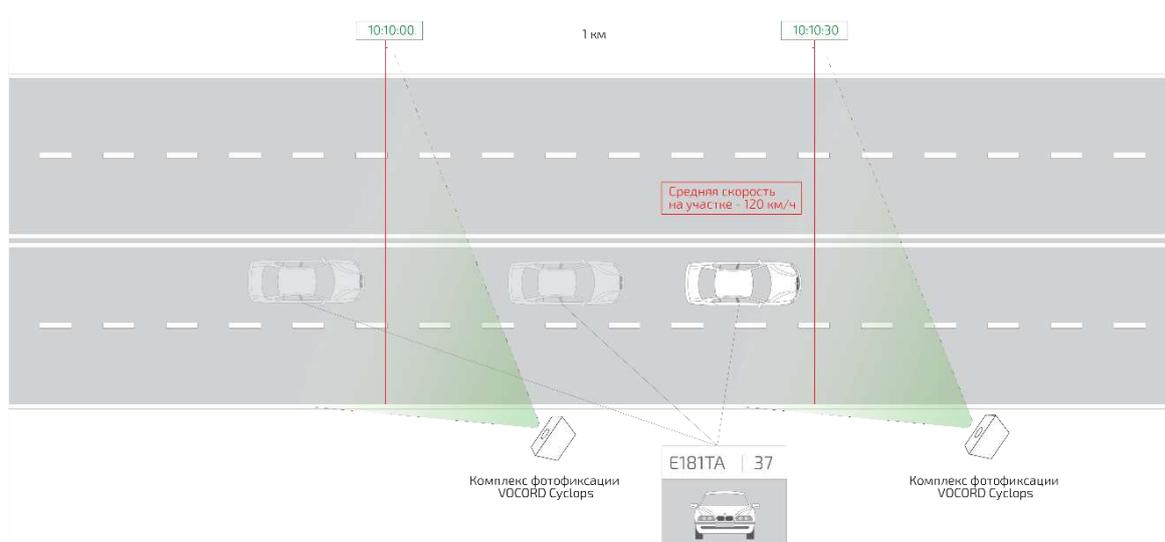


Рис. 3. Фиксация средней скорости движения транспортного средства оптическим методом
Fig. 3. Determination of the average speed of the vehicle by the optical method

менее 100 м, а максимальное не ограничено.

На перекрестках монтируется многополосный комплекс Vocord Traffic T (рис. 4), в состав которого входят камеры распознавания идентификационных параметров ТС и камеры наружного видеонаблюдения с возможностью ночного видения. Камеры для распознавания государственных регистрационных знаков (ГРЗ) ТС устанавливаются таким образом, чтобы они могли фиксировать передние ГРЗ ТС, а видеокамеры наружного наблюдения, чтобы фиксировать происходящую дорожно-транспортную обстановку на момент нарушения сигнала светофора, дорожных знаков, положения и траектории движения ТС. Также система Vocord Traffic имеет канал связи с системами управления светофоров, что позволяет определять нарушения выезда за стоп линию и проезда на красный сигнал светофора.

Система Vocord Traffic автоматически отправля-

ет накапливаемую информацию в центр автоматизированной фиксации административных правонарушений в области дорожного движения (ЦАФАП), используя при этом беспроводные технологии передачи данных. В случае обрыва связи с внешним сервером система работает в соответствии с ГОСТ Р 57144-2016 «Специальные технические средства, работающие в автоматическом режиме и имеющие функции фото- и киносъемки, видеозаписи, для обеспечения контроля за дорожным движением. Общие технические требования».

Представлена также схема детектирования нарушений по непредоставлению преимущества пешеходам водителями ТС комплексом Vocord Traffic T (рис. 5). Аппаратно-программный комплекс Vocord Traffic T устанавливается на пешеходных переходах для мониторинга различных видов нарушений ПДД [19]. Камеры для распознавания

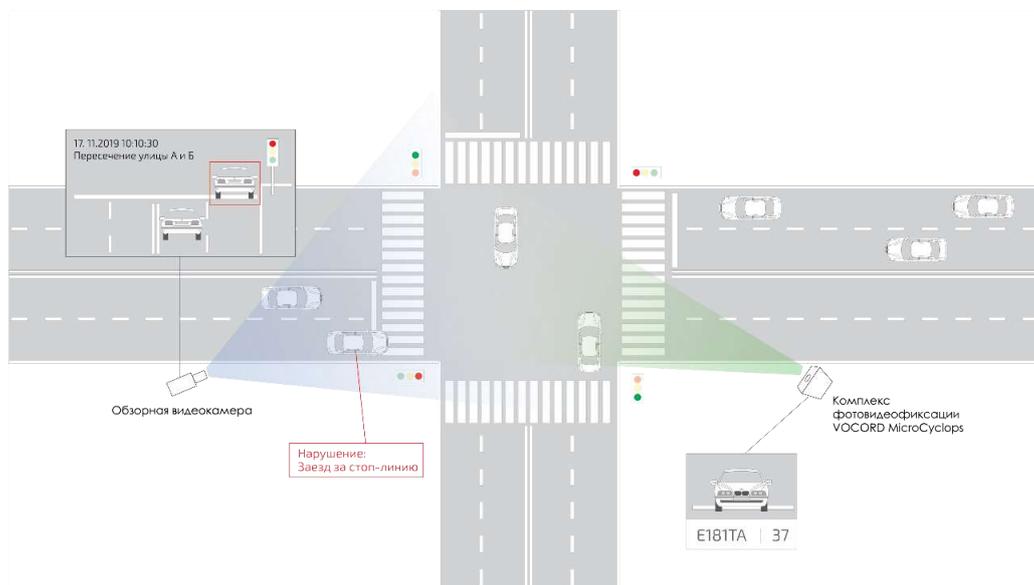


Рис. 4. Детектирования нарушений транспортных средств на перекрестках
Fig. 4. Identification of vehicle violations at intersections

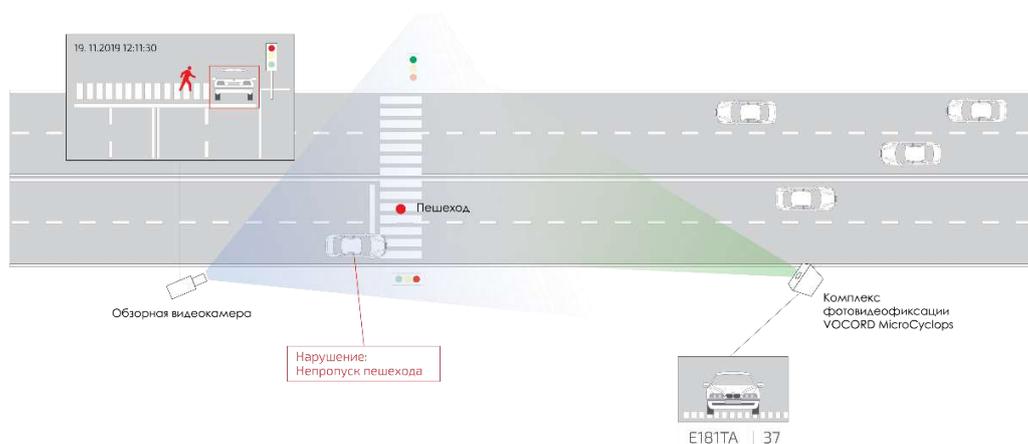


Рис. 5. Детектирования нарушений транспортных средств на пешеходных переходах
Fig. 5. Determination of vehicle violations at pedestrian crossings

ГРЗ и видеокамеры наружного наблюдения размещают на расстоянии не менее 5 м до пешеходного перехода.

Схема работы комплекса следующая: распознающая часть считывает передний ГРЗ ТС, видеокамера наружного наблюдения производит запись данных о сигнале светофора (в случае регулируемого перехода) и текущей обстановке в зоне контроля. Благодаря видеоаналитическим алгоритмам комплекс Vocord Traffic T детектирует такие нарушения ПДД, как непропуск пешехода, проезд через пешеходный переход на запрещающий сигнал светофора, остановка или стоянка на «зебре». Для обработки данных с комплексов используется коммутационный шкаф небольшого размера с встроенным сервером [19]. Данные о нарушениях экспортируются во внешние информационные системы (ЦАФАП, ЦОД и пр.). При обрыве связи с внешним сервером система автоматически архивирует данные без потери в соответствии с ГОСТ Р 57144-2016.

2. Измеритель скорости «Скат» (рис. 6) является многоцелевым автоматическим специальным техническим средством, отвечающим всем современным требованиям и стандартам. Совмещение технологий, основанных на различных физических принципах, позволяет получить высокую достоверность фотоматериалов. В зависимости от тактики применения измеритель скорости «Скат» может по-разному использоваться в составе многоцелевых комплексов автоматической фотофиксации нарушений. Данный комплекс позволяет осуществлять фиксацию следующих нарушений ПДД: превышение скорости ТС, движение по полосе общественного транспорта, движение по обочине, выезд на полосу встречного движения. К функциональным характеристикам камеры фиксации «Скат» относятся:

- повсеместный контроль с фотофиксацией всего транспорта;
- регистрационные знаки различных стран распознаются автоматически;
- возможность видеотрансляции контролируемой зоны в режиме реального времени;
- сбор статистики;
- мониторинг на расстоянии;
- FTP и MySQL серверы.
- информация выгружается на внешний носитель;
- встроен модуль охраны;
- классификация транспортных средств;
- наличие системы диагностики.

3. Аппаратно-программный комплекс «АвтоУраган-ВСМ» (рис. 7) предназначен для автоматического определения ГРЗ ТС и фиксации нарушений ПДД. В феврале 2017 г. компания «Корда Групп» выполнила работы по поставке и вводу в эксплуатацию комплекса «АвтоУраган-ВСМ» на дорогах г. Иркутска. Комплексы «АвтоУраган-ВСМ» установлены на пересечении ул. Ленина и ул. Дзержинского. Комплекс позволяет фиксировать большое количество видов нарушений ПДД: выезд за стоп-линию на запрещающий сигнал светофора; проезд на запрещающий сигнал светофора; нарушение правил проезда перекрестка при выполнении поворота; нарушение проезда ТС по встречной полосе движения. Кроме того, комплекс проводит регистрацию всего проходящего транспорта, проверку по подключенным базам данным розыска, судебных приставов и налогового управления.

АвтоУраган-ВСМ выполняет автоматическую видеофиксацию ТС, пересекающего стоп-линию после включения запрещающего сигнала светофора (рис. 8). Комплекс получает сигнал от светофорного

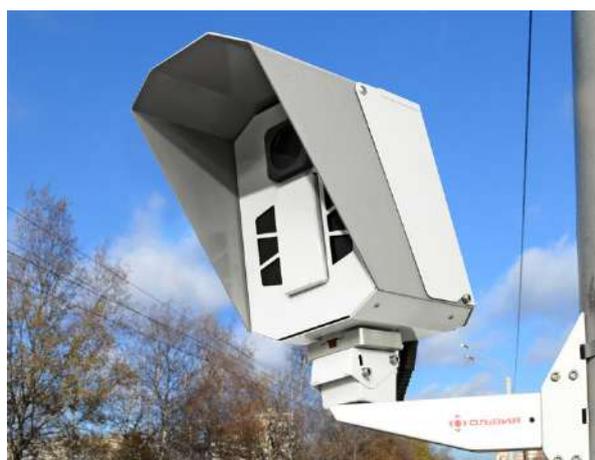


Рис. 6. Аппаратно-программный комплекс СКАТ

Fig. 6. Hardware and software complex SKAT

контроллера о том, что включен красный сигнал све-

тофора. Через заданное время задержки (например, 2 с), необходимое для обеспечения возможности завершения маневра в соответствии с ПДД, любой автомобиль пересекший зону контроля считается нарушителем. При выявлении нарушения комплекс производит видеосъемку со всех возможных ракурсов. При нарушении таких ПДД, как выезд на перекресток при запрещающем сигнале светофора, комплекс АвтоУраган-ВСМ делает фото ТС с увеличением его ГРЗ и общего плана с подтверждением, что ТС находилось в запрещенной для него зоне автодороги

во время запрещающего сигнала светофора.

Заключение

Постоянное использование средств автоматизированной фото- и видеofиксации административных правонарушений в области дорожного движения в рамках профилактики и обеспечения безопасности дорожного движения на наиболее аварийно-опасных участках дороги позволит влиять на уровень аварийности, а передислокация мест контроля скорости при небольшом количестве комплексов позволяет существенно повысить эффективность



Рис. 7. Аппаратно-программный комплекс АвтоУраган-ВСМ
Fig. 7. Hardware and software complex AutoUragan-VSM

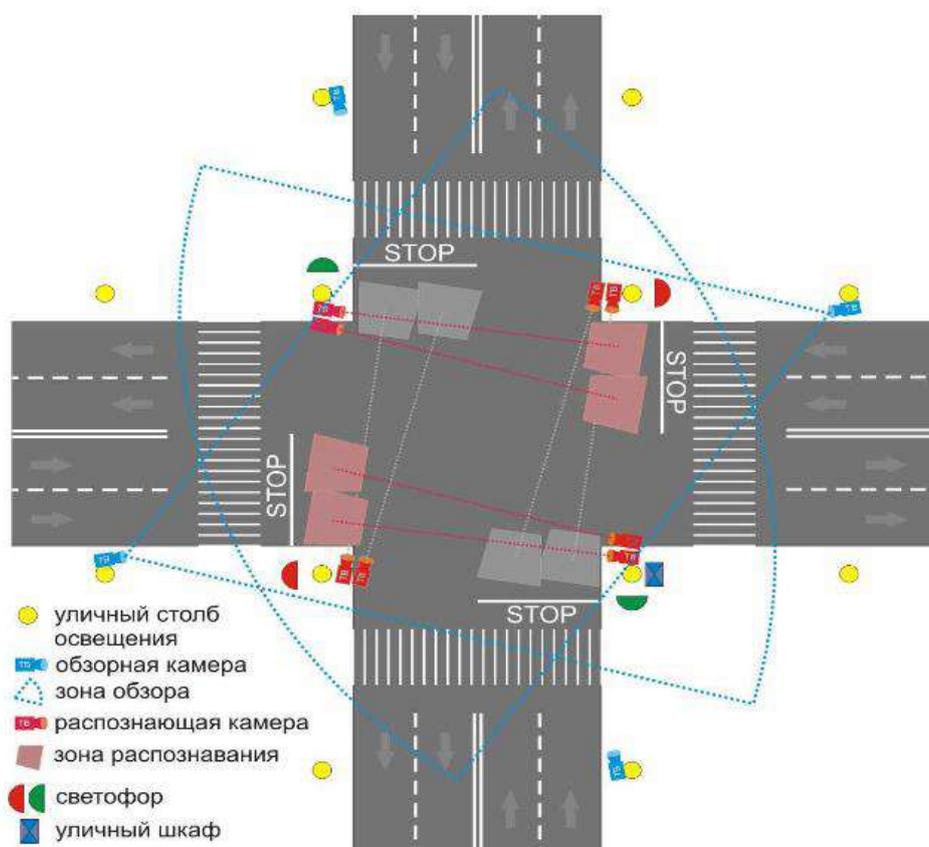


Рис. 8. Схема организации видеоконтроля с помощью аппаратно-программного комплекса АвтоУраган-ВСМ стандартного четырехполосного перекрестка
Fig. 8. The diagram of organization of video control at the standard four-lane crossing using hardware and software complex AutoUragan-VSM

профилактики ДТП и дисциплинирует водителей на различных участках дорог Иркутской области.

Также можно отметить недостаточный уровень использования технологий анализа «больших данных», накапливаемых средствами автоматической фото и видеофиксации, которые позволили бы более эффективно оптимизировать дорожно – транспортную сеть и повысить общую безопасность дорожного движения.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что применение средств автоматической фото- и видеофиксации правонарушений в сфере дорожного движения является оправданным и соответствует современным общественным реалиям. Однако необходимо дальнейшее совершенствование имеющихся специальных технических средств и организационно-правовых аспектов их использования.

Список литературы

1. Мархеева М.О. Эффективность применения специальных технических средств автоматической фото- и видеофиксации нарушений правил дорожного движения в Иркутской области // Актуальные вопросы транспортной безопасности. Иркутск, 2019. С. 65–67.
2. Кашталинский А.С., Петров В.В. Влияние дорожно-транспортных факторов на неравномерность транспортных потоков в городах // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2016. № 1 (108). С. 116–123.
3. Косолапов А.В. Прогнозирование транспортных заторов на перегоне улицы при использовании спутниковых навигационных систем // Вестн. Кузбас. гос. техн. ун-та. 2005. № 5 (50). С. 98–101.
4. Петров В.В., Кашталинский А.С. Исследование некоторых свойств транспортного потока // Ориентированные фундаментальные и прикладные исследования – основа модернизации и инновационного развития архитектурно-строительного и дорожно-транспортного комплексов России : материалы конференции. Омск, 2012. С. 4–8.
5. О безопасности дорожного движения : федер. закон по состоянию на 30 июля 2019 г. // СЗ РФ. 1995. № 50. Ст. 4873.
6. Об организации дорожного движения в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации : федер. закон по состоянию на 15 апр. 2019 г. // СЗ РФ. 2018. № 1. Ч. I. Ст. 27.
7. О правилах дорожного движения (вместе с «Основными положениями по допуску транспортных средств к эксплуатации и обязанности должностных лиц по обеспечению безопасности дорожного движения» : постановление Правительства РФ от 23 окт. 1993 г. № 1090 (ред. от 21 дек. 2019 г.) // Собр. актов Президента и Правительства РФ. 1993. № 47. Ст. 4531.
8. Об утверждении Концепции федеральной целевой программы «Повышение безопасности дорожного движения в 2013–2020 годах»: распоряжение Правительства РФ № 1995 от 27 окт. 2012 г. // Собрание законодательства Российской Федерации. 2012. № 45. Ст. 6282.
9. Полтавская Ю.О., Драгунов А.Ф., Ляпустин П.К. Повышение пропускной способности по улице Карла Маркса // Современные технологии и научно-технический прогресс. 2014. Т. 1. С. 43.
10. Полтавская Ю.О. Повышение пропускной способности и уровня обслуживания в транспортной теории // Современные технологии и научно-технический прогресс. 2019. Т. 1. С. 200–201.
11. Федотова А.С., Лебедева О.А. Степень использования пропускной способности автомобильных дорог // сб. науч. тр. Ангар. гос. техн. ун-та. 2015. Т. 1. № 1. С. 270–274.
12. Полтавская Ю.О. Надежность как показатель эффективного функционирования транспортной системы // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2018 : материалы междунар. науч.-практ. конф. 2018. С. 206–209.
13. Пугачев Н.И. Организация и безопасность дорожного движения : учеб. пособие. М. : Академия. 2009. 272 с.
14. Шарухнова Д.Н., Капусткин Н.А. Технические средства фото- и видеофиксации нарушений правил дорожного движения: история и перспективы развития // Обеспечение общественной безопасности и противодействие преступности: задачи, проблемы и перспективы. Краснодар. 2017. С. 348–355.
15. Количество автоматических камер на дорогах России за год выросло до 15 тысяч // Коммерсант. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/3843438> (дата обращения 03.01.2020).
16. Назаров В.Ю. Административно-правовое регулирование организации дорожного движения в городах : дис. ... канд. юрид. наук. М. 2007. 196 с.
17. Клопова Е. С., Седов Д.В. Актуальные проблемы применения средств фото- и видеофиксации нарушений правил дорожного движения // Актуальные вопросы транспортной безопасности : сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. Иркутск, 2017. С. 89–94.
18. Тихалева Е.Ю. Вопросы административной ответственности за правонарушения в области дорожного движения, зафиксированные средствами фото и видеофиксации // Вестник ВГУ. Сер. Право. 2017. № 3. С. 168–175.
19. Система VOCORD Traffic – распознавание автомобильных номеров и фиксация нарушений ПДД. URL: <https://www.vocord.ru/products/vocord-traffic/> (дата обращения: 01.10.2020).

References

1. Markheeva M.O. Effektivnost' primeneniya spetsial'nykh tekhnicheskikh sredstv avtomaticheskoi fotovideofiksatsii narushenii pravil dorozhnogo dvizheniya v Irkutskoi oblasti [Effectiveness of the use of special technical means of automatic photo and video recording of traffic violations in the Irkutsk region]. *Aktual'nye voprosy transportnoi bezopasnosti* [Current problems of transport safety]. Irkutsk, 2019. Pp. 65–67.

2. Kashtalinskii A.S., Petrov V.V. Vliyaniye dorozhno-transportnykh faktorov na neravnomernost' transportnykh potokov v gorodakh [The influence of road traffic factors on the unevenness of traffic flows in cities]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2016. No. 1 (108). Pp. 116–123.
3. Kosolapov A.V. Dinamicheskoe raspredeleniye transportnykh potokov na osnove tekhnologii intellektual'nykh transportnykh sistem [Dynamic distribution of traffic flows based on technologies of intelligent transport systems]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Kuzbass State Technical University], 2005. No. 2 (46). Pp. 136–138.
4. Petrov V.V., Kashtalinskii A.S. Issledovaniye nekotorykh svoystv transportnogo potoka [Investigation of some properties of the traffic flow]. *Orientirovannyye fundamental'nyye i prikladnyye issledovaniya – osnova modernizatsii i innovatsionnogo razvitiya arkhitekturno-stroitel'nogo i dorozhno-transportnogo kompleksov Rossii: Materialy konferentsii* [Oriented fundamental and applied research is the basis for modernization and innovative development of architectural and construction and road transport complexes in Russia: Conference proceedings], 2012. Pp. 4–8.
5. O bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya: feder. zakon ot 10 dek. 1995 g. No. 196-FZ (red. ot 30 iyulya 2019 g.) [Federal law of 10.12.1995 No. 196-FZ (ed. dated July 30, 2019) “On road safety”]. *SZ RF* [Collection of legislation of the Russian Federation], 1995. No. 50. P. 4873.
6. Ob organizatsii dorozhnogo dvizheniya v Rossiiskoi Federatsii i o vnesenii izmenenii v otdel'nyye zakonodatel'nyye akty Rossiiskoi Federatsii: feder. zakon ot 29 dek. 2017 g. No.443-FZ (red. ot 15 apr. 2019 g.) [Federal law No. 443-FZ of 29.12.2017 (ed. dated April 15, 2019) “On the organization of road traffic in the Russian Federation and on amendments to certain legislative acts of the Russian Federation”]. *SZ RF* [Collection of legislation of the Russian Federation], 2018. No. 1 (Part I). P. 27.
7. O pravilakh dorozhnogo dvizheniya (vmeste s «Osnovnymi polozheniyami po dopusku transportnykh sredstv k ekspluatatsii i obyazannosti dolzhnostnykh lits po obespecheniyu bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya»: postanovlenie Pravitel'stva RF ot 23 okt. 1993 g. No. 1090 (red. ot 21 dek. 2019 g.) [The order of the Government of the Russian Federation dated October 23, 1993 No. 1090 (as amended on December 21, 2019) “On the Rules of the road” (along with “Basic provisions for the admission of vehicles to operation and duties of officials to ensure road safety”)]. *Sobr. aktov Prezidenta i Pravitel'stva RF* [Coll. of memoranda of the President and the Government of the Russian Federation, November 22, 1993], No. 47. P. 4531.
8. Ob utverzhdenii Kontseptsii federal'noi tselevoi programmy «Povysheniye bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya v 2013–2020 godakh»: rasporyazheniye Pravitel'stva RF ot 27 okt. 2012 g. No. 1995 [The order of the government of the Russian Federation dated October 27, 2012 No. 1995-R “On approval of the Concept of the Federal target program” Improving road safety in 2013–2020”]. *SZ RF* [Collection of legislation of the Russian Federation], 2012. No. 45. P. 6282.
9. Poltavskaya Yu.O., Dragunov A.F., Lyapustin P.K. Povysheniye propusknoi sposobnosti po ulitse Karla Marksa [Increasing the capacity along Karl Marx Street]. *Sovremennyye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress* [Modern technology and technological advance], 2014. Vol. 1. P. 43.
10. Poltavskaya Yu.O. Povysheniye propusknoi sposobnosti i urovnya obsluzhivaniya v transportnoi teorii [Increasing capacity and service level in transport theory]. *Sovremennyye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress* [Modern technology and technological advance], 2019. Vol. 1. Pp. 200–201.
11. Fedotova A.S., Lebedeva O.A. Stepen' ispol'zovaniya propusknoi sposobnosti avtomobil'nykh dorog [The degree of use of the throughput capacity of highways]. *Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Scientific papers collection of Angarsk State Technical University], 2015. Vol. 1. No. 1. Pp. 270–274.
12. Poltavskaya Yu.O. Nadyozhnost' kak pokazatel' effektivnogo funktsionirovaniya transportnoi sistemy [Reliability as an indicator of the efficient functioning of the transport system]. *Transport Rossii: problemy i perspektivy – 2018: Materialy mezhdunarodnoi-nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Transport of Russia: problems and prospects – 2018: Materials of the international scientific and practical conference], 2018. Pp. 206–209.
13. Pugachev N.I. Organizatsiya i bezopasnost' dorozhnogo dvizheniya: uchebnoe posobie [Organization and safety of road traffic: a textbook]. Moscow: Akademiya Publ., 2009. P. 272.
14. Sharukhnova D.N., Kapustkin N.A. Tekhnicheskyye sredstva foto- i videofiksatsii narushenii pravil dorozhnogo dvizheniya: istoriya i perspektivy razvitiya [Technical means of photo and video recording of traffic violations: history and prospects of development]. *Obespecheniye obshchestvennoi bezopasnosti i protivodeistvie prestupnosti: zadachi, problemy i perspektivy* [Ensuring public safety and countering crime: problems, issues and prospects]. Krasnodar, 2017. Pp. 348–355.
15. Kolichestvo avtomaticheskikh kamer na dorogakh Rossii za god vyroslo do 15 tysyach [The number of automatic cameras on Russian roads has grown to 15 thousand in a year]. *Kommersant*. [Electronic media]. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/3843438> (Accessed: January 03, 2020).
16. Nazarov Y.V. Administrativno-pravovoe regulirovaniye organizatsii dorozhnogo dvizheniya v gorodakh: dis. kand. yurid. nauk [Administrative and legal regulation of the organization of traffic in towns: Ph.D. (Legal Science) diss.]. Moscow, 2007. P. 196.
17. Klopova E.S., Sedov D.V. Aktual'nyye problemy primeneniya sredstv foto- i videofiksatsii narushenii pravil dorozhnogo dvizheniya [Actual problems of using photo and video recording of traffic violations]. *Aktual'nyye voprosy transportnoi bezopasnosti* [Current issues of transport security]. Irkutsk, 2017. Pp. 89–94.
18. Mikhalyova E.Yu. Voprosy administrativnoi otvetstvennosti za pravonarusheniya v oblasti dorozhnogo dvizheniya, zafiksirovannyye sredstvami foto i videofiksatsii [Problems of administrative responsibility for offenses in the field of traffic recorded by means of photo and video]. *Vestnik VGU. Seriya Pravo* [Proceedings of Voronezh State University. Series: Law], 2017. No. 3. Pp. 168–175.
19. Sistema VOCORD Traffic – raspoznavaniye avtomobil'nykh nomerov i fiksatsiya narushenii PDD [VOCORD Traffic system – license plate recognition and registration of traffic violations] [Electronic media]. URL: <https://www.vocord.ru/products/vocord-traffic/> (Accessed: October 01, 2020).

Информация об авторах

Алейников Дмитрий Павлович – канд. техн. наук, доцент кафедры информационных технологий, Восточно-Сибирский институт МВД России, младший лейтенант полиции, г. Иркутск, e-mail: dmitriy-aleinikov@mail.ru

Зык Артемий Владимирович – преподаватель кафедры информационных технологий, Восточно-Сибирский институт МВД России, капитан полиции, г. Иркутск, e-mail: zav633@gmail.com

Information about the authors

Dmitrii P. Aleinikov – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Subdepartment of Information Technology, the East Siberian Institute of the Russian Federation Ministry of Internal Affairs, Irkutsk, e-mail: dmitriy-aleinikov@mail.ru

Artemii V. Zyk – Lecturer at the Subdepartment of Information Technology, the East Siberian Institute of the Russian Federation Ministry of Internal Affairs, Irkutsk, e-mail: zav633@gmail.com

DOI 10.26731/1813-9108.2021.2(70).84-92

УДК 621.31

Моделирование режимов электрических сетей, оснащенных устройствами распределенной продольной компенсации**В. П. Закарюкин¹✉, А. В. Крюков^{2,3}**¹ООО «Smart grid», г. Иркутск, Российская Федерация²Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация³Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ zakar49@mail.ru

Резюме

В настоящее время активно развивается технология управления режимами электроэнергетических систем, основанная на применении устройств распределенной продольной компенсации на воздушных линиях электропередачи. Основные преимущества таких устройств заключаются в следующем: возможность централизованного или автономного регулирования тока линии; высокая надежность благодаря тому, что выход из строя одного устройства не окажет заметного влияния на систему в целом; ослабленная реакция на типичные аварийные ситуации; простая замена вышедшего из строя устройства; быстрая процедура монтажа; минимизация кольцевых потоков мощности и снижение потерь; уменьшение капитальных затрат для повышения передаваемой мощности. Для практического внедрения устройств распределенной продольной компенсации требуется разработка компьютерных моделей, обеспечивающих адекватное моделирование режимов сложных электрических сетей, оснащенных распределенными устройствами продольной компенсации. Такие модели могут быть сформированы на базе методов определения режимов электроэнергетических систем в фазных координатах, разработанных в Иркутском государственном университете путей сообщения. В статье представлены результаты исследований, направленных на разработку компьютерных моделей устройств распределенной продольной компенсации, предназначенных для расчетов электроэнергетических систем в фазных координатах. Результаты исследований показали, что разработанные модели обеспечивают адекватное моделирование режимов электрических сетей, оснащенных распределенными устройствами продольной компенсации. Модели этих устройств реализованы на базе мультифазного представления элементов электроэнергетических систем и могут применяться для решения следующих задач: определение нормальных, аварийных и неполнофазных режимов электроэнергетических систем, оснащенных устройствами распределенной продольной компенсации, а также расчет электромагнитных полей, создаваемых линиями электропередачи, на которых установлены данные устройства.

Ключевые слова

устройства распределенной продольной компенсации, режимы электрических сетей, моделирование, воздушная линия электропередачи

Для цитирования

Закарюкин В. П. Моделирование режимов электрических сетей, оснащенных устройствами распределенной продольной компенсации / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 2 (70). – С. 84–92. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).84-92

Информация о статье

поступила в редакцию: 22.02.2021, поступила после рецензирования: 05.03.2021, принята к публикации: 15.03.2021

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 0667-2020-0039)

Simulating the modes of electrical networks equipped with a distributed static series compensator system

V. P. Zakaryukin¹✉, A. V. Kryukov^{2,3}

¹ OOO “Smart grid”, Irkutsk, the Russian Federation

² Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

³ Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ zakar49@mail.ru

Abstract

Currently, the technology of controlling the modes of electric power systems, based on the application of the distributed static series compensators (DSSC) on overhead power transmission lines, is actively developing. The main advantages of distributed static series compensators are as follows: the possibility of centralized or autonomous regulation of the line current; high reliability due to the fact that the failure of one device will not have a noticeable impact on the system as a whole; weakened response to typical emergency situations; simple replacement of a failed device; fast installation procedure; minimization of ring power flows and reduction of losses; reduced capital costs to increase power flows. To implement distributed static series compensators into practical use, it is required to develop computer models that provide adequate simulation of the modes of complex electrical networks equipped with distributed static series compensators. Such models can be formed on the basis of methods of determining the modes of electric power systems in phase coordinates, developed at the Irkutsk State Transport University. The article presents the results of research intended to develop computer models of distributed static series compensators designed to calculate the modes of complex electrical networks in phase coordinates. The results of the research have shown that the developed models provide adequate simulation of the modes of electrical networks equipped with distributed static series compensators. Models of distributed static series compensators are implemented on the basis of multiphase representation of elements of electric power systems (EPS) and can be used to solve the following problems: determination of normal, emergency and open-phase modes of electric power systems equipped with distributed static series compensators; calculation of electromagnetic fields generated by power lines on which the distributed static series compensators are installed.

Keywords

distributed static series compensators, modes of electrical networks, simulation, overhead power transmission line

For citation

Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. Modelirovanie rezhimov elektricheskikh setei, osnashchyonnykh ustroystvami raspredelyonnoi prodol'noi kompensatsii [Simulating the modes of electrical networks equipped with a distributed static series compensator system]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 2 (70), pp. 84–92. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).84-92

Article info

Received: 22.02.2021, Revised: 05.03.2021, Accepted: 15.03.2021

Acknowledgements

The study was carried out with the financial support of a grant from the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 0667-2020-0039)

Введение

Для управления режимами электрических сетей разрабатываются новые типы оборудования на базе силовой электроники. К ним относятся устройства распределенной продольной компенсации (УРПК) или распределенные статические компенсаторы последовательного типа (distributed static series compensator, DSSC) [1, 2]. Эти устройства (рис. 1) позиционируются как эффективная альтернатива локальным средствам продольной компенсации большой мощности. Тем не менее, параллельно проводятся исследования возможностей применения и локального оборудования [3, 4]. Классические устройства продольной компенсации (УПК) имеют мощности в диапазоне 10–300 МВ·А и применяются в сетях напряжением 110–500 кВ [2]. В целом элементы последовательного типа имеют большие перспекти-

вы и применимы для регулирования потоков мощности в линиях [2–8].

Интерес к устройствам DSSC возник довольно давно [9, 10], в частности в связи с исследованиями возможности передачи электроэнергии по однофазной линии [11, 12]. В условиях происходящего в настоящее время перехода к масштабной цифровизации электроэнергетики для практического внедрения УРПК требуется разработка компьютерных моделей, обеспечивающих адекватное моделирование режимов электрических сетей, оснащенных малогабаритными УПК. Известен ряд исследований в направлении моделирования систем с DSSC [11–17], выполненных, в частности, на базе комплексов PSCAD / EMTDC и MatLab / Simulink. Однако эти модели ограничивались рамками отдельных устройств или линиями с набором DSSC. Вместе с

тем для анализа взаимодействия электрических систем с линиями электропередачи (ЛЭП), оснащенных DSSC, необходимы комплексные модели электрических систем в целом. Такие модели могут быть сформированы на базе методов определения режимов электроэнергетических систем, разработанных в ИрГУПС [18, 19]. В основу этой технологии моделирования, реализованной в программном комплексе (ПК) Fazonord, положен подход, базирующийся на пофазном представлении элементов электроэнергетических систем (ЭЭС).

Структура и характеристики устройства распределенной продольной компенсации

Как отмечено в статье [5], УРПК формируется модулями мощностью $10 \text{ кВ}\cdot\text{А}$, размещаемыми на проводах воздушной линии. В работе [2] указывается, что мощность устройства может лежать в пределах $1\text{--}20 \text{ кВ}\cdot\text{А}$. Каждый модуль (рис. 1) имеет в своем составе трансформатор, первичной обмоткой которого является провод линии, полупроводниковый преобразователь с индуктивно-емкостным накопителем, систему управления и модуль связи для дистанционного управления.

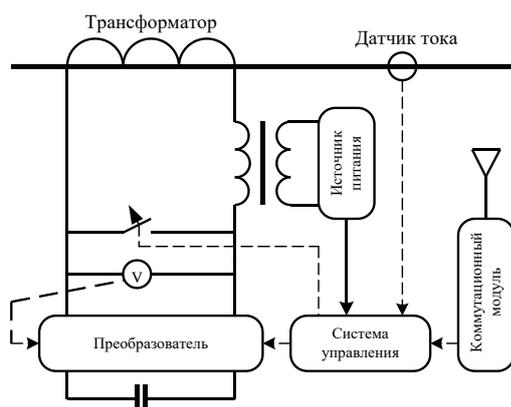


Рис. 1. Схема малогабаритного устройства продольной компенсации

Fig. 1. The schematic of a compact distributed static series compensator

С помощью совокупности таких модулей можно увеличивать импеданс ЛЭП для снижения тока при наличии параллельной цепи или уменьшать этот параметр для увеличения токовой нагрузки. Каждый модуль способен инжектировать в провод линии 13 В напряжения при токе 750 А , т. е. обеспечивать добавку индуктивного или емкостного сопротивления величиной 17 МОм [5]. Схожие параметры имеет устройство, разрабатываемое Энергетическим институтом имени Г.М. Кржижиновского совместно с Научно-техническим центром федеральной сетевой компании единой энергетической системы: значение добавляемого сопротивления может быть выбрано из двух величин $7,85$ и $15,7 \text{ МОм}$ при токах до 750 А [1].

Параметры одновиткового трансформатора в публикациях не приведены, но из статьи [2] следует, что коэффициент трансформации равен $1:20$ или менее. В этой же статье приведено примерное значение $1:75$ при 500 В вторичной обмотки трансформатора и 7 В первичной, что для тока 1500 А дает $10 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ мощности и обеспечивает сравнительно небольшие вторичные токи даже при аварийных ситуациях. УРПК должно инжектировать в линию две составляющие напряжения: одно из них является реактивным по отношению к току, второе – сфазировано с ним для компенсации активных потерь инвертора.

Максимальные значения вводимого импеданса могут достигать до $10\text{--}20\%$ импеданса линии при номинальных токах [2]. Это означает необходимость введения до $0,04\text{--}0,08 \text{ Ом}$ на 1 км провода, т. е. с учетом каждого фазного провода, $15\text{--}30$ устройств на 1 км , или $3\text{--}6$ устройств на пролет между опорами.

В работе [7] рассмотрен аспект сенсорного анализа для решения задачи оптимального размещения и управления устройствами УРПК и предпринята попытка аппроксимации задачи в линейной постановке, при которой воздействие устройств представлено в форме небольших возмущений реактансов линий в уравнениях баланса мощностей. Представленная методика позволяет определить необходимые инъекции реактансов для достижения требуемого эффекта в ЭЭС в целом.

В этой же работе указано на три возможных эффекта применения УРПК: снижение тока линии, корректировка напряжений шин и снижение реактивной генерации источников электроэнергии. Надо заметить, что перечисленные возможности достаточно проблематичны ввиду малости импеданса линии по сравнению с сопротивлением нагрузки, а приведенные в [6] иллюстрации не учитывают активного сопротивления линии и ее емкостной генерации. Там же, со ссылкой на [7], отмечено, что стоимость УРПК составляет 100 долл. на $1 \text{ кВ}\cdot\text{А}$, в то время как стоимость строительства новой ЛЭП оценивается в 1000 долл. на одну мегаватт-милю. В статье [8] отмечен фактор снижения потерь в линиях.

Основные преимущества УРПК заключаются в следующем:

- возможность централизованного или автономного регулирования тока линии;
- осуществление оперативного контроля температуры проводов и автоматического ограничения тока в зависимости от температуры;
- высокая надежность благодаря тому, что выход из строя одного устройства не окажет заметного влияния на систему в целом;
- ослабленная реакция на типичные аварийные ситуации;
- простая замена вышедшего из строя устройства и быстрая процедура монтажа;

- возможность минимизации кольцевых потоков мощности и снижения потерь;
- снижение капитальных затрат для увеличения потоков мощности [2].

Технико-экономические характеристики устройства распределенной продольной компенсации

Пример расчета режима с устройствами УРПК в сопоставлении с локальными УПК приведен в работе [2], где рассмотрены линии трех напряжений: 138, 345 и 765 кВ, а оценочные расчеты выполнены для линии 138 кВ.

Предельный ток рассмотренной линии принят равным 770 А при реактансе 0,79 Ом/миля = 0,49 Ом/км, падение напряжения при номинальном токе равно 608 В/миля = 378 В/км. Если для компенсации принять 1 % от этой величины, т. е. 6,1 В/миля, то это приводит с учетом трех проводов линии к мощности УРПК 14 кВА/миля = 8,7 кВ·А/км. При мощности единичного устройства 10 кВ·А требуется 0,87 устройства на 1 км. Для варьирования импеданса линии в пределах $\pm 20\%$ требуется 280 кВ·А мощности или 28 устройств на одну милю, т. е. примерно 9 устройств на каждый провод трехфазной линии на одну милю или 5,8 единиц на 1 км. При этом расстояние между соседними устройствами составит 172 м.

Далее приведены схемы сети, использованные в примере статьи [2] (рис. 2) при длинах линий 20 и 30 миль (32,2 и 48,3 км). Для указанных на этом рисунке соотношений активных и реактивных сопротивлений подходит линия с проводами АС-400, но длины для получения нужных сопротивлений требуются увеличить: необходимо 41,2 км и 61,8 км. В этой ситуации при пределах компенсации $\pm 20\%$ необходима инъекция сопротивления $\pm j3,2$ Ом для первой линии и $\pm j4,8$ Ом для второй, т. е. $\pm j78$ мОм/км. Если единичное УРПК обеспечивает пределы регулирования $\pm j15$ мОм, то необходимо 5 единиц на 1 км при расстоянии примерно 200 м между единичными УРПК. Очевидно, что при централизованном управлении системой устройств нет необходимости в плавной регулировке, достаточно обеспечить крайние и нулевые значения; с большой точностью регулирование будет обеспечено включением нужного числа устройств. При номинальном токе линии 750 А мощность единичного устройства составит 8,5 кВ·А. Общее количество таких устройств равно 640 для первой линии и 960 для второй с учетом трех фазных проводов.

Как указано в статье [2], при среднегодовом росте передаваемой по 30-мильной линии мощности в 2,5 % через 30 лет ток достигнет максимально допустимого по термической стойкости. Для управления потоком мощности по линии потребуется 19 МВ·А

мощности локального устройства, которое должно быть установлено в начале первого года рассматриваемого периода, или можно будет устанавливать по 0,64 МВ·А мощности УРПК ежегодно в течение 30 лет. В конце периода по линии будет передаваться примерно вдвое больше мощности, чем в начале (около 170 МВт против 81 МВт). Приведены данные из [2] по стоимости оснащения линии (табл. 1).

Таблица 1. Сопоставление стоимости локального устройства и устройств распределенной продольной компенсации, млн. долл.

Table 1. The comparison of the cost of a local device and distributed static series compensators, doll. mln

Показатель	Локальное	Распределенное
Стоимость оборудования с учетом дисконтирования	4,17	1,91
Стоимость энергии через 30 лет	2,69	1,46
Суммарная стоимость мероприятия	6,86	3,37

В этой таблице заложена первоначальная стоимость 100 долл./кВ·А, шестипроцентный ежегодный рост стоимости капитала, номинальные потери энергии 2,5 % и стоимость электроэнергии 25 долл./МВт·ч. Капитальные затраты на современные УПК составляют 120–150 долл./кВ·А, а ожидаемые капитальные затраты УРПК ниже 100 долл./кВ·А. Преимущества УРПК очевидны. Кроме того, вложение средств на монтаж УРПК может быть остановлено на любой стадии при меньших темпах роста энергопотребления.

Методика и результаты моделирования

Моделирование режимов схем (рис. 2) проведено на основе пофазного подхода, реализованного в ПК Fazonord [9], использующим решетчатые схемы замещения (РСЗ) с полносвязной топологией.

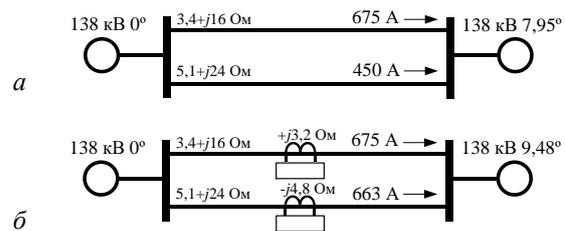


Рис. 2. Схемы сети без устройства распределенной продольной компенсации (а) и с устройством (б)
Fig. 2. Schematics of a network without a compact distributed static series compensator (a) and with a compact distributed static series compensator (b)

Для каждой из ЛЭП, входящих в состав моделируемой сети, матрица проводимостей РСЗ может быть получена из следующего соотношения:

$$\underline{\mathbf{Y}}_k = -\mathbf{M}_k \underline{\mathbf{Z}}_k^{-1} \mathbf{M}_k^T + j\omega \mathbf{C}_k,$$

где $\underline{\mathbf{Z}}_k$ – симметричная матрица сопротивлений с размерностью $r \times r$; $j = \sqrt{-1}$; $\omega = 314$ рад/с; $\mathbf{M}_k = [\mathbf{E}_r \quad -\mathbf{E}_r]^T$; \mathbf{E}_r – вектор-строка размерностью r , составленная из единиц; \mathbf{C}_k – матрица емкостных проводимостей.

Последняя определяется как

$$\mathbf{C}_k = 0,5 \begin{bmatrix} \mathbf{B}_k & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{B}_k \end{bmatrix},$$

где $\mathbf{B}_k = \mathbf{A}^{-1}$; \mathbf{A} – матрица потенциальных коэффициентов.

Матрица проводимостей РСЗ для силовых трансформаторов определяется следующим образом:

$$\underline{\mathbf{Y}}_k = -\mathbf{M}_k \underline{\mathbf{Z}}_k^{-1} \mathbf{M}_k^T;$$

$$\underline{\mathbf{Z}}_k = \underline{\mathbf{Z}}_T - j\omega \mathbf{W}_1 \mathbf{R}_M^{-1} \mathbf{W}_2,$$

где $\underline{\mathbf{Z}}_T$ – матрица электрических сопротивлений обмоток трансформатора; \mathbf{R}_M – матрица магнитных сопротивлений; $\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2$ – матрицы, составленные из чисел витков обмоток трансформатора.

Результирующая матрица проводимостей сети $\underline{\mathbf{Y}}_\Sigma$ формируется следующими преобразованиями:

$$\underline{\mathbf{Y}}_\Sigma = \mathbf{M}_\Sigma \underline{\mathbf{Y}}_V \mathbf{M}_\Sigma^T,$$

где $\underline{\mathbf{Y}}_V = \text{diag } \underline{\mathbf{Y}}_k$; \mathbf{M}_Σ – обобщенная матрица инцидентий блочного типа.

Система нелинейных уравнений установившегося режима записывается так:

$$\underline{\mathbf{Y}}_\Sigma^* \dot{\mathbf{U}} = \text{diag } \frac{\tilde{S}_i}{\dot{U}_i} - \underline{\mathbf{Y}}_B \dot{\mathbf{U}}_B, \quad (1)$$

где $\dot{\mathbf{U}}_B$ – вектор напряжений балансирующих узлов; $\underline{\mathbf{Y}}_B$ – блок матрицы $\underline{\mathbf{Y}}_\Sigma$, соответствующий ветвям сети, связанным с балансирующими узлами; $\underline{\mathbf{Y}}_\Sigma^*$ –

матрица $\underline{\mathbf{Y}}_\Sigma$, в которой убраны строки и столбцы, отвечающие балансирующим узлам.

После разделения вещественных и мнимых составляющих система (1) может быть представлена в следующем виде:

$$\mathbf{F}(\mathbf{U}, \varphi) = \mathbf{0}, \quad (2)$$

где \mathbf{U} – вектор модулей узловых напряжений; φ – вектор фаз.

Решение нелинейной системы (2) может осуществляться итерационными методами Ньютона или Гаусса. Подробное описание алгоритмов формирования и решения уравнений (2) приведено в работе [9].

Процедура моделирования сетей, схемы которых показаны (см. рис. 2), включала пять этапов:

1. Подбор линии с параметрами, удовлетворяющими представленным (см. рис. 2) сопротивлениям.

2. Подготовка модели трансформатора с параметрами, соответствующими выдаче на зажимах первичной обмотки индуктивного или емкостного реактанса $\pm j30$ мОм при присоединении к вторичной обмотке модели соответствующего реактивного элемента. Значение 30 мОм выбрано исходя из возможного максимального значения инжектируемого реактанса, а также по соображению получения приемлемой расчетной схемы при развертывании модели с набором УРПК. Ввиду конструктивной близости одновиткового трансформатора к трансформатору тока (ТТ) на расчетной схеме этот элемент показан как ТТ.

3. Составление расчетных схем с моделями ЛЭП и RL-элементами, отвечающими схеме УРПК.

4. Подготовка расчетной схемы, отвечающей совокупности распределенных устройств компенсации.

5. Проведение расчетов режимов в фазных координатах для ситуаций, представленных в работе [2].

Модели в фазных координатах представлены (рис. 3). Они использовались для подбора проводов линии и ее длины. На схеме показаны три источника

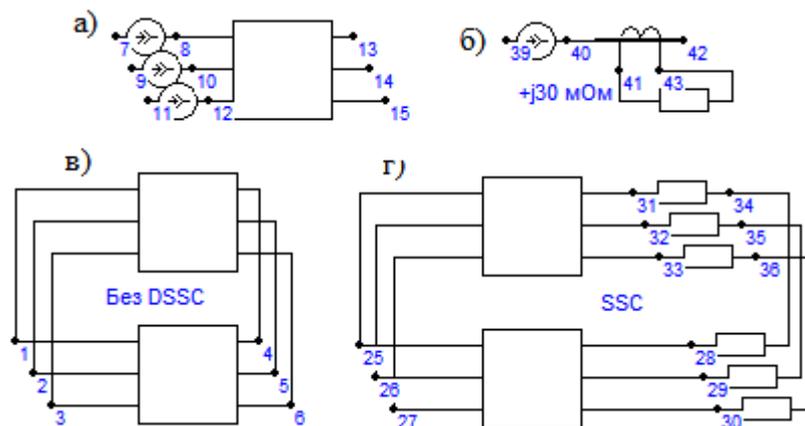


Рис. 3. Модели схемы в программном комплексе Fazonord
Fig. 3. Circuit models in the Fazonord software package

с симметричной системой токов по 1 000 А, при которой напряжение узлов 8, 10, 12 численно равно сопротивлению фазы ЛЭП. Схема (см. рис. 2, б) использована для подбора параметров трансформатора и его нагрузки по критерию обеспечения нужного реактанса. Напряжение узла 40 при токе источника 1 000 А численно равно вносимому комплексному сопротивлению, которое в модели получалось чисто реактивным. Узлы 13–15 и 42 заземлялись шунтами большой проводимости.

Все модели линий (см. рис. 3) для устранения эффектов несимметрии за счет ЛЭП выполнены для ситуации полного шага транспозиции проводов. Как указано выше, в качестве линий, близких по параметрам к данным (см. рис. 1), выбраны две линии с проводами АС-400 с длинами 41,2 и 61,8 км. Параметры одновиткового трансформатора с нагрузкой его вторичной обмотки выбраны так, чтобы обеспечивать вносимый импеданс $\pm j30$ мОм.

В модели (см. рис. 3, в) отображается простейшая схема без УРПК и представлена схема с локальными устройствами (см. рис. 3, г), моделируемыми RL-элементами с параметрами (см. рис. 2). Узлы 1–6, 25–27, 34–36 объявлены балансирующими с симметричными напряжениями 79,7 кВ, с нулевыми углами узлов 1 и 25 и с углом $7,95^\circ$ узла 4 и $9,48^\circ$ узла 34. Результаты расчетов токов ЛЭП при таких условиях приведены (табл. 2), (рис. 4).

Как видно (см. табл. 2), использование модели

полностью транспонированной ЛЭП обеспечило практически симметричный режим системы. Некоторые расхождения с данными работы [2] связаны с учетом в ПК Fazonord собственных и взаимных емкостей проводов.

Расчетная схема с набором УРПК содержит 207 элементов ЛЭП, 625 моделей трансформаторов. Всего в схеме 2 507 узлов. Фрагмент схемы показан (рис. 5).

Верхняя ЛЭП (см. рис. 2) включала 103 элемента линий без транспозиции проводов длинами по 0,4 км и 309 трансформаторных моделей, воспроизводящих по $+j30$ мОм реактанса. Нижняя ЛЭП представлена 104 элементами линий, причем первый (левый) элемент (см. рис. 1) моделирует линию длиной 20,6 км с вносимым реактансом $-j1,55$ Ом, остальные элементы ЛЭП имеют длину по 0,4 км и вносят реактанс $-j30$ мОм. Балансирующие узлы представлены так же, как на (рис. 3). Такая конструкция позволяет обойтись сравнительно небольшим числом элементов, давая возможность получить распределение потенциалов вдоль ЛЭП и оценить вносимую линией несимметрию токов. Результаты расчета режима сведены (табл. 3).

Демонстрируются сравнительно небольшие различия средних результатов по фазным проводам от данных [2], но с разбросом токов по отдельным фазам (см. табл. 3).

В отличие от локальных моделей [2] представлен-

Таблица 2. Сопоставление токов линий и расчетов по модели в фазных координатах, А

Table 2. The comparison of line currents and phase-coordinate model calculations, A

Схема	Линия электропередачи	Провод фазы				Источник [2]	Различие, %
		А	В	С	Среднее		
Рис. 3, в	Верхняя	634,6	634,6	634,2	634,5	675	-6,0
	Нижняя	422,4	421,7	422,4	422,2	450	-6,2
Рис. 3, г	Верхняя	640,5	640,5	640,2	640,4	675	-5,1
	Нижняя	614,1	613,3	614,0	613,8	663	-7,4

Составлено по [2].

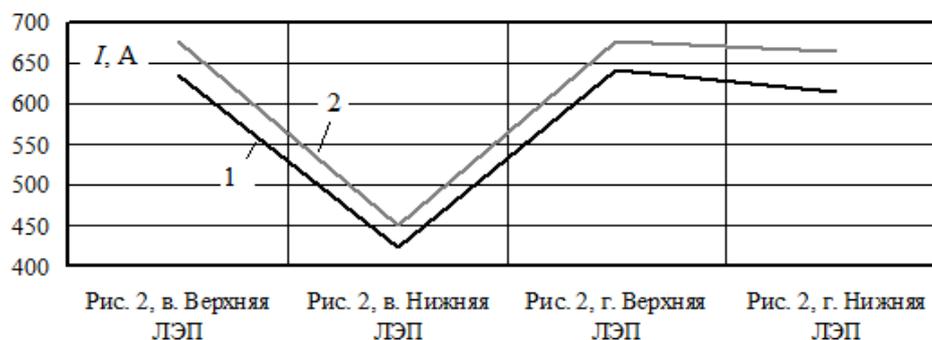


Рис. 4. Токи линии электропередачи:

1 – средние значения из трех фаз, полученные в программном комплексе Fazonord; 2 – токи по данным источника [2]

Fig. 4. Electric power transmission line currents: 1 – average values out of three phases obtained in the Fazonord software complex; 2 – currents according to data of the reference [2]

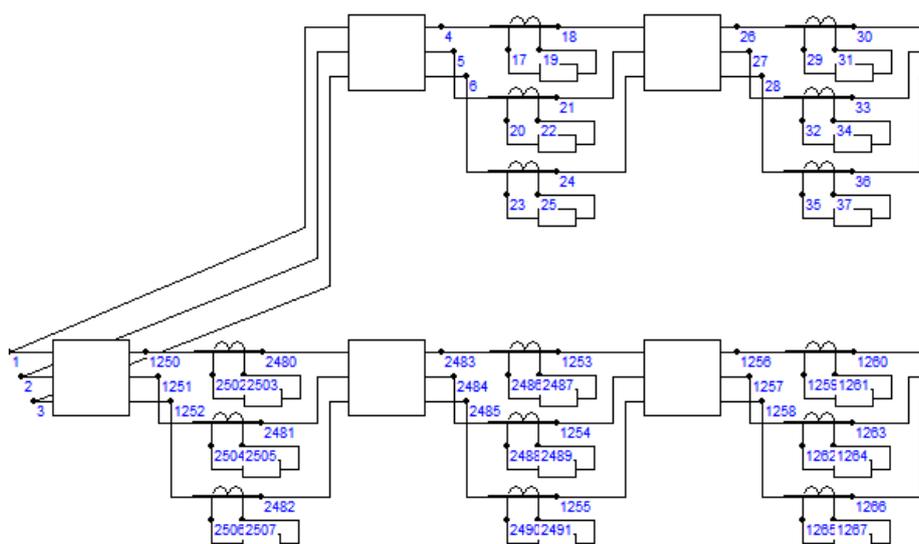


Рис. 5. Фрагмент схемы с устройством распределенной продольной компенсации
Fig. 5. A fragment of the schematic with a distributed static series compensator

Таблица 3. Сопоставление токов линий по источнику [2] и на модели (см. рис. 3) в фазных координатах, А

Table 3. The comparison of the line currents according to the reference [2] and on the model (see Fig. 3) in phase coordinates, A

Линия электропередачи	Провод фазы				Источник [2]	Различие, %
	A	B	C	Среднее		
Верхняя	668,2	683,3	672,0	674,5	675	-0,1
Нижняя	618,6	639,5	625,3	627,8	663	-5,6

ная технология моделирования может использоваться для расчетов режимов ЭЭС сложной структуры.

Заключение

Разработанные модели обеспечивают адекватное моделирование режимов электрических сетей, оснащенных УРПК.

Модели УРПК (DSSC) реализованы на базе пофазного представления элементов ЭЭС и могут применяться для решения следующих задач:

- определение нормальных, аварийных и неполнофазных режимов ЭЭС, оснащенных УРПК;
- расчет электромагнитных полей, создаваемых линиями электропередачи [10], на которых установлены УРПК.

Список литературы

1. Малогабаритные устройства продольной компенсации для воздушных линий электропередачи / Д.И. Панфилов, Ю.Г. Шакарян, М.Г. Асташев и др. // Электротехника. 2017. № 7. С. 78–82.
2. Divan D. A Distributed Static Series Compensator System for Realizing Active Power Flow Control on Existing Power Lines / D. Divan, W. Brumsickle, R. Schneider and others // IEEE transactions on power delivery. 2007. Vol. 22. № 1. P. 642–649.
3. Чаплыгин Е.Е., Асташев М.Г., Расули К.В. Применение активных источников реактивной мощности для перераспределения потоков энергии в электрических сетях // Электротехника. 2013. № 12. С. 19–25.
4. Чаплыгин Е.Е., Асташев М.Г., Расули К.В. Исследование режимов работы и характеристик последовательных источников реактивной мощности // Электротехника. 2016. № 11. С. 66–71.
5. Kreikebaum F., Imaiyavaramban M., Divan D. Active Smart Wires: An Inverter-less Static Series Compensator // Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). 2010. DOI: 10.1109/ECCE.2010.5618305.
6. Brissette A. M. Performance Analysis and Design of Distributed Static Series Compensators for Transmission Line Reactance Control. A thesis submitted to the Faculty of the Graduate School of the University of Colorado for the degree of Doctor of Philosophy. Department of Electrical, Computer, and Energy Engineering. 2014. 131 p.
7. Das D., Kreikebaum F., Divan D., Lambert F. Reducing Transmission Investment to Meet Renewable Portfolio Standards Using Smart Wires // IEEE 2010 Transmission and Distribution Conference and Exposition. New Orleans, 2020. P. 1–7. DOI: 10.1109/TDC.2010.5484217.
8. Rogers K.M., Overbye T. J. Some Applications of Distributed Flexible AC Transmission System (D-FACTS) Devices in

Power Systems. DOI: 10.1109/NAPS.2008.5307314. IEEE Xplore. 9 p.

9. Using Distribution Static Compensators (D-STATCOMs) to Extend the Capability of Voltage-Limited Distribution Feeders / S.M. Ramsay, P.E. Cronin, R.J. Nelson et al. In 40th Annual Conference on Rural Electric Power, 1996. DOI: 10.1109/repcn.1996.495235.

10. Mayer J., Hossein-Zadeh N., Wolfs P. Investigation of Voltage Quality and Distribution Capacity Issues on Long Rural Three Phase Distribution Lines Supplying SWER Systems. Presented at the Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC, 2005. URL: <http://hdl.handle.net/20.500.11937/30837>.

11. Mayer J., Hosseinzadeh N., Wolfs P. Modelling of Voltage Regulation Issues in SWER Systems Using PSCAD/EMTDC. Presented at the Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC, Melbourne, Australia, 2006. URL: <http://hdl.handle.net/20.500.11937/19719>.

12. Jarrett R., Oo A.M.T., Harvey B. An Investigation Into the Use of Four Quadrant Inverter Devices for Voltage and Var Support on SWER Systems. In 22nd Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC. 2012. P. 1–7.

13. Poriya Fajri, Saeed Afsharnia. A PSCAD / EMTDC Model for Distributed Static Series Compensator (DSSC) // IEEE Second International Conference on Electrical Engineering. Lahore, 2008.

14. Kumbhare P.P., Nimje A.A., Sawarkar P.R. Application of Distributed Static Series Compensator for Improvement of Power System Stability // Silicon Photonics & High Performance Computing. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2018. Vol. 718. Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-10-7656-5_4.

15. Khalilian M., Mokhtari M., Khazaie J., Nazarpour D., Farsadi M. Distributed Static Series Compensator (DSSC) for Power Flow Control and Inter-Area Oscillations Damping Studies // ELECO 2011 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, 1–4 December, Bursa, TURKEY. P. 85–90.

16. Taher S.A., Afsari S.A. Optimal Location and Sizing of DSTATCOM in Distribution Systems by Immune Algorithm // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2014. Vol. 60. P. 34–44.

17. Modeling, Simulation and Group Control of Distributed Static Series Compensators / Poria Fajri, Saeed Afsharnia, Dar-yoush Nazarpour et al. // American J. of Engineering and Applied Sciences. 2008. № 1 (4). P. 347–357.

18. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск : Изд-во Иркут. ун-та, 2005. 273 с.

19. Бужакова Н.В., Закарюкин В.П., Крюков А.В. Электромагнитная безопасность в системах электроснабжения железных дорог: моделирование и управление. Ангарск : АНГТУ, 2018. 382 с.

References

1. Panfilov D.I., Shakaryan Yu.G., Astashev M. G. et al. Malogabaritnye ustroystva prodol'noi kompensatsii dlya vozdushnykh liniy elektropredachi [Compact series compensation devices for overhead power transmission lines]. Elektrotehnika [Electrical Engineering], 2017. No. 7. Pp. 78–82.

2. Divan D., Brumsickle W., Schneider R. et al. A distributed static series compensator system for realizing active power flow control on existing power lines. *IEEE transactions on power delivery*, 2007. Vol. 22. No. 1. Pp. 642–649.

3. Chaplygin E.E., Astashev M.G., Rasuli K.V. Primenenie aktivnykh istochnikov reaktivnoi moshchnosti dlya pereraspredeleniya potokov energii v elektricheskikh setyakh [Application of active sources of reactive power for redistribution of energy flows in electrical networks] Elektrotehnika [Electrical engineering], 2013. No. 12. Pp. 19–25.

4. Chaplygin E.E., Astashev M.G., Rasuli K.V. [Research of operating modes and characteristics of series reactive power sources]. Elektrotehnika [Electrical engineering], 2016. No. 11. P. 66–71.

5. Kreikebaum F., Imayavaramban M., Divan D. Active smart wires: an inverter-less static series compensator. *IEEE*, 2010. Pp. 3626–3630.

6. Brissette A.M. Performance Analysis and Design of Distributed Static Series Compensators for Transmission Line Reactance Control. A thesis submitted to the Faculty of the Graduate School of the University of Colorado for the degree of Doctor of Philosophy. Department of Electrical, Computer, and Energy Engineering. 2014. 131 p.

7. Das D., Kreikebaum F., Divan D., Lambert F. Reducing transmission investment to meet renewable portfolio standards using smart wires. *IEEE 2010 Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 2020. New Orleans. LA. Pp. 1–7.

8. Rogers K.M., Overbye T.J. Some Applications of Distributed Flexible AC Transmission System (D-FACTS) Devices in Power Systems. *IEEE Xplore*, 9 p. DOI: 10.1109/NAPS.2008.5307314.

9. Ramsay S.M., Cronin P.E., Nelson R.J., Bian J., Menendez F.E. Using distribution static compensators (D-STATCOMs) to extend the capability of voltage-limited distribution feeders. *In 40th Annual Conference on Rural Electric Power*, 1996. Pp. A4/18-A4/24.

10. Mayer J., Hossein-Zadeh N., Wolfs P. Investigation of voltage quality and distribution capacity issues on long rural three phase distribution lines supplying SWER systems. *The Australasian Universities Power Engineering Conference*, AUPEC, 2005.

11. Mayer J., Hosseinzadeh N., Wolfs P. Modelling of voltage regulation issues in SWER systems using PSCAD/EMTDC. Presented at the Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC, Melbourne, Australia, 2006.

12. Jarrett R., Oo A.M.T., Harvey B. An investigation into the use of four quadrant inverter devices for voltage and var support on SWER systems. *In 22nd Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC2012* 2012. Pp. 1–7.

13. Fajri P., Afsharnia S. A PSCAD/EMTDC Model for distributed static series compensator (DSSC). *IEEE Xplore*, 2008.

14. Kumbhare P.P., Nimje A.A., Sawarkar P.R. Application of distributed static series compensator for improvement of power system stability. In: Mishra A., Basu A., Tyagi V. (eds) *Silicon Photonics & High Performance Computing. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2018. Vol. 718. Springer, Singapore [Electronic media]. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-10-7656-5_4.

15. Khalilian M., Mokhtari M., Khazaie J., Nazarpour D., Farsadi M. Distributed Static Series Compensator (DSSC) for Power Flow Control and Inter-Area Oscillations Damping Studies. *ELECO 2011 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, 1–4 December, Bursa, Turkey*. Pp. 85–90.

16. Taher S.A., Afsari S.A. Optimal Location and Sizing of DSTATCOM in Distribution Systems by Immune Algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2014. Vol. 60. Pp. 34–44.

17. Fajri P., Afsharnia S., Nazarpour D. and Tavallaei M. A. Modeling, Simulation and Group Control of Distributed Static Series Compensators. *American J. of Engineering and Applied Sciences*, 2008. No. 1(4). Pp. 347–357.

18. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Slozhnonnesimmetrichnye rezhimy elektricheskikh sistem [Complex asymmetric modes of electrical systems]. Irkutsk, 2005. 273 p.

19. Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Elektromagnitnaya bezopasnost' v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog: modelirovanie i upravlenie [Electromagnetic safety in power supply systems of railways: modeling and control]. Angarsk, 2018. 382 p.

Информация об авторах

Закарюкин Василий Пантелеймонович – д-р техн. наук, доцент, ООО «Smart grid», г. Иркутск, e-mail: zakar49@mail.ru

Крюков Андрей Васильевич – д-р техн. наук, профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения; Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, e-mail: and_kryukov@mail.ru

Information about the authors

Vasilii P. Zakaryukin – Doctor of Engineering Science, Associate Professor, ООО “Smart grid”, Irkutsk, e-mail: zakar49@mail.ru

Andrei V. Kryukov – Doctor of Engineering Science, Prof., Irkutsk State Transport University; Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: and_kryukov@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.2(70).92-104

УДК 621.331:625.1

Сравнительный анализ оборудования уровня процесса для цифровой тяговой подстанции

Е. Ю. Пузина ✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ lena-rus05@mail.ru

Резюме

Цифровой подстанцией называется подстанция, в которой организация всех потоков информации при решении задач мониторинга, анализа и управления осуществляется в цифровой форме, а параметры такой передачи определяются единым файлом электронного проекта. В качестве основной среды передачи данных в рамках цифровой подстанции используется локальная вычислительная сеть на базе технологии Ethernet, а в качестве коммуникационных протоколов применяются протоколы, описанные стандартом МЭК 61850. Одной из ключевых особенностей цифровой подстанции является приближение устройств сбора дискретных и аналоговых сигналов и выдачи управляющих воздействий непосредственно к оборудованию с последующей передачей всей информации, необходимой для функционирования комплексов релейной защиты и автоматики и автоматизированной системы управления технологическими процессами подстанций и электрической части станций, в цифровой форме. Благодаря этому достигается сокращение суммарной длины электрических кабелей и вторичных цепей, и, как следствие, происходит снижение вероятности их повреждения и повышение наблюдаемости вторичных систем. В России процесс цифровизации тяговых подстанций электрифицированных железных дорог в настоящее время находится на начальном этапе. Единичные проекты цифровых тяговых подстанций находятся на стадии реализации их первого сегмента, т. е. первого уровня – уровня процесса. Используемое при этом оборудование данного уровня не унифицировано, применяется продукция различных отечественных и зарубежных производителей. Данная работа на базе сравнительного анализа технических показателей, объема возможностей, условий эксплуатации и других характеристик позволяет сформировать перечень наиболее оптимальных видов оборудования отечественного производства уровня процесса для цифровых тяговых подстанций, что создает возможность унифицировать процесс их проектирования и реализации на сети российских железных дорог.

Ключевые слова

цифровая тяговая подстанция, автотрансформатор, тяговые трансформаторы, уровень процесса, системы диагностики и мониторинга

Для цитирования

Пузина Е. Ю. Сравнительный анализ оборудования уровня процесса для цифровой тяговой подстанции // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 2 (70). – С. 92–104. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).92-104

Информация о статье

поступила в редакцию: 20.02.2021, поступила после рецензирования: 08.03.2021, принята к публикации: 19.03.2021

Comparative analysis of the technological equipment for the digital traction substation

E. Yu. Puzina ✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ lena-rus05@mail.ru

Abstract

A digital substation is a substation in which all information flows while solving problems of monitoring, analysis and control are organized digitally, and the parameters of such transfer are determined by the single file of a digital project. A local computational network based on the Ethernet technology is used as the main means of data transfer within a digital substation, and protocols described by the MEK 61850 standard are applied as communication protocols. One of the key features of the digital substation is the closeness of the devices for collecting discrete and analog signals and issuing control actions directly to the equipment with the subsequent transfer of all information necessary for the functioning of relay protection and automation complexes and an automated control system for production processes of substations and electrical parts of stations, in digital form. Due to this, a reduction in the total length of electrical cables and secondary circuits is achieved, and, as a consequence, there is a decrease in the likelihood of their damage and an increase in the observability of secondary systems. In Russia, the process of digitalization of traction substations of electrified railways is currently at its initial stage. Single projects of digital traction substations are at the stage of implementation of their first segment, i.e. the first level – the process level. The equipment of this level used for this is not unified, products of various domestic and foreign manufacturers are used. This work, based on a comparative analysis of technical indicators, scope of capabilities, operating conditions and other characteristics, allows forming a list of the most optimal types of the equipment of domestic production at the process level for digital traction substations. This makes it possible to unify the process of their design and implementation on the network of Russian railways.

Keywords

digital traction substation, autotransformer, traction transformers, process level, systems of diagnostics and monitoring

For citation

Puzina E. Yu. Sravnitel'nyi analiz oborudovaniya urovnya protsessa dlya tsifrovoy tyagovoy podstantsii [Comparative analysis of the technological equipment for the digital traction substation].. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2021, No. 2 (70), pp. 92–104. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).92-104

Article info

Received: 20.02.2021, Revised: 08.03.2021, Accepted: 19.03.2021

Введение

Железнодорожный транспорт является одной из наиболее важных транспортных отраслей России, поскольку объем перевозимых железными дорогами грузов достиг 87 % от общего объема грузоперевозок, выполненных в стране в 2020 г. С повышением объема перевозок на железных дорогах повышаются и требования к надежности устройств их электрооборудования [1], в частности к тяговым подстанциям. Поэтому при проектировании новых и реконструкции действующих тяговых подстанций целесообразно применять современное надежное и, вместе с тем, малообслуживаемое оборудование, что является одним из трендов современной экономики [2, 3].

В настоящее время настоятельной необходимостью становится цифровизация экономики в России. И сегодня все чаще можно услышать про технологию «Цифровая подстанция». Так, стали широко применяться цифровые устройства защиты и автоматизации, цифровое измерительное оборудование. Появились новые международные стандарты, позволяющие решить задачи управления электрообору-

дованием, а также реализовать необходимые методы диагностики и мониторинга электрооборудования тяговых подстанций [4]. Эти тенденции позволяют перейти к реализации цифровых тяговых подстанций (ЦТП) в России.

Описание проблемной ситуации и постановка задачи

Опыт использования и проектирования цифровых подстанций получен во Франции, в которой с 2016 г. эксплуатируется цифровая подстанция 225/90/20 кВ. Проекты подобных подстанций имеются в Дании, Канаде, Мексике, а в Китае в 2010 г. реализовано 67 подстанций с высоким уровнем автоматизации управления.

В Белоруссии реализовали цифровую подстанцию «Приречная» уровнем напряжения 110 кВ и получили ряд преимуществ:

- сокращение затрат на монтаж и исключение ошибок при монтаже;
- использование одной волоконно-оптической линии, вместо множества кабельных;

- непрерывная самодиагностика системы;
- снижение вероятности ошибок при эксплуатации.

В 2017 г. в Красноярском крае ввели в эксплуатацию цифровую подстанцию для электроснабжения малоэтажного строительства района и для электроснабжения крупного торгового центра. Это позволило повысить надежность системы электроснабжения близлежащих районов и снизить затраты на обслуживание подстанции.

Также в России есть примеры цифровых подстанций Медведковская (г. Москва, Сколково), Тобол (г. Тобольск), Южная (г. Череповец). При этом для цифровизации названных подстанций используется оборудование различных производителей, соответственно единого, унифицированного подхода к выбору оборудования для цифровизации подстанций в нашей стране в данное время нет.

На электрифицированных железных дорогах России процесс цифровизации тяговых подстанций только начинается. Заявлены цифровыми тяговые подстанции Владимир (Горьковская железная дорога), Инская (Западно-Сибирская железная дорога). Однако, в настоящее время эти подстанции только лишь оснащены системами диагностики и мониторинга части электрооборудования. Поэтому актуальной задачей в области электрифицированного железнодорожного транспорта является выработка единого подхода к формированию требований к структуре, составу, оснащенности лучшим отечественным оборудованием ЦТП.

Структура цифровой тяговой подстанции

ЦТП – это тяговая подстанция с высоким уровнем автоматизации управления, на которой процессы информационного обмена между оборудованием,

а также управление работой осуществляются передачей данных и команд управления по цифровым каналам связи на основе стандартов серии МЭК 61850 [5–7].

Структура ЦТП строится на трех основных уровнях: полевой (уровень процесса); средний (уровень присоединения); верхний (уровень подстанции) [7] (рис. 1).

Уровень подстанции состоит из основных систем управления подстанцией, программно-технического комплекса (ПТК) и человеко-машинных интерфейсов. Как правило, оборудование уровня подстанции включает в себя следующие устройства:

- сервер управления функционалом цифровой тяговой подстанции (ПТК-сервер);
- сервер управления подстанционным оборудованием (SCADA-сервер);
- сервер контроля и связи (сервер телемеханизации, станционный контроллер связи и управления);
- сервер сбора, хранения и передачи информации;
- автоматизированное рабочее место персонала (человеко-машинный интерфейс);
- сервер точного времени;
- средства гарантированного питания.

Это оборудование объединяется в единую технологическую сеть. Серверы организуются в виде виртуальных систем на основе серверного отказоустойчивого кластера. Сетевое оборудование в свою очередь состоит из коммутаторов, сетевых шлюзов, межсетевых экранов и конвертеров протоколов.

Уровень присоединения состоит из оборудования и программного обеспечения, которое служит для концентрации и унификации разнородных информационных потоков с нижнего уровня цифровой тяговой подстанции, их обработки и взаимодействия



Рис. 1. Структурная схема цифровой тяговой подстанции
Fig.1. Structural diagram of a digital traction substation

с вышестоящими уровнями автоматизации.

Оборудование уровня присоединения состоит из следующих устройств:

- устройства защиты и аварийной автоматики;
- выносные шкафы управления;
- устройства сбора диагностической информации;
- измерительные преобразователи и модули;
- устройства учета и контроля электроэнергии.

Уровень процесса включает в себя источники аналоговой и дискретной информации о состоянии первичного процесса объекта автоматизации, датчики и метки, устанавливаемые на территории подстанции, а также резервируемую сетевую инфраструктуру доставки цифровых сигналов на средний уровень (коммутаторы шины процесса). В качестве источников первичной информации применяются цифровые трансформаторы тока и напряжения. В качестве источников дискретной информации применяются специализированные преобразователи дискретных сигналов, либо коммутационные аппараты, оснащенные цифровым интерфейсом.

К оборудованию уровня процесса относятся:

- преобразователи и датчики первичной информации, включая электронные трансформаторы тока и электронные трансформаторы напряжения, преобразователи аналоговых и дискретных сигналов;
- выносные (устанавливаемые в местах размещения первичного оборудования) цифровые контроллеры.

Оборудование процесса служит для сбора, преобразования в цифровой вид и передачи на уровень присоединения информации о работе основного оборудования подстанции, включая дискретные значения и непрерывно меняющиеся сигналы, с заданной точностью и детализацией.

Устройства уровня процесса должны предоставлять общий интерфейс для взаимодействия с основным оборудованием уровня присоединения и функциональных подсистем.

Сравнительный анализ оборудования уровня процесса для цифровизации тяговой подстанции

На ЦТП оборудование в целях цифровизации необходимо оснастить системами мониторинга и диагностики (СМД). Также необходимо обеспечить дистанционное управление коммутационными аппаратами, разъединителями и регулирование напряжения (РПН) силового трансформатора.

Информационный обмен данными между устройствами диагностики, микропроцессорными терминалами и другими интеллектуальными устройствами необходимо реализовать по международному стандарту МЭК 61850 [7].

Для уровня процесса ЦТП должны быть выбраны необходимые измерительные трансформаторы, а также СМД, преобразователи и датчики, которые, в

свою очередь, будут взаимодействовать с первичным оборудованием. В целях поддержки отечественного производителя в данной работе выполнен сравнительный анализ оборудования уровня процесса ЦТП, выпускаемого отечественными производителями.

Измерительные трансформаторы

На данный момент производители предлагают вместо отдельных цифровых трансформаторов тока (ТТ) и цифровых трансформаторов напряжения (ТН) комбинированное оборудование, включающее в себя функции как ТТ, так и ТН. Такой тип оборудования удобен тем, что требует меньше эксплуатационных затрат.

Комбинированные цифровые ТТ и ТН (ЦТТН) состоят из первичного преобразователя силы тока, электронных блоков, изоляции в виде силиконовой рубашки (рис. 2).

Измеренные с помощью инновационной датчиковой системы, состоящей из пояса Роговского, магнитотранзисторного преобразователя, безиндуктивного шунта, трансформатора тока с нанокристаллическим магнитопроводом и резистивного делителя напряжения, значения тока и напряжения оцифровываются непосредственно на первичном проводе и передаются по оптоволокну на низковольтную сторону, где производится их обработка и упаковка в соответствии с протоколом.

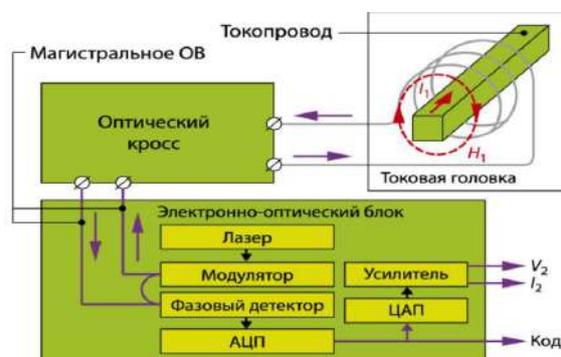


Рис. 2. Структурная схема цифрового трансформатора тока и напряжения

Fig. 2. Structural diagram of digital current and voltage transformer

По сравнению с традиционными измерительными трансформаторами, цифровые трансформаторы имеют ряд преимуществ:

- обладают высокой точностью измерения;
- не подвержены влиянию электромагнитных полей за счет использования безиндуктивного преобразователя напряжения;
- отсутствие потерь и искажений при передаче информации;
- взрывобезопасны из-за отсутствия масла и газа;
- улучшенные массогабаритные показатели;

– возможность получать сигнал сразу в цифровом виде.

Преимущества ЦТТН перед отдельными цифровыми трансформаторами тока и напряжения:

- устойчивость к температурным и вибрационным воздействиям;
- широкий диапазон измерений за счет отсутствия в преобразовании искусственной модуляции;
- повреждение вторичной оптоволоконной цепи не приводит к необходимости замены всего трансформатора;
- меньше стоимость и ниже эксплуатационные расходы.

Результаты сравнения ЦТТН отечественных производителей по их характеристикам приведены далее (табл. 1).

По приведенным данным (см. табл. 1) видим, что ЦТТН производства ООО НПО «Цифровые измерительные трансформаторы» отличаются большим межповерочным интервалом и меньшей массой и, соответственно, могут быть рекомендованы к применению на ЦТП в распределительных устройствах 110 кВ и ниже.

Система мониторинга и диагностики силовых трансформаторов и автотрансформаторов

Наиболее ответственными элементами системы тягового электроснабжения на ЦТП являются автотрансформаторы (АТ) при их наличии и тяговые трансформаторы. Для того чтобы избежать ситуаций с выходом из строя этого оборудования и выполнить оценку остаточного ресурса, предлагается использовать системы диагностики и мониторинга тягового трансформатора и АТ [8–16].

Система мониторинга и диагностики предназначена для следующих процессов:

- непрерывного измерения, регистрации и отображения параметров трансформатора в нормальных, предаварийных и аварийных режимах;
- определения технического состояния трансформатора и прогнозирования его остаточного ресурса по полученным данным на основе математических моделей;
- интеграции перечисленных функций в автоматизированную систему управления тяговыми под-

станциями (АСУ ТП) объекта энергосистемы [17, 18].

СМД состоит из следующих элементов:

- датчиков и измерительного оборудования, позволяющих непосредственно измерять текущие параметры трансформатора в контрольных точках;
- контроллера и модулей сбора и передачи данных, обеспечивающих сбор измеренных значений от датчиков и оборудования, сигналов от систем трансформатора и передачу этой информации на главный модуль;
- систем управления охлаждением;
- ПТК, производящего прием, обработку и регистрацию данных от трансформаторов.

Параметры, которые должна контролировать СМД на цифровой тяговой подстанции:

- изоляция высоковольтных вводов;
- температура масла и обмоток трансформатора;
- старение изоляции;
- состояние РПН;
- содержание влаги в масле;
- частичные разряды в изоляции;
- наличие растворенных газов в масле;
- работу системы охлаждения;
- вибрацию в баке трансформатора.

Для фиксации указанных параметров необходимо использовать следующие датчики:

- датчик анализа растворенных газов в масле, который предназначен для оперативного контроля и мониторинга параметров растворенных газов в масле бака трансформатора;
- датчик контроля технического состояния РПН (контролирует количество коммутаций, мощности приводного двигателя, определяет положение моста по токам фаз, оценивает состояние контактов);
- датчик регистрации частичных разрядов (ЧР), устанавливается в бак трансформатора (регистрация ЧР производится в сверхвысокочастотном диапазоне частот, что дает возможность выявлять дефекты в изоляции на ранних стадиях);
- датчик тока обмоток трансформатора позволяет производить расчет температуры наиболее нагретой точки (ННТ) обмотки (расчет ННТ выполняется в соответствии с рекомендациями, путем решения дифференциальных уравнений теплопереноса при

Таблица 1. Технические данные цифровых трансформаторов тока и напряжения

Table 1. Technical data of digital current and voltage transformers

Показатель	Производитель	
	ООО НПО «Цифровые измерительные трансформаторы»	АО «Профотек»
Номинальное напряжение, кВ	6–110 кВ	110–220 кВ
Номинальный ток, А	10–4 000 А	200–4 000 А
Классы точности	0,2; 0,2S; 0,5; 1; 3; 5; 5TR; 5P; 10P	0,2S; 5TR; 0,2; 3P
Масса, не более, кг	5 (10 кВ), 30 (35 кВ), 50 (110кВ), 75 (220 кВ)	От 65 до 120
Межповерочный интервал, лет	8	5
Интерфейс	МЭК 61850-9-2	МЭК 61850-9-2
Погрешность, %	0,03 %	0,03 %

произвольном изменении во времени тока нагрузки и температуры окружающей среды, что наиболее подходит для непрерывного мониторинга трансформатора в реальном времени) [19–21];

– датчик температуры устанавливается также в бак трансформатора, позволяет измерять температуру масла в баке трансформатора, оценивать эффективность работы системы охлаждения;

– датчик контроля вибрации, устанавливается на поверхности бака трансформатора (на основании сравнения вибрационных процессов в трансформаторе, регистрируемых в режимах, близких к режиму холостого хода и нагрузки, производится оценка качества пресовки активных элементов трансформатора – стали и обмоток).

Для выбора СМД сравним системы различных отечественных производителей (табл. 2).

По представленным данным (см. табл. 2) можно сделать вывод о том, что СМД производства ООО «Dimrus» (TDM) поддерживает протокол передачи

данных МЭК 61850, имеет более обширный набор контролируемых датчиками параметров, не включенных в состав других СМД (датчики вибрации и ЧР) и более широкий диапазон рабочих температур.

СМД TDM используют в том случае, когда необходимо создать систему мониторинга ответственных и мощных трансформаторов [22]. Отличительной особенностью данной системы является наличие датчика, интегрированного в бак трансформатора, он позволяет контролировать влагосодержание в масле, температуру, вибрацию и ЧР.

Оценка состояния оборудования производится на основании использования двух видов диагностики: параметрической, основанной на анализе нормируемых параметров, и экспертной, основанной на использовании математических моделей.

Модули системы программно интегрируются в единую систему АСУ ТП подстанции по протоколу МЭК 61850. Система обеспечивается программным обеспечением INVA (рис. 3), которое позволяет

Таблица 2. Сравнение характеристик системы мониторинга и диагностики
Table 2. Comparison of the characteristics of the monitoring and diagnostic system

Показатель	Производитель		
	ООО «Dimrus» (TDM)	НТЦ «Арго»	ООО «Парма»
Диапазон рабочих температур, °С	От –55 до +60	От –40 до +50	От –40 до +55
Интерфейс	МЭК 61850, RS-485	RS-485	RS-485, RS-232
Рабочее напряжение трансформатора, кВ	110–500	110–500	110–750
Контроль вводов	+	–	+
Частичный разряд	+	–	+
Регулирование напряжения	+	–	+
Система охлаждения	+	+	+
Анализ газов и влаги	+	+	+
Температура масла и обмоток	+	+	+
Состояние изоляции	+	+	+
Вибрация	+	–	–
Использование режима on-line	+	+	+

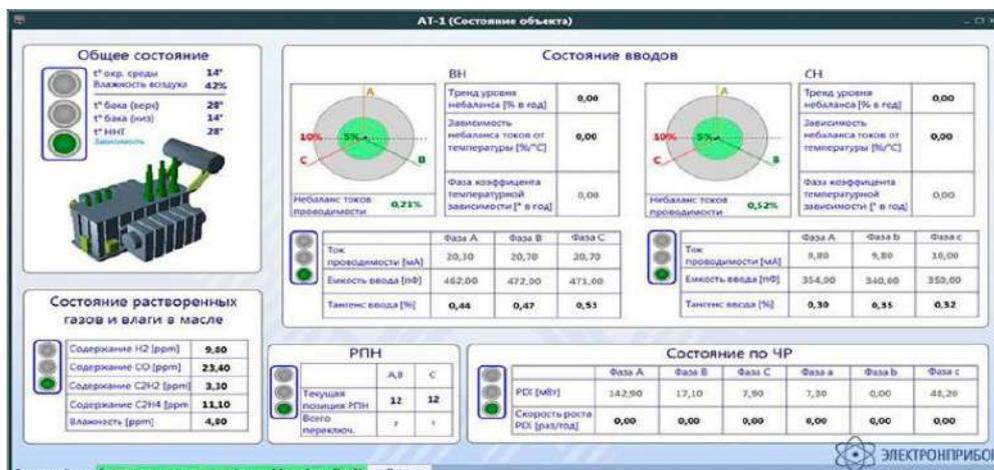


Рис. 3. Программное обеспечение системы мониторинга
Fig. 3. Monitoring system software

обеспечить работу со всеми системами мониторинга фирмы «Dimrus».

По итогам работы алгоритмов в программе INVA рассчитывается единый коэффициент текущего технического состояния трансформатора. Этот коэффициент комплексно отражает состояние трансформатора. Индекс технического состояния оборудования описывает его в условиях полного жизненного цикла оборудования, который обычно включает в себя несколько межремонтных периодов.

Система диагностики и мониторинга трансформаторов собственных нужд

Также к наиболее ответственным видам оборудования тяговой подстанции относятся трансформаторы собственных нужд (ТСН). Система диагностики и мониторинга трансформаторов собственных нужд (СМД ТСН) применяется для контроля следующих параметров:

- регистрация и анализ температурных режимов работы трансформатора;
- контроль влагосодержания в масле бака трансформатора;
- контроль влагосодержания в твердой изоляции обмоток трансформатора;
- регистрация и анализ разрядных процессов внутри бака трансформатора;
- контроль технического состояния конструкции трансформатора по параметрам вибрации;
- контроль уровня масла в баке трансформатора по принципу защитного реле.

Конструктивно прибор системы мониторинга TDM-35 представляет собой единый металлический корпус (рис. 4). В верхней части в отдельном герметичном металлическом корпусе располагается электронная часть всей системы мониторинга. В нижней части корпуса находятся первичные датчики. Смонтировать СМД можно как в штатную горловину для заливки масла, так и с помощью переходного фланца, устанавливаемого на любой крышке бака

Датчики для регистрации параметров трансформатора конструктивно объединены в единый модуль, который вводится внутрь бака трансформатора через верхнюю крышку.

Результаты работы системы:

- информация о текущем техническом состоянии

контролируемого трансформатора в целом и его отдельных подсистем;

- перечень тревожных и предаварийных превышений контролируемых параметров, выявленных системой мониторинга за выбранный пользователем период времени;

– расчет температуры наиболее нагретой точки обмотки трансформатора, определение скорости старения изоляции обмоток;

– оценка эффективности работы системы охлаждения, учитывающая возникновение внутри бака трансформатора дополнительных зон нагрева;

– список всех диагностированных экспертной системой признаков дефектных состояний трансформатора с оценкой степени их опасности.

Сравнение СМД ТСН по характеристикам показано далее (табл. 3). Видим, что СМД TDM-35 фирмы «Dimrus» отличается тем, что имеет возможность работать в более широком диапазоне температур, также поддерживает протокол передачи данных МЭК-61850 и подвергает контролю практически все системы ТСН.



Рис. 4. Модуль датчиков системы TDM-35
Fig.4. Module of sensors of the system TDM-35

Система диагностики и оценки технического состояния комплектных распределительных устройств

В состав ячейки ввода и фидера комплектных распределительных устройств (КРУ) входят выключо-

Таблица 3. Характеристики системы мониторинга и диагностики трансформаторов собственных нужд
Table 3. Characteristics of the monitoring and diagnostics system for auxiliary transformers

Показатель	Производитель	
	ООО «Dimrus» (TDM-35)	ООО «Эма»
Диапазон рабочих температур, °С	От -55 до +60	От -40 до +50
Интерфейс	МЭК 61850, RS-485	RS-485
Рабочее напряжение трансформатора, кВ	6–35	10–110
Система охлаждения	+	–
Частичный разряд	+	+
Вибрация	+	–
Влагосодержание	+	–

чатель, трансформатор тока, шины и отходящие кабельные линии. Для того чтобы производить диагностику и оценку технического состояния ячейки, необходимо использовать несколько различных СМД по каждому виду оборудования. Единственным отечественным производителем, который предлагает комплексную систему диагностики и мониторинга КРУ типа СМД ВДМ, позволяющую контролировать сразу все оборудование ячейки по многим параметрам, является ООО «Dimrus».

Необходимый функционал СМД КРУ:

- осуществление контроля технического состояния выключателей, расположенных в ячейках КРУ;
- возможность проводить оценку изменения изоляции КРУ;
- контроль рабочих температур шин и токопроводов;
- проведение оценки технического состояния отходящих кабельных линий.

Система состоит из набора технических модулей и датчиков:

- датчик ВДМ/РД, предназначенный для контроля состояния высоковольтной изоляции в ячейках КРУ и контроля кабельных линий (КЛ) по частичным разрядам;
- датчик ВДМ/СВ, предназначенный для мониторинга и диагностики высоковольтных выключателей в ячейках КРУ [23];
- датчик ВДМ/Т для контроля температуры шин КРУ и контактов выключателя.

Главный модуль системы осуществляет оперативный контроль технического состояния выключателей, расположенных в КРУ, оценивает изменение состояния изоляции КРУ, контролирует температуру шин и токопроводов и оценивает техническое состояние отходящих КЛ.

Для регистрации графиков DC токов соленоидов управления и нагрузочных AC токов выключателя используются бесконтактный датчик тока марки CSS (рис. 5). Это накладные AC/DC-датчики с изолированным корпусом, при установке которых не нужно разрывать цепи управления выключателем.

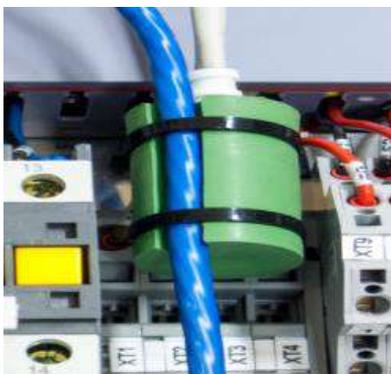


Рис. 5. Датчик тока
Fig. 5. Current sensor

Работа экспертной программы основана на анализе распределения зарегистрированных импульсов частичных разрядов относительно фазы синусоиды питающей сети. В результате определяется тип дефекта, степень развития и его опасности для дальнейшей эксплуатации КРУ.

Система мониторинга технического состояния линии электропередачи

Система мониторинга технического состояния линии электропередачи (СМД ЛЭП) должна контролировать следующие параметры:

- наличие гололеда на проводах;
- температурные изменения проводов;
- состояние подвесных изоляторов;
- перенапряжения в защищаемой линии;
- определение места повреждения проводов;
- контролирование стрелы провеса проводов и натяжения проводов.

Структурная схема СМД марки DiLin приведена (рис. 6).

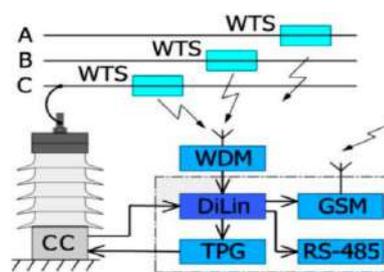


Рис. 6. Структурная схема системы мониторинга линии электропередачи
Fig. 6. Structural diagram of the power transmission line monitoring system

Результаты работы системы:

- информация о техническом состоянии ЛЭП;
- определение стрелы провеса и сравнение полученного значения с допустимым;
- определение полной температурной картины проводов.

Основные диагностические методы, применяемые в СМД DiLin:

- волновой метод, контролирующий скорость и затухание волны электромагнитного поля в линии (для контроля этих параметров в работающую линию подаются импульсы от тестового генератора);
- метод анализа рефлектограмм, основан на регистрации импульсов, отраженных от участков ЛЭП;
- мониторинг разрядной активности в линии, позволяющий контролировать практически все виды импульсных процессов;
- локация мест возникновения дефектов в линии по разнице времени прихода импульсов от разрядов к разным концам линии;
- оперативный прямой контроль температуры проводов ЛЭП с использованием беспроводных

датчиков температуры.

Сравнение СМД ЛЭП отечественных производителей по характеристикам и контролируемым параметрам приведено (табл. 4).

По данным (табл. 4) можно сделать вывод о том, что СМД марки DiLin ООО «Dimrus» имеет более высокий срок службы батареи, широкий диапазон рабочих температур и параметров, также имеется контроль состояния изоляции подвесных изоляторов.

Система диагностики и мониторинга ограничителя перенапряжения нелинейного

Система диагностики и мониторинга ограничителя перенапряжения нелинейного (ОПН) контролирует следующие его параметры:

- величина тока утечки;
- регистрация энергии импульсов.

Результаты работы системы:

- информация о текущем техническом состоянии контролируемого ОПН;
- определение остаточного ресурса.

Беспроводной интеллектуальный датчик марки ОПН-Датчик предназначен для оперативного контроля состояния высоковольтных ограничителей перенапряжений. Датчик устанавливается в разрыв цепи заземления высоковольтного ОПН и измеряет ток утечки в рабочих режимах. Состоит из датчика

тока утечки ОПН, установленного на проходной шпильке, универсальной электронной платы и встроенной батареи.

При помощи встроенного микропроцессора в датчике рассчитывается действующее значение тока утечки, разделяются его емкостная и активная составляющие. Для проведения диагностики и оценки технического состояния ОПН в датчике рассчитываются амплитуды первой, третьей и пятой гармоник в общем токе утечки. В тех случаях, когда важным является знание остаточного ресурса ОПН необходимо использовать ОПН-Датчик-2.

Сравнение СМД по техническим параметрам показано далее (табл. 5).

Из данных (см. табл. 5) видно, что СМД от ООО «Dimrus» имеет больший срок службы, шире диапазон температур работы и меньшую массу. Также она позволяет определять остаточный ресурс ОПН за счет суммирования энергии импульсов, прошедших через устройство.

Система мониторинга и диагностики цепей оперативного тока

Система мониторинга и диагностики цепей оперативного тока (СМОТ) контролирует следующие параметры: изоляцию; напряжение и пульсации; значения тока; напряжение и температуры АБ; выпрями-

Таблица 4. Характеристики системы мониторинга и диагностики линий электропередачи
Table 4. Characteristics of the monitoring and diagnostics system for power transmission lines

Показатель	Производитель	
	ООО «Dimrus» (DiLin)	«Nexans»
Диапазон рабочих температур, °С	От –55 до +50	От –40 до +50
Интерфейс	МЭК 61850, RS-485, GSM	GSM, RS-485
Напряжение контролируемой линии электропередачи, кВ	От 6	35–500
Срок службы (замены батареи), лет	20	5
Определение наличия гололеда	+	+
Натяжение	+	+
Температура провода	+	+
Ток в проводе	+	+
Контроль изоляции	+	–
Перенапряжения	+	–
Температура окружающего воздуха	–	+

Таблица 5. Сравнение характеристик и параметров системы мониторинга и диагностики ограничителя перенапряжения нелинейного

Table 5. Comparison of characteristics and parameters of the monitoring system and diagnostics of the nonlinear surge suppressor

Показатель	Производитель	
	ООО «Dimrus»	ОАО «Позитрон»
Диапазон рабочих температур, °С	От –40 до +60	От –40 до +50
Интерфейс	МЭК 61850, RS-485, GSM	GSM, RS-485
Напряжение контролируемой линии электропередачи, кВ	110–500	110–750
Срок службы (замены батареи), лет	От 20	Не менее 5
Расстояние от датчика до приемника, м	До 120	До 1000
Масса, гр	400	800
Контроль тока утечки	+	+
Суммирование энергии импульсов	+	–

тельный аппарат; положение выключателей [24].

Результаты работы системы:

- измерение и выдача показаний параметров сопротивления изоляции;
- формирование сигналов с выдачей сигнализации в виде «сухих контактов»;
- формирование архива событий, запись значений тока приводов;
- защита щита собственных нужд;
- передача информации в АСУ ТП.

Комплекс обеспечивает мониторинг основных первичных электрических и технологических параметров компонентов системы оперативного постоянного тока, вычисления вторичных параметров, характеризующих состояние системы, а также заблаговременно информирует о предаварийных и

аварийных состояниях системы.

Сравнение СМОТ по характеристикам и контролируемым параметрам показано (табл. 6).

Исходя из данных (см. табл. 6) видим, что КМСОТ-М «Дубна» производителя ООО «Техноэнергокомплект» контролирует больше параметров и позволяет измерять сопротивление изоляции с большим диапазоном.

Заключение

Сравнительный анализ отечественного оборудования уровня процесса цифровой тяговой подстанции позволяет дать рекомендации в целях унификации ЦТП по применению на тяговых подстанциях переменного тока с классами напряжения 220(110)/27,5/10 кВ оборудования, приведенного в (табл. 7).

Таблица 6. Характеристики и контролируемые параметры системы мониторинга и диагностики цепей оперативного тока

Table 6. Characteristics and controlled parameters of systems of monitoring and diagnostics of circuits of operating current

Показатель	Производитель	
	ООО «Техноэнергокомплект»	ОО ПК «Электроконцепт»
Интерфейс	МЭК 61850	RS485
Контроль изоляции сети	+	+
Контроль изоляции секций и присоединений	+	–
Контроль состояния и положения выключателей	+	–
Контроль постоянного тока и напряжения	+	+
Контроль пульсаций	+	–
Контроль асимметрий напряжений групп АБ	+	–
Контроль температуры АБ	+	–
Диапазон измерения напряжения, В	От 0 до 300	От 150 до 300
Количество контролируемых присоединений, шт.	82	1 024
Диапазон измерения сопротивления, кОм	От 0 до 10 000	От 0 до 999

Таблица 7. Выбранное оборудование уровня процесса

Table 7. Selected process level equipment

Номинальное напряжение установки, кВ	Система мониторинга и диагностики		
	Назначение	Наименование	Производитель
220	Автотрансформатор	TDM	ООО «Dimrus»
220	Линии электропередачи	DiLin	
220	Ограничитель перенапряжения нелинейный	ОПН-датчик	
220	Преобразователи сигналов	ПАС/ПДС	АО «УралЭлектроТяжМаш»
110	Силовой трансформатор	TDM	ООО «Dimrus»
110	Линии электропередачи	DiLin	
110	Ограничитель перенапряжения нелинейный	ОПН-датчик	
110	Преобразователи сигналов	ПАС/ПДС	
27,5	Трансформатор собственных нужд	TDM-35	ООО «Dimrus»
27,5	Ограничитель перенапряжения нелинейный	ОПН-датчик	
10	Трансформатор собственных нужд	TDM-35	
10	Ограничитель перенапряжения нелинейный	ОПН-датчик	
10	Комплексные распределительные устройства и кабельные линии	BDM	
0,22	Цепи оперативного тока	КМСОТ-«Дубна»	ООО «Техноэнергокомплект»

Использование приведенного в данной работе оптимального оборудования позволит начать организацию цифровизации тяговых подстанций, выполняя первый уровень ЦТП и создавая базу для внедрения второго и третьего уровней, а также поз-

волит повысить надежность и безопасность работы всех видов электрооборудования подстанции [25] и снизить эксплуатационные расходы по их обслуживанию.

Список литературы

1. Cherepanov A., Kutsiy A. Modeling of tractive power supply systems for heavy-tonnage trains operation // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501734.
2. Туйгунова А.Г., Худоногов И.А. Применение систем мониторинга на силовых трансформаторах тяговых подстанций ВСЖД // Инновационные технологии на железнодорожном транспорте : XXI Межвуз. науч.-практ. конф. Красноярск, 2017. С. 7–12.
3. Крюков А.В., Куцкий А.П., Черепанов А.В. Применение управляемых источников реактивной мощности в системах электроснабжения железных дорог // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. Иркутск, 2016. Т. 1. С. 588–593.
4. Казаков Д.О., Пузина Е.Ю. Технические решения по цифровизации тяговых подстанций // Молодая наука Сибири. 2021. № 1(11). С. 227–237.
5. СТО 56947007- 29.240.10.299-2020. Цифровая подстанция : метод. указания по проектированию ЦПС. Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС».
6. Король Ю.Н. Концепция цифровой тяговой подстанции. М. : Трансэнерго, 2020. 28 с.
7. МЭК 61850 Цифровая подстанция / Электротехнический завод «ВЕКТОР». URL: https://etv-vektor.ru/storage/document/file_46.pdf (дата обращения 17.06.2021).
8. Пузина Е.Ю., Туйгунова А.Г., Худоногов И.А. Системы мониторинга силовых трансформаторов тяговых подстанций. Иркутск, 2020. 184 с.
9. Пузина Е.Ю. Оценка остаточного ресурса тяговых трансформаторов Северного хода ВСЖД // Транспорт-2013 : тр. междунар. науч.-практ. конф. Ростов-на-Дону : Изд-во РГУПС, 2013. С. 173–175.
10. Partial Discharges Pattern Recognition of Transformer Defect Model by LBP & HOG Features / Firuzi Keyvan, Vakilian Mehdi, B. Toan Phung et al. // Power Delivery IEEE Transactions on. 2019. Vol. 34. № 2. P. 542–550.
11. Dang Y., Chen W. Design of Oil-Immersed Apparatus Oil Velocity Measure System Based on the Ultrasonic Wave Doppler Effect // 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Palermo, 2018. P. 1–4. DOI: 10.1109/EEEIC.2018.8493986.
12. Research on new traction power system using power flow controller and Vx connection transformer / X. Zhu, M. Chen, Sh. Xie et al. // 2016 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT). Birmingham, 2016. P. 111–115. DOI: 10.1109/ICIRT.2016.7588719.
13. Kalathiripi H., Karmakar S. Fault analysis of oil-filled power transformers using spectroscopy techniques, 2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), Manchester, 2017. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICDL.2017.8124633.
14. Система мониторинга состояния изоляции / Е.Ю. Дульский, П.Ю. Иванов, А.А. Хамнаева и др. // Железнодорожный транспорт. 2021. № 3. С. 50–52.
15. Определение остаточной несущей способности металлических конструкций контактной сети / В.П. Ступицкий, И.А. Худоногов, В.А. Тихомиров и др. // Известия Трансиба. 2019. № 3 (39). С. 88–99.
16. Тихомиров В.А. Повышение эффективности процесса сушки изоляции тяговых электрических машин подвижного состава : дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2012.
17. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. Evaluation of short circuit currents effects on power transformers' residual service life. 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8743069.
18. Применение распределенного мониторинга качества электрической энергии в MICROGRID / К.В. Суслов, Н.Н. Солонина, А.С. Смирнов и др. // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2014. № 6 (89). С. 185–189.
19. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. Summarized Diagnostic Parameter for Condition Assessment of Power Transformer Windings Insulation // 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867610.
20. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. Modeling turn insulation thermal aging process for traction substation transformer // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112021.
21. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. The use “Technical rigidity” indices to assess climatic factors effects on power transformers reliability // 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). DOI: 10.1109/UralCon49858.2020.9216258.
22. Системы мониторинга и диагностические приборы для контроля технического состояния высоковольтного оборудования / ООО «Dimrus». URL: <https://dimrus.ru/manuals/dimrus2019.pdf>. (дата обращения 21.05.2021).
23. Устройство мониторинга высоковольтного выключателя / ООО «АСУ-ВЭИ». Москва, 2020. 4 с.
24. Комплекс мониторинга систем оперативного тока серии КМСОТ-«Дубна» // Технокомплект : сайт. URL: <https://thc-samara.ru/product/sistema-operativnogo-postoyannogo-toka/sistemy-raspredezeniya-postoyannogo-toka/kompleks-monitoringa-operativnogo-toka/kompleks-monitoringa-sistemy-operativnogo-toka-kmsot-m-dubna/> (дата обращения 21.05.2021).

25. Обеспечение безопасности сложных технических систем (технологические подходы) / С.В. Елисеев, В.Е. Гозбенко, Н.М. Быкова и др. Деп. ВИНТИ РАН 17.04.2008, № 328-В2008.

References

1. Cherepanov A., Kutsiy A. Modeling of tractive power supply systems for heavy-tonnage trains operation. *International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018*. Pp. 8501734.
2. Tuigunova A.G., Khudonogov I.A. Primenenie sistem monitoringa na silovykh transformatorakh tyagovykh podstantsii VSZHD [Application of monitoring systems on power transformers of traction substations of VSZHD]. *Innovatsionnye tekhnologii na zhelezнодорожном транспорте XXI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii KrIZhT [Innovative technologies in railway transport of the XXI Interuniversity Scientific and Practical Conference of the KrIZhT]*. IrGUPS Publ., 2017. Pp. 7–12.
3. Kryukov A.V., Kutsiy A.P., Cherepanov A.V. Primenenie upravlyaemykh istochnikov reaktivnoi moshchnosti v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog [The use of controlled sources of reactive power in railroad power supply systems]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona [Transport infrastructure of the Siberian region]*, 2016. Vol. 1. Pp. 588–593.
4. Kazakov D.O., Puzina E.Yu. Tekhnicheskie resheniya po tsifrovizatsii tyagovykh podstantsii [Technical solutions for digitalization of traction substations]. *Molodaya nauka Sibiri [The young science of Siberia]*, 2021. No. 1(11). Pp. 227–237.
5. STO 56947007- 29.240.10.299-2020. Tsifrovaya podstantsiya. Metodicheskie ukazaniya po proektirovaniyu TsPS. Standartorganizatsiia «FSK EES» [STO 56947007-29.240.10.299-2020. Digital substation. Methodological guide lines for the design of the CPS. The standard of the organization of “FGC UES” PAO].
6. Korol' Yu.N. Kontseptsiya tsifrovoi tyagovoi podstantsii [The concept of a digital traction substation]. Moscow: Transenergo Publ, 2020. 62 p.
7. Elektrotekhnicheskiy zavod «VEKTOR». MEK 61850 Tsifrovaya podstantsiya [Electrotechnical plant “VECTOR”. IEC 61850 Digital Substation], 2020. 22 p.
8. Puzina E.Yu., Tuigunova A.G., Khudonogov I.A. Sistemy monitoringa silovykh transformatorov tyagovykh podstantsii. [Monitoring systems of power transformers of traction substations]. Irkutsk, 2020. 184 p.
9. Puzina E. Yu. Otsenka ostatochnogo resursa tyagovykh transformatorov Severnogo khoda VSZHD [Evaluation of the residual service life of the Northern route traction transformers East Siberian Railroad]. *Transport-2013: trudy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Transport-2013: proceedings of the international scientific and practical conference]*. Rostov-on-don: RSUPS Publ., 2013, Pp. 176–178.
10. Firuzi K., Vakilian M., Toan Phung B., Blackburn T., Partial discharges pattern recognition of transformer defect model by LBP & HOG features. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2019. Vol. 34. No. 2. Pp. 542–550.
11. Dang Y., Chen W. Design of oil-immersed apparatus oil velocity measure system based on the ultrasonic wave doppler effect. *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*. Palermo, 2018. Pp. 1–4.
12. Zhu X., Chen M., Xie Sh., Luo J. Research on new traction power system using power flow controller and Vx connection transformer, *2016 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT)*, Birmingham, 2016. Pp. 111–115.
13. Kalathiripi H., Karmakar S. Fault analysis of oil-filled power transformers using spectroscopy techniques. *2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*. Manchester, 2017. Pp. 1–5.
14. Dul'skii E.Yu., Ivanov P.Yu., Khamnaeva A.A., Divinets M.A., Korsun A.A. Sistema monitoringa sostoyaniya izolyatsii [Insulation condition monitoring system]. *Zhelezнодорожный транспорт [Railway transport]*, 2021. No. 3. Pp. 50–52.
15. Stupitskii V.P., Khudonogov I.A., Tikhomirov V.A., Lobanov O.V. Opredelenie ostatochnoi nesushchei sposobnosti metallicheskiikh konstruksii kontaktnoi seti. [Determination of the residual bearing capacity of metal structures of the contact network]. *Izvestiya Transsiba [Journal of Transsib Railway Studies]*, 2019. No. 3 (39). Pp. 88–99.
16. Tikhomirov V.A. Povyshenie effektivnosti protsessa sushki izolyatsii tyagovykh elektricheskikh mashin podvizhnogo sostava. Dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Improving the efficiency of the insulation drying process of traction electric vehicles of rolling stock. Ph.D. (Engineering) diss.]. Omsk State University of Railway Transport Publ. Irkutsk, 2012.
17. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. Evaluation of short circuit current effect on power transformers' residual service life. *2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2019*. Pp. 8743069.
18. Suslov K.V., Solonina N.N., Smirnov A.S., Solonina Z.V. Primenenie raspredelenno monitoringa kachestva elektricheskoi energii v MICROGRID [Application of distributed monitoring of the quality of electrical energy in MICROGRID]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Proceedings of Irkutsk State Technical University]*, 2014. No. 6 (89). Pp. 185–189.
19. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. Summarized diagnostic parameter for condition assessment of power transformer windings insulation. *Proceedings – 2019 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2019*. 2019. Pp. 8867610.
20. Khudonogov I.A., Puzina E.Y., Tuigunova A.G. Modeling turn insulation thermal aging process for traction substation transformer (2020). *Proceedings – 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020*, p. 9112021.
21. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. The use of “technical condition” indices to assess climate factors effect on power transformers reliability. *Proceedings – 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2020*. Pp. 136–141.

22. ООО «Dimrus». *Sistemy monitoringa i diagnosticheskie pribory dlya kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya vysokovol'nogo oborudovaniya* [Dimrus ООО. Monitoring systems and diagnostic devices for monitoring the technical condition of high-voltage equipment]. Moscow, 2019. Pp. 2–82.

23. ООО «ASU-VEI». *Ustroistvo monitoringa vysokovol'nogo vyklyuchatelya* [ASU-VEI ООО. High voltage circuit breaker monitoring device]. Moscow, 2020. 4 p.

24. Сайт компании «Технокомплект». *Kompleks monitoringa sistem operativnogo toka serii KMSOT-«Dubna»* [The website of the Technokomplekt company. The monitoring complex of operational current systems of the KMSOT series “Dubna”] [Electronic media]. URL: <https://thc-samara.ru/product/sistema-operativnogo-postoyannogo-toka/sistemy-raspredeleniya-postoyannogo-toka/kompleks-monitoringa-operativnogo-toka/kompleks-monitoringa-sistemy-operativnogo-toka-kmsot-m-dubna/>.

25. Eliseev S.V., Gozbenko E.V., Bykova N.M., Sobolev V.I., et al. *Obespechenie bezopasnosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem (tekhnologicheskie podkhody). Deponirovannaya rukopis'*. VINITI RAN № 328-V2008 17.04.2008. [Ensuring the safety of complex technical systems (a technological approach). The deposited manuscript. VINITI RAS. No. 328-B2008 April 17, 2008].

Информация об авторах

Пузина Елена Юрьевна – канд. техн. наук, доцент кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; доцент кафедры электроснабжения и электротехники, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, e-mail: lena-rus05@mail.ru

Information about the authors

Elena Yu. Puzina – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof. at the Subdepartment of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; Assoc. Prof. at the Subdepartment of Power Supply and Electrical Engineering, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: lena-rus05@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.2(70).104-112

УДК 629.4.051.2

Адаптивная подсыпка песка на локомотиве

С. П. Круглов✉, С. В. Ковыршин, П. Ю. Иванов, С. А. Исупов

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ kruglov_s_p@mail.ru

Резюме

В статье предложен путь совершенствования системы защиты от боксования и юза (на примере борьбы с боксованием) современного локомотива, который связан только с подсыпкой песка. Вместо широко используемого метода автоматического управления подсыпкой по релейному принципу, предлагается создать плавное регулирование этого процесса, построенное на адаптивном методе управления. Последний основывается на алгоритме текущей параметрической идентификации математической модели объекта управления с использованием неявной эталонной модели и «упрощенных» условий адаптируемости. Такое управление нацелено на ликвидацию боксования колесных пар локомотива в необходимых случаях с минимально возможным расходом песка, что повышает экономическую эффективность перевозок. Предполагается, что управление автоматически формируется и отрабатывается в условиях неопределенности текущих характеристик сцепления колеса с рельсом, некоторых параметров поезда, угла наклона пути и др. (или только приблизительной информации о них), что является типичной ситуацией на практике. Указанное управление было построено и исследовано на математической модели процесса боксования, сведенной к одной колесной паре локомотива, которая описана в первой части статьи. Это позволяет упростить рассмотрение сути предлагаемого метода без снижения общности выводов для более сложных постановок задач защиты от боксования. Приведены модельные примеры функционирования предлагаемого закона управления пескоподачей для типовых случаев появления боксования: на разгоне поезда при превышении тяги над силой сцепления и при подъеме поезда в гору с наездом на масляные пятна на рельсах. Полученные теоретические выводы и результаты модельных исследований показывают эффективность предложенного адаптивного метода управления пескоподачей и возможность построения несложной микропроцессорной системы управления пескоподачей, дополняющей штатную систему локомотива, направленную на устранение боксования.

Ключевые слова

система защиты от боксования и юза, подсыпка песка, текущая неопределенность, адаптивная система управления, алгоритм идентификации

Для цитирования

Круглов С.П. Адаптивная подсыпка песка на локомотиве / С. П. Круглов, С. В. Ковыршин, П. Ю. Иванов, С. А. Исупов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 2 (70). – С. 104–112. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).104-112

Информация о статье

поступила в редакцию: 02.03.2021, поступила после рецензирования: 07.03.2021, принята к публикации: 21.03.2021

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания по государственной работе «Адаптивная система автоматического управления с повышенной эффективностью тормозами пассажирских и высокоскоростных поездов» № 121050600026-9 от 06.05.2021

The adaptive adding of sand for a locomotive wheelset

S. P. Kruglov✉, S. V. Kovyrshin, P. Y. Ivanov, S. A. Isupov

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ kruglov_s_p@mail.ru

Abstract

The article proposes a way to improve the protection system against wheel spinning and skidding (by the example of the fight against wheel spinning) of a modern locomotive, which is connected only with adding sand. Instead of the widely used method of automatic control of adding sand according to the relay principle, it is proposed to build a smooth regulation based on an adaptive control method. The latter is based on the algorithm of the current parametric identification of the mathematical model of the control object using an implicit reference model and “simplified” adaptability conditions. This control aims to eliminate the wheel spinning in necessary cases with the minimum possible consumption of sand, which increases the economic efficiency of transportation. It is assumed that the control is automatically generated and operated under conditions of uncertainty of the current characteristics of the wheel-rail adhesion, some train parameters, path inclination angle, etc. (or only approximate information about them), which is a typical situation in practice. Said control was built and investigated using a mathematical model of the wheel spinning process reduced to one locomotive wheelset that is described in the first part of the article. This simplifies consideration of the essence of the proposed method without reducing the commonality of conclusions on the more complex formulation of protective tasks on wheel spinning. Model examples of the functioning of the proposed sand supply control law for typical cases of wheel spinning are given: during the acceleration of the train when the traction exceeds the clutch force and when a train climbs uphill, running over oil spots on rails. The obtained theoretical conclusions and the results of model studies show the effectiveness of the proposed adaptive method of the sand adding control and the possibility of constructing a simple microprocessor system of sand adding control, which complements the standard locomotive system aimed at eliminating wheel spinning.

Keywords

wheel spinning and skidding protection system, sand supply, current uncertainty, adaptive control system, identification algorithm

For citation

Kruglov S. P., Kovyrshin S. V., Ivanov P. Y., Isupov S. A. Adaptivnaya podсыпка peska na lokomotive [The adaptive adding of sand for a locomotive wheelset]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 2 (70), pp. 104–112. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).104-112

Article Info

Received: 02.03.2021, Revised: 07.03.2021, Accepted: 21.03.2021

Acknowledgements

This work is performed within the framework of the state assignment for the state service "The adaptive system of increased efficiency for the automatic brake control of passenger and high-speed trains" No. 12105060026-9 dated May 06, 2021"

Введение

Боксование и юз колесных пар локомотива до сих пор является неразрешенной в достаточной степени проблемой. Наиболее часто эти явления наблюдаются у электровозов с грузовым составом, реже – с пассажирским. Эти явления напрямую связаны с безопасностью движения, нарушением заданных режимов разгона и торможения, износом рельсов, колесных пар, оборудования локомотива и др. [1–5]. Решение этой проблемы особенно актуально для Восточно-Сибирской железной дороги, имеющей горно-перевальные участки с достаточно крутыми подъемами и спусками.

Современные локомотивы имеют специальные системы защиты от боксования и юза [6], но им присущи недостатки. Рассмотрим один из них, важный в контексте настоящей работы. Для устранения боксования и юза одним из типовых решений является автоматическая подсыпка песка в область контакта колеса с рельсом, повышающая коэффициент сцепления. Однако она реализована в виде релейного управления (без непрерывной текущей регули-

ровки степени пескоподачи [7]). Конечно, в системе имеется ручная регулировка интенсивности пескоподачи, но машинист локомотива не в состоянии непрерывно следить за изменяющимися быстротечными процессами, моментально и правильно регулировать подачу песка, в результате, как правило, происходит перерасход песка. Пропущенный момент начала боксования приводит к необходимости сброса силы тяги. Это особенно нежелательно на подьеме, поскольку может привести к остановке поезда, что связано с проблемами трогания тяжелого грузового состава в этих условиях, а также повышению затрат электроэнергии при управлении поездом [8].

Кроме того, релейность управления приводит к значительному перерасходу песка, поскольку текущая ситуация со сцеплением колеса не всегда требует максимальной пескоподачи. Это снижает экономическую эффективность использования локомотивов, поскольку подготовка песка имеет достаточно затратную технологию (транспортировка с места

добычи, просеивание, сушка, калибровка, экипировка локомотива и пр.).

В силу указанного, налицо весома актуальность создания непрерывной (не релейной) автоматической системы управления пескоподачей на локомотиве, которая обеспечивала бы эффективное устранение боксования и юза колесных пар с минимально необходимым расходом песка.

Очевидным решением здесь является использованием хорошо известных и широко применяемых в автоматике пропорционально – интегрально – дифференцирующих регуляторов (ПИД- (ПИ)-регуляторов) [9]. Однако, как показывает опыт предварительных исследований, такие регуляторы для минимального расхода песка требуют перестройки своих коэффициентов по меняющимся характеристикам боксования и юза. Это в силу текущей неопределенности характеристик обычными способами выполнить нельзя. Поэтому в данной работе предлагается построить адаптивную систему управления пескоподачей, способной выполнять возлагаемые на нее задачи в условиях текущей неопределенности указанных характеристик. В данной работе рассматривается задача защиты от боксования.

Математическая модель боксования, приведенная к колесной паре локомотива

Для упрощения рассуждений будем рассматривать только одну колесную пару локомотива с осредненными характеристиками. Это прием, позволяющий рассмотреть суть предлагаемого метода, без снижения его общности (в силу своих адаптивных свойств) для других постановок задачи управления подсыпкой песка при устранении боксования. С этой же целью будем считать, что сцепка вагонов является абсолютно жесткой, а состав вагонов представляет собой единую массу. Примем, что поезд движется по прямой линии без поворотов.

Описание свойств указанной колесной пары локомотива рассмотрим на основе (рис. 1), представляющее собой вид колесной пары сбоку на рельсе с присоединенной и отнесенной к ней массы локомотива и вагонов.

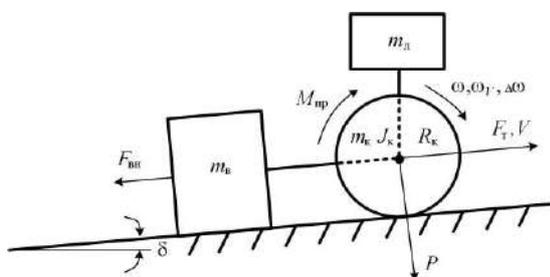


Рис. 1. Математическая модель динамики движения при боксовании

Fig. 1. Mathematical model of the dynamics of movement during wheel spinning

На рисунке обозначено: m_k, J_k, R_k – масса и осевой момент инерции колесной пары, а также радиус колеса соответственно; m_l, m_b – масса локомотива и вагонов, отнесенная к одной колесной паре, определяются по полной массе локомотива и вагонов соответственно, делением на количество колесных пар локомотива; δ – угол наклона пути; $P = (m_l + m_b)g \cos\delta$ – сила давления колесной пары на рельсы; g – ускорение свободного падения; $M_{пр}$ – приводной момент, приложенный к колесной паре от тягового электродвигателя; V – линейная скорость центра колесной пары (линейная скорость поезда); ω – угловая скорость колесной пары; $\omega_v = V/R_k$ – угловая скорость колесной пары, соответствующая линейной скорости; $\Delta\omega = \omega - \omega_v \geq 0$ – угловая скорость боксования колесной пары; $F_t, F_{вн}$ – сила тяги, создаваемая колесной парой, и внешняя сила, обусловленная трением и наклоном пути (также отнесенные к одной колесной паре подобным указанным выше образом).

Известно [2], что если сцепление определяется только кривой $\psi(\varepsilon)$, то максимальная сила тяги ($F_{t \max}$) определяется зависимостью

$$F_{t \max} = \psi(\varepsilon)P, \quad (1)$$

где ψ – коэффициент сцепления; ε – относительная скорость скольжения колесной пары, определяемая равенством

$$\varepsilon = \frac{\Delta\omega}{\omega_v} = \frac{\omega R_k}{V} - 1. \quad (2)$$

Коэффициент сцепления зависит не только от ε , но и от многих других факторов: скорости движения, состояния рельса и бандажа колес, загрязненности рельса масляными пятнами, его увлажненности, искривления пути и др. Зависимость $\psi(\varepsilon)$ имеет сложный нелинейный характер с двумя максимумами в области малых и больших чисел ε (далее будем считать, что существует только первый), имеет неоднозначное поведение при увеличении ε и его снижении [1–5].

В силу построения адаптивной системы управления, способной подстраиваться под реальные текущие характеристики и нацеленной на борьбу с боксованием, далее будем рассматривать типовую зависимость $\psi(\varepsilon)$ в области небольших значений ε для приводного двигателя с последовательным возбуждением (рис. 2) [10]. Эта зависимость характеризуется следующими параметрами: $\varepsilon_{кр} \approx 0,03$ – критическое значение относительной скорости

скольжения, соответствующее $\psi_{\max} \approx 0,32$ – максимальному значению коэффициента сцепления.

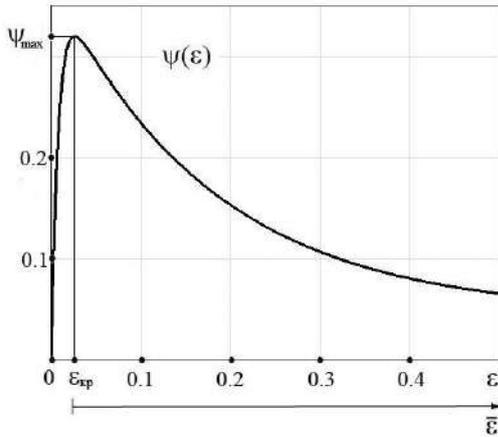


Рис. 2. Типовая зависимость коэффициента сцепления от относительной скорости скольжения
Fig. 2. Typical characteristic of adhesion factor versus relative sliding speed

Следует отметить, что величина $\varepsilon_{кр}$ может быть разной в зависимости от внешних условий – от 0,005 до 0,12 [2, 4, 5].

Приведенную зависимость можно аппроксимировать соотношением (с погрешностью не более нескольких процентов):

$$\psi(\varepsilon) = \left[(1 - e^{-\varepsilon/0,008}) \cdot (0,331e^{-5,64\varepsilon} + 0,046) \right]. \quad (3)$$

Одним из эффективных способов повышения коэффициента сцепления является подача песка. В силу нацеленности работы на создание системы управления пескоподачей для предотвращения боксования, будем считать, что общее значение коэффициента сцепления ($\psi_{\Sigma}(\varepsilon)$), совместно с (3), будет определяться зависимостью:

$$\psi_{\Sigma}(\varepsilon) = \psi(\varepsilon) + \Delta\psi_{п} + \Delta\psi_{вн}, \quad (4)$$

где $\Delta\psi_{п} \geq 0$ – повышение коэффициента сцепления путем подачи песка в область контакта колеса с рельсом (известно, что подача песка позволяет увеличить коэффициент сцепления в 1,4 раза [11]); $\Delta\psi_{вн} \leq 0$ – снижение коэффициента сцепления из-за разнообразных внешних причин, природа которых уже была указана ранее.

В силу малости участка нарастания функции $\psi(\varepsilon)$ для синтеза закона управления будем вместо величины ε рассматривать $\bar{\varepsilon}$ (см. рис. 2):

$$\bar{\varepsilon} = \begin{cases} \varepsilon, & \text{при } \varepsilon \geq \varepsilon_{кр}; \\ 0, & \text{при } \varepsilon < \varepsilon_{кр}. \end{cases} \quad (5)$$

Примем, что внешняя сила, определяемая трением и наклоном пути, определяется зависимостью:

$$F_{вн} = F_{с.т.} + k_{тр}V + m_{\Sigma}g \sin\delta, \quad (6)$$

где $F_{с.т.}$ – сила сухого трения, $k_{тр}$ – коэффициент вязкого трения (обе величины приведены к одной колесной паре локомотива), $m_{\Sigma} = m_{п} + m_{к} + m_{в}$.

Также будем считать, что приводной момент формируется в соответствии с зависимостью, основанной на хорошо известных характеристиках приводного электродвигателя:

$$M_{пр} = M_{зад} - k_M \Delta\omega, \quad (7)$$

где $M_{зад}$ – заданный приводной момент, формируемый машинистом локомотива, k_M – коэффициент, учитывающий известное снижение приводного момента за счет развивающейся угловой скорости колесной пары, в частности, боксования.

Далее введем в рассмотрение расчетные значения: $\omega_{расч}$, $F_{т.расч}$, $V_{расч}$, $\psi_{расч}$, соответствующие ω , F_T , V , ψ при отсутствии боксования: $\Delta\omega \equiv 0$, $\bar{\varepsilon} \equiv 0$. Также их можно назвать требуемыми значениями для отсутствия боксования при заданных внешних величинах $M_{пр} \equiv M_{зад}$ и $F_{вн}$.

В соответствии уравнениями динамики движения поезда [2] и (1), можно записать:

$$\begin{cases} F_{т.расч} = \frac{M_{зад}}{R_k}; & \dot{V}_{расч} = \frac{M_{зад}/R_k - F_{вн}}{m_{\Sigma}(1 + \gamma)}; \\ \psi_{расч} = \frac{M_{зад}}{R_k P}; & \dot{\omega}_{расч} = \frac{\dot{V}_{расч}}{R_k}, \end{cases} \quad (8)$$

где $\gamma = J_k / (R_k^2 m_{\Sigma})$ – коэффициент, учитывающий вращательное движение.

На основе этих соотношений рассмотрим динамику движения рассматриваемого объекта в общем случае, когда возможно боксование. Рассмотрим два случая.

1. Когда $\psi_{расч} \leq \psi_{\Sigma}$ – боксования нет, при этом по исходным установкам и (8):

$$\bar{\varepsilon} \equiv 0, \quad \Delta\omega \equiv 0, \quad F_T = F_{т.расч}, \quad \dot{V} = \dot{V}_{расч}, \quad \dot{\omega} = \dot{\omega}_{расч}. \quad (9)$$

Величина ψ_{Σ} определяется по (2)–(4) при подстановке значений из (9).

2. Если $\psi_{расч} > \psi_{\Sigma}$ – налицо боксование. Рассмотрим две дополнительные величины, связанные с этим случаем: $\Delta M_{пр}$ – превышение приводного момента над максимальным значением, соответствующим максимальной силе сцепления в данных условиях, которое порождает срыв сцепления колеса и бок-

сование. На основании (1), (4), (7), (8), и баланса моментов вращательного движения, можно записать:

$$\Delta\psi \triangleq \psi_{\text{расч}} - \psi_{\Sigma} = \psi_{\text{расч}} - (\psi(\bar{\varepsilon}) + \Delta\psi_{\Pi} + \Delta\psi_{\text{вн}}); \quad (10)$$

$$\Delta M_{\text{пр}} \triangleq PR_{\text{к}} \Delta\psi = J_{\text{к}} \Delta\dot{\omega} + k_M \Delta\omega.$$

Учитывая эти величины, принятые определения, а также (3) и (4), найдем остальные переменные, описываемые динамикой движения с боксованием. Они вместо (9) описываются как

$$\begin{cases} (J_{\text{к}}/k_M) \Delta\dot{\omega} + \Delta\omega = (PR_{\text{к}}/k_M) \Delta\psi; \\ F_{\text{т}} = (M_{\text{зад}} - PR_{\text{к}} \Delta\psi)/R_{\text{к}}; \\ \dot{V} = \frac{1}{m_{\Sigma}(1+\gamma)} \left(\frac{M_{\text{зад}} - PR_{\text{к}} \Delta\psi}{R_{\text{к}}} - F_{\text{вн}} \right); \\ \varepsilon = \Delta\omega/\omega_V = \Delta\omega R_{\text{к}}/V; \quad \omega = V/R_{\text{к}} + \Delta\omega. \end{cases} \quad (11)$$

Синтез закона управления

Поскольку в поставленной задаче контролируемым процессом является боксование, рассмотрим первую зависимость в системе (11), описывающую динамику угловой скорости боксования при развитии этого явления. С учетом (4) запишем ее в виде:

$$\Delta\dot{\omega} = -\frac{k_M \Delta\omega}{J_{\text{к}}} + \frac{PR_{\text{к}}}{J_{\text{к}}} (\psi_{\text{расч}} - \psi(\bar{\varepsilon}) - \Delta\psi_{\Pi} - \Delta\psi_{\text{вн}}). \quad (12)$$

Примем следующие допущения. По характеру кривой (см. рис. 2), описывающей коэффициент сцепления (2), а также увеличение этого коэффициента путем подсыпки песка опишем в виде:

$$\begin{cases} \psi(\bar{\varepsilon}) \approx \psi_{\text{max}} - c\bar{\varepsilon} \approx \psi_{\text{max}} - (cR_{\text{к}}/V) \Delta\omega; \\ \Delta\psi_{\Pi} \approx k_{\Pi} u, \end{cases} \quad (13)$$

где c, k_{Π} – коэффициенты пропорциональности, $u \in [0, 1]$ – управляющее воздействие системы управления подсыпкой в виде степени открытия форсунки песочницы локомотива.

Первое приближение – условное, справедливость которого объясняется свойствами синтезируемого управления пескоподачей с небольшим отходом величины ε от $\varepsilon_{\text{кр}}$ при $\varepsilon \geq \varepsilon_{\text{кр}}$.

Подставляя зависимости (13) в (12), учитывая определение $\bar{\varepsilon}$, (6) и (7), а также то, что скорость поезда и заданное значение тяги за небольшое время автоматической процедуры гашения боксования практически не изменится, можно динамику боксования описать в виде:

$$\Delta\dot{\omega} \approx a_1 \Delta\omega + a_2 - bu, \quad (14)$$

где $a_1 = -k_M/J_{\text{к}} + c PR_{\text{к}}^2/(J_{\text{к}} V)$,

$a_2 = M_{\text{зад}}/J_{\text{к}} - (\psi_{\text{max}} + \Delta\psi_{\text{вн}}) PR_{\text{к}}/J_{\text{к}}$,

$b = k_{\Pi} PR_{\text{к}}/J_{\text{к}}$ – неизвестные параметры объекта

управления (14) (считаем, что имеется возможность определить переменные $\Delta\omega, \Delta\dot{\omega}$). Найти последнюю можно, например, пропуская сигнал $\Delta\omega$ через реальное дифференцирующее звено (в представленном ниже примере – с постоянной времени 0,01 с) [12].

Для формализации требования к свойствам боксования назначаем неявную устойчивую эталонную модель, соответствующую аperiodическому звену [12]:

$$\begin{cases} \Delta\dot{\omega}_M = a_M (\Delta\omega_M - \Delta\omega_{\text{зад}}), \quad \Delta\omega_M(t_0) = \Delta\omega(t_0); \\ \Delta\omega_{\text{зад}} = (\varepsilon_{\text{кр}} - \Delta\varepsilon) V/R_{\text{к}}, \end{cases} \quad (15)$$

где $\Delta\omega_M, \Delta\omega_{\text{зад}}$ – модельное и заданное поведение угловой скорости боксования соответственно, последнее соответствует несколько меньшему значению, чем $\varepsilon_{\text{кр}}$ (за счет назначаемого параметра $\Delta\varepsilon > 0$).

Это, с одной стороны, необходимо для значения коэффициента сцепления, близкого к максимальному, а с другой – для исключения высокочастотных колебаний при превышении $\varepsilon_{\text{кр}}$ и начале срыва сцепления колеса с рельсом [13]. Указанный эффект можно использовать также для текущего определения величины $\varepsilon_{\text{кр}}$.

Если бы параметры объекта (14) были априорно известны, то при возникновении боксования закон управления пескоподачей

$$u = -b^{-1} [(a_M - a_1) \Delta\omega - a_M \Delta\omega_{\text{зад}} - a_2]$$

обеспечил бы приблизительную тождественность поведения угловой скорости боксования ($\Delta\omega$) эталонному сигналу $\Delta\omega_M$. Это легко проверить, подставляя этот закон управления в (14).

Поскольку параметры объекта (14) неизвестны, то вместо указанного закона управления сформируем закон, построенный на текущих оценках неизвестных параметров (верхним символом « $\hat{\cdot}$ » обозначены оценки соответствующих параметров):

$$u = -\hat{b}^{-1} [(a_M - \hat{a}_1) \Delta\omega - a_M \Delta\omega_{\text{зад}} - \hat{a}_2]. \quad (16)$$

Текущие оценки предлагается определять с помощью простого надежного, всегда устойчивого рекуррентного метода [14]:

$$\begin{cases} \hat{\theta}_i = \hat{\theta}_{i-1} + \eta_i y_i \mu_i; \quad \mu_i = z_i - y_i^T \hat{\theta}_{i-1}; \\ \hat{\eta}_i = \lambda / (y_i^T y_i + \vartheta), \end{cases} \quad (17)$$

где индекс $i = 1, 2, 3, \dots$ – указывает на дискретные моменты времени с шагом Δt ; $\hat{\theta}_i = [\hat{a}_{1i}, \hat{a}_{2i}]^T$ – вектор искомых оценок; верхний индекс « T » означает транспонирование; $y_i = [\Delta\omega_i, 1]^T$ – вектор регрессоров, соответствующий искомым оценкам; μ_i

– невязка идентификации; $z_i = \Delta\dot{\omega}_i + \hat{b}u_i$ – отклик объекта, где оценка \hat{b} определяется отдельно (показано ниже); $0 < \lambda \leq 1$ – назначаемый коэффициент усиления алгоритма; ϑ – малое положительное число, исключающее деления на ноль.

«Упрощенные» условия адаптируемости сводятся к тому, чтобы \hat{b} – оценка параметра при управлении в (13), в частности, удовлетворяла условиям [15, 16]:

$$\text{sign}(\hat{b}) = \text{sign}(b); |b|/2 \leq |\hat{b}| \leq 2|b|; d\hat{b}/dt \rightarrow 0, \quad (18)$$

а невязка идентификации стремилась к нулю, что алгоритм (17) достаточно «легко» выполняет. Кроме того, закон управления (16) удовлетворяет минимуму управляющей величины в интегральном квадратичном смысле.

При определении параметра $b = k_{\Pi} PR_k / J_k$ указанные условия на практике удовлетворить достаточно просто в силу известных свойств алгоритма идентификации по сходимости невязки идентификации [15], а также наличия, как правило, априорной информации с высокой точностью о составляющих указанного выражения. Последнее определяется тем, что параметры P, R_k, J_k входят в паспортные данные локомотива, а значение k_{Π} можно приблизительно определить из диапазонов изменений величин u и $\Delta\psi_{\Pi}$. Целесообразно оценку \hat{b} назначать постоянной из указанного в (18) диапазона и исключить ее из процедуры идентификации, как это реализовано в алгоритме (17).

Пример

Рассмотрим грузовой поезд с 2-секционным локомотивом ВЛ85 (12 колесных пар, масса 276 т, максимальная тяга 932 кН) [17] с общим весом поезда 6 300 т.

Для этих условий параметры модели (1)–(14) следующие: $R_k = 0,625 \text{ м}$, $J_k = 1560 \text{ кг м}^2$, $P = 226 \text{ кН}$, $m_k + m_{\Pi} = 23 \text{ т}$, $m_b = 502 \text{ т}$. Примем, что максимальное изменение коэффициента сцепления за счет подсыпки песка равно 0,11, или $\approx \psi_{\max}/3$ (см. рис. 2). Отсюда $k_{\Pi} = 0,11$.

Из [18] по зависимости удельной силы сцепления для принятых условий следует: $F_{с.т.} = 3\,360 \text{ Н}$, $k_{тр} = 164 \text{ Нс/м}$. Также принимаем для эталонной модели (14) $a_m = -100 \text{ с}^{-1}$, $\Delta\varepsilon = 0,01$. Параметры алгоритма идентификации (16): $\Delta t = 0,01 \text{ с}$ (с этим временным шагом также рассчитывался закон управления (15)), $\lambda = 0,7$, $\vartheta = 0,001$, $\hat{b} = 0,6b$ (другие значения этой оценки из ограничений (18)

практически не изменяют представленного качества управления).

Для моделирования динамики прохождения сигнала управления в системе, сформированный сигнал управления (16) перед подачей на объект управления пропускался через звено транспортной задержки 0,003 с (моделирование работы вычислителя) и апериодическое звено с единичным коэффициентом усиления и постоянной времени 0,1 с (моделирование динамики исполнительного устройства пескоподачи).

Далее (рис. 3–6) представлены результаты исследования предлагаемой системы управления пескоподачи для двух случаев боксования: в начале движения поезда, когда машинист превысил тягу, и при постоянной его скорости на подъеме, когда локомотив наезжает на масляные пятна на рельсах. Моделирование проводилось в среде Matlab.

Развитие боксования при трогании поезда с указанной динамикой формирования $M_{\text{зад}}$ (угол наклона пути нулевой), когда отключена подсыпка песка, представлено на (рис. 3). Этому режиму движения по [18] соответствует максимальный приводной момент одной колесной пары $M_{\text{пр макс}} = 78 \text{ кНм}$, $k_M = 36 \text{ кНмс}$.

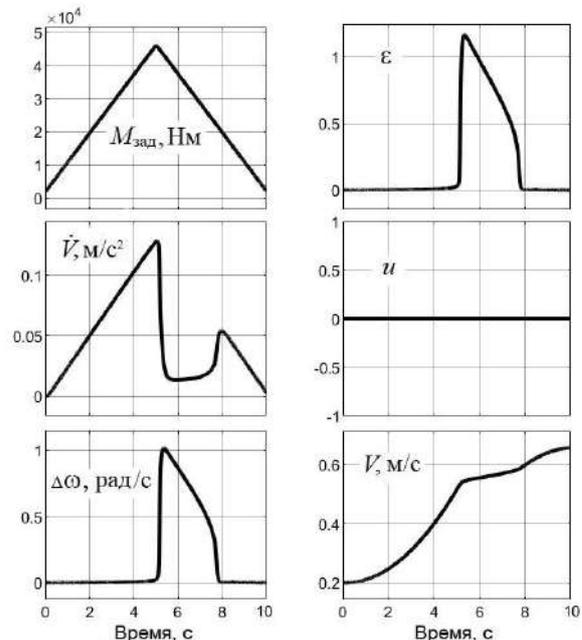


Рис. 3. Динамика развития боксования при трогании поезда (без подсыпки песка)

Fig. 3. The dynamics of the development of wheel spinning when starting the train (without adding sand)

Мы можем наблюдать значительную развивающуюся угловую скорость боксования и относительную скорость проскальзывания. За счет боксования

ускорение линейного движения поезда имеет «провал». При исследовании смоделировано снижение тяги машинистом при обнаружении боксования.

На (рис. 4) тот же процесс (для сравнения), но при работе адаптивного управления подсыпкой песка. Можно видеть достаточно малый расход песка (около 1,5 %) и в достаточно короткий промежуток времени. Как было указано ранее, если бы пескоподача была выполнена штатной релейной системой, то уровень пескоподачи был бы близок к 100 %.

На (рис. 5) представлены значения коэффициента сцепления, соответствующих указанным исследованиям: а – без подсыпки песка, б – с подсыпкой. Последний указывает на то, что подсыпка песка реализуется по минимально необходимому принципу:

$$\Psi_{\text{расч}} \cong \Psi_{\Sigma}$$

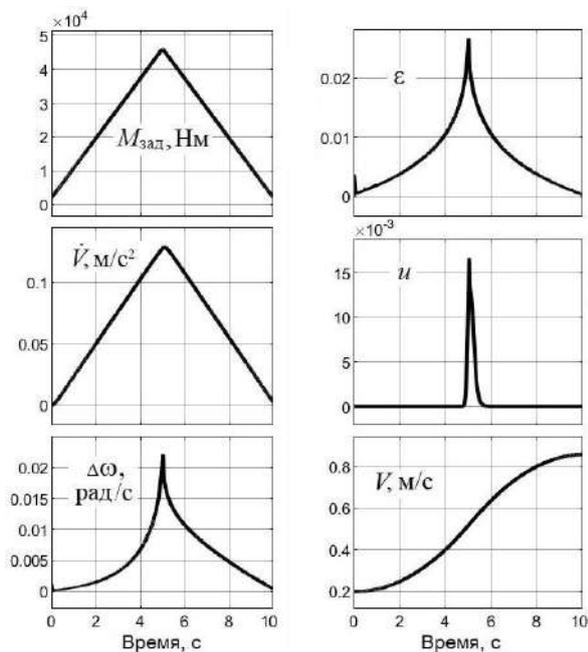


Рис. 4. Динамика развития боксования при трогании поезда с адаптивной подсыпкой песка
Fig. 4. Dynamics of the development of wheel spinning when starting a train with adaptive sand filling

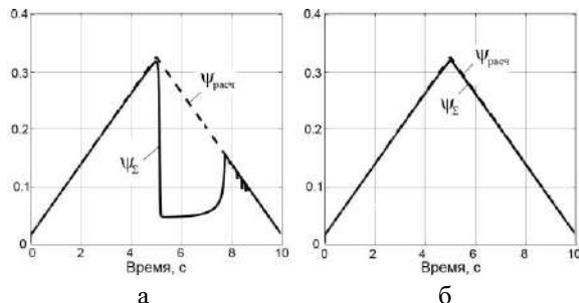


Рис. 5. Соотношение коэффициента сцепления:
а – без подсыпки песка; б – с подсыпкой
Fig. 5. The ratio of the adhesion factor:
а – without adding sand; б – adding sand

На (рис. 6) смоделировано движение поезда с постоянной скоростью 11 м/с или 40 км/ч ($M_{\text{зад}} = 23 \text{ кНм}$) с наклоном пути, соответствующим 6 ‰. Этому режиму движения по [18] соответствует $M_{\text{пр max}} = 38 \text{ кНм}$, $k_M = 7,96 \text{ кНмс}$.

Моделируется наезд на масляные пятна на рельсах в виде представленного сигнала $\Delta\psi_{\text{вн}}$ (рис. 6). Серыми линиями отмечены переменные при отсутствии подсыпки песка, черными – при адаптивной подсыпке. Здесь также выполняется $\Psi_{\text{расч}} \cong \Psi_{\Sigma}$.

Как указывалось ранее, на практике машинист в рассматриваемом режиме движения включает подсыпку песка постоянно, как правило, с максимальной степенью ($\approx 100\%$). Либо использует штатную автоматику релейного включения подсыпки песка со степенью пескоподачи, также близкой к 100 %. При реализации адаптивной подсыпки песка в рассматриваемом случае получаем расход песка не более 30 % от максимального и только в необходимые моменты времени.

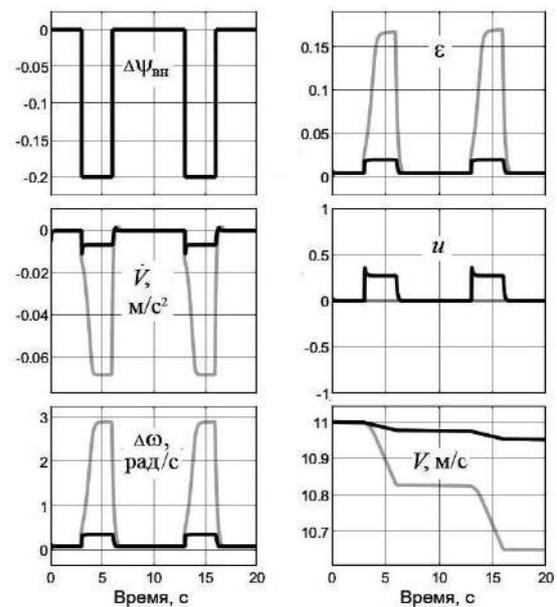


Рис. 6. Динамика развития боксования при исходной постоянной скорости поезда
Fig. 6. Dynamics of the development of wheel spinning at the initial constant speed of the train

Подобные результаты были получены и при других условиях движения поезда и отличных от представленных параметров локомотива.

Заключение

Модельные исследования предлагаемой системы управления пескоподачей показывают ее эффективность по быстрому подавлению развивающегося боксования в условиях априорной неопределенно-

сти параметров объекта управления и внешних возмущений. При этом обеспечивается минимально необходимый расход песка. В силу схожести физики процессов можно утверждать, что подобный алгоритм пескоподачи обеспечит защиту и от юза при торможении поезда в тех же условиях и с подобными свойствами.

Способность системы управления подстраиваться к текущим характеристикам, указывает на неприципиальность допущений в математическом описании рассматриваемых процессов, в том числе нелинейные зависимости подачи песка в исполнительный форсунке, характеристики песка и др.

Предлагаемый алгоритм управления достаточно прост и может быть реализован на несложном микроконтроллерном вычислителе. Для работы алгоритма управления требуются датчики измерения угловой скорости вращения колесных пар и датчик линейной скорости поезда. Для реализации непрерывного регулирования уровнем пескоподачи можно предложить исполнительный контур системы управления со штатным релейным управлением локомотива, только в режиме широтно-импульсной модуляции. Последнее требует использования более быстродействующих реле, например, твердотельных. Рассмотренный в работе метод реализации адаптивной подсыпки песка может быть несложным образом интегрирован в штатную систему локомотива по защите от боксования и юза.

Список литературы

1. Kalker J.J. Survey of wheel-rail rolling contact theory // *Vehicle system dynamics*. 1979. Vol. 5. P. 317–358.
2. Теория электрической тяги : учебник для ВУЗов ж.-д. транспорта / С.И. Осипов, С.С. Осипов, В.П. Феоктистов. М. : Маршрут, 2006. 436 с.
3. Magel E., Kalousek J. The Application of Contact Mechanics to Wheel/Rail Profile Design. Proceedings of the 5th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems. Tokyo, 2000. P. 245–252.
4. Основные принципы управления системой противоюзовой защиты современного подвижного состава / Г.В. Гогричани, А.В. Казаринов, В.В. Михеев и др. // *Вестник ВНИИЖТ*. 2003. № 3. С. 14–21.
5. Самме Г.В. Фрикционное взаимодействие колесных пар локомотива с рельсами. Теория и практика сцепления локомотива : монография. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2014. 104 с.
6. Бабков Ю.В., Базилевский Ф.Ю., Грищенко А.В. Автоматизация локомотивов : учеб. пособие для вузов ж.-д. транспорта. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2007. 323 с.
7. Дядичко Г.П. Электровоз магистральный 2ЭС5К(3ЭС5К) : руководство по эксплуатации. Книга 1. Описание и работа. Новочеркасск, 2006. 267 с.
8. Иванов П.Ю., Хамнаева А.А., Худоногов А.М. Снижение энергопотребления электровоза при управлении пневматическими тормозами грузового поезда // *Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта : материалы третьей междунар. науч.-практ. конф.* 2018. С. 143–151.
9. Astrom K.J., Hagglund T. Advanced PID control // *ISA. The Instrumentation Systems and Automation. Society*. 2006. 461 p.
10. Ляпушкин Н.Н. Прогнозирование сцепных свойств локомотивов с различными типами тяговых электродвигателей : автореф. дис. ... д-ра. техн. наук. М. : МИИТ, 2014. 46 с.
11. Теория электрической тяги / В.Е. Розенфельд, И.П. Исаев, Н.Н. Сидоров и др. М. : Транспорт, 1995. 294 с.
12. Первозванский А.А. Курс теории автоматического управления. СПб. : Лань, 2015. 624 с.
13. Савоськин А.Н., Чучин А.А. Исследование процессов срыва сцепления и буксования в тяговом приводе I класса // *Моделирование транспортных процессов*. 2009. № 2. С. 47–55.
14. Graupe D. Identification of Systems. Huntington. New York : Krieger, 1976. 276 p.
15. Круглов С.П. Условия адаптируемости систем управления с идентификатором и эталоном. Саарбрюккен : LAP LAMBERT, 2012. 125 с.
16. Круглов С.П. Сходимость невязки идентификации в системе управления с параметрической адаптацией // *Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами : электр. науч. журн.* 2019. № 1.40. С. 27–40. URL: <http://ismm-irgups.ru/toma/12-2019> (дата обращения: 30.04.2021).
17. Раков В.А. Грузовые двенадцатиосные электровозы ВЛ85 // *Локомотивы и моторвагонный подвижной состав железных дорог Советского Союза 1976–1985*. М. : Транспорт, 1990.
18. Правила тяговых расчетов для поездной работы : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 12.05.2016 № 867р в редакции распоряжения ОАО «РЖД» от 09.02.2018 № 182/р. 516 с.

References

1. Kalker J.J. Survey of wheel-rail rolling contact theory. *Vehicle system dynamics*, 1979. Vol. 5. Pp. 317–358.
2. Osipov S.I., Osipov S.S., Feoktistov V.P. *Teoriya elektricheskoi tyagi: uchebnik dlya VUZov zh.-d. transporta* [Electrical traction theory: a textbook for railway transport universities]. Moscow. Marshrut Publ., 2006. 436 p.
3. Magel E., Kalousek J. The application of contact mechanics to wheel/rail profile design. Proceedings of the 5th International conference on contact mechanics and wear of rail/ wheel systems. Tokyo, 2000. Pp. 245–252.
4. Gogrichiani G.V., Kazarinov A.V., Mikheev V.V., Kurtsev S.B. Osnovnye printsipy upravleniya sistemoi protivoyuzovoi zashhityi sovremennogo podvizhnogo sostava [Basic principles of control of the anti-skidding protection system of the modern rolling stock], *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2003. No. 3. Pp. 14–21.

5. Samme G.V. Friksionnoe vzaimodeistvie kolesnykh par lokomotiva s rel'sami. Teoriya i praktika stsepleniya lokomotiva: monografiya [Friction interaction of locomotive wheel pairs with rails. Theory and practice of locomotive adhesion: monograph]. Moscow: FGBOU "Training and Methodological Center for Education in Railway Transport" Publ., 2014. 104 p.
6. Babkov Yu.V., Bazilevskii F.Yu., Grishhenko A.V. Avtomatizatsiya lokomotivov: Uchebnoe posobie dlya vuzov zh.-d. transporta [Locomotive Automation: a textbook for Railway Universities transport]. Moscow: GOU "Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport" Publ., 2007. 323 p.
7. Dyadichko G.P. Elektrovoz magistral'nyi 2ES5K(3ES5K). Rukovodstvo po ekspluatatsii. Kniga 1. Opisanie i rabota [Electric locomotive main 2ES5K (3ES5K). An operating manual. Book 1. Description and Operation], Novocherkassk, 2006. 267 p.
8. Ivanov P.Yu., Khamnaeva A.A., Khudonogov A.M. Snizhenie energopotrebleniya elektrovoza pri upravlenii pnevmaticheskimi tormozami gruzovogo poezda [Reduction of electric locomotive power consumption during control of freight train pneumatic brakes]. "Razrabotka i ekspluatatsiya elektrotekhnicheskikh kompleksov i sistem energetiki i nazemnogo transporta". Materialy tret'ei mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii ["Development and operation of electrical engineering complexes and power and ground transport systems". Proceedings of the Third International Scientific and Practical Conference], 2018. Pp. 143–151.
9. Astrom K.J., Hagglund T. Advanced PID control. ISA. The Instrumentation Systems and Automation Society. 2006. 460 p.
10. Lyapushkin N.N. Prognozirovaniye scepnykh svoystv lokomotivov s razlichnymi tipami tyagovykh elektrodvigateli. Avtoreferat diss. na soisk. uch. st. d. t. n. [Prediction of coupling properties of locomotives with various types of traction motors. Abstract of the D. Sc. (Engineering) diss.], Moscow: MIIT Publ., 2014. 46 p.
11. Rozenfel'd V.E., Isaev I.P., Sidorov N.N., Ozerov M.I. Teoriya elektricheskoi tyagi [Electrical traction theory]. In Isaev I.P. (ed) Moscow: Transport Publ., 1995. 294 p.
12. Pervozvanskii A.A. Kurs teorii avtomaticheskogo upravleniya [Automatic control theory course]. St. Petersburg, Lan` Publ., 2015. 624 p.
13. Savos'kin A.N., Chuchin A.A. Issledovanie protsessov sryva stsepleniya i buksovaniya v tyagovom privode I klassa [Investigation of clutch failure and spinning processes in the Class I traction drive]. Modelirovaniye transportnykh protsessov [Transport process modeling], 2009. No. 2. Pp. 47–55.
14. Graupe D. Identification of Systems. Huntington, New York: Krieger. 1976. 276 p.
15. Kruglov S.P. Usloviya adaptiruemosti sistem upravleniya s identifikatorom i etalonom [Conditions of the adaptability of control systems with the identifier and a standard]. A monograph. Saarbrücken: LAP LAMBERT, 2012. 125 p.
16. Kruglov S.P. Skhodimost' nevyazki identifikatsii v sisteme upravleniya s parametricheskoi adaptatsiei [Convergence of the identification mismatch in a parametric adaptation control system]. «Informatsionnye tekhnologii i matematicheskoe modelirovaniye v upravlenii slozhnyimi sistemami»: elektron. nauch. zhurn [Information technology and mathematical modeling in complex systems management: the electronic scientific journal], 2019. No. 1 (40). Pp. 27–40 [Electronic media]. URL: <http://ismm-irgups.ru/toma/12-2019>.
17. Rakov V.A. Gruzovye dvenadsatits'nye elektrovozy VL85 [Cargo twelve-axle electric locomotives VL85]. Lokomotivy i motorvagonnyi podvizhnoi sostav zheleznykh dorog Sovetskogo Soyuza 1976–1985 [Locomotives and motor-car rolling stock of the railways of the Soviet Union in 1976–1985], Moscow, Transport Publ., 1990.
18. Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoi raboty. Utverzhdeny Rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 12.05.2016 No. 867r v redaktsii Rasporyazheniya OAO "RZhD" ot 09.02.2018 No. 182/r. [Rules of traction calculations for train work. Approved by the Order of Russian Railways dated 12.05.2016 No. 867r as amended by the Order of Russian Railways dated February 09, 2018 No. 182/r.]. 516 p.

Информация об авторах

Круглов Сергей Петрович – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры автоматизации производственных процессов, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: kruglov_s_p@mail.ru

Ковыршин Сергей Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации производственных процессов, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: sergkow@mail.ru

Иванов Павел Юрьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: savl.ivanov@mail.ru

Исупов Станислав Андреевич – аспирант кафедры автоматизации производственных процессов, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: vcvlvoo@gmail.com

Information about the authors

Sergei P. Kruglov – Doctor of Engineering Science, Professor of the Subdepartment of Automation of Production Operations, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: kruglov_s_p@mail.ru

Sergei V. Kovyreshin – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Subdepartment of Automation of Production Operations, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: sergkow@mail.ru

Pavel Yu. Ivanov – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Subdepartment of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: savl.ivanov@mail.ru

Stanislav A. Isupov – Ph.D. student of the Subdepartment of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: vcvlvoo@gmail.com

Применение метода «дерево решений» в диагностике неисправности двигателя внутреннего сгорания автомобиля

О. В. Кузьмин✉, В. А. Голиков

Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ quzminov@mail.ru

Резюме

При современном уровне развития автотранспортного парка на первое место выходят вопросы обеспечения безотказности, надежности и экологичности автомобиля, которые призваны обеспечивать безопасность его эксплуатации. Основным агрегатом автомобиля, на долю которого приходится наибольшее число отказов, является двигатель внутреннего сгорания. Надежность работы двигателей зависит не только от их конструкции, технологии изготовления, условий эксплуатации автомобилей, но в большой степени от организации и качества их обслуживания. Для повышения качества эксплуатационных характеристик двигателя внутреннего сгорания важную роль играет своевременная и достоверная диагностика его технического состояния с своевременной организацией регламентных мероприятий, которые определяются по результатам диагностирования. Можно утверждать, что своевременная диагностика неисправностей двигателя и поддержание его эксплуатационных характеристик на качественно высоком уровне, является важнейшим условием бесперебойной работы автотранспортных средств. В ходе эксплуатации автомобильного транспорта часто возникают различные отклонения в работе двигателя внутреннего сгорания как в процессе движения, так и при работе на холостом ходу. Количество таких отклонений вариативно и зависит от различного сочетания возникших неисправностей механизмов и систем. Возникшие сочетания неисправностей требуют индивидуального подхода к их выявлению. Даже для опытных водителей и механиков, которые хорошо знают принципы работы систем и механизмов двигателя, поиск неисправностей представляет сложность. В подобных случаях используют средства диагностирования. В данной статье рассмотрен один из способов представления правил в иерархической, последовательной структуре – метод деревьев принятия решений, где каждому объекту соответствует единственный узел, дающий решение. Приводятся общие принципы и примеры использования данного метода в задачах диагностики технического состояния двигателя автомобиля. Рассматриваются вопросы экспертной диагностики технического состояния двигателя внутреннего сгорания автомобиля в условиях автосервиса. Предложено дерево решений при низкой величине давления масла в двигателе. Может быть использовано при создании баз знаний для работников станций технического обслуживания автомобилей.

Ключевые слова

иерархическая структура, частично упорядоченное множество, обобщенная пирамида Паскаля, метод «Дерево решений», автомобиль, двигатель внутреннего сгорания, техническое обслуживание, диагностика, автосервис

Для цитирования

Кузьмин О. В. Применение метода «Дерево решений» в диагностике неисправности двигателя внутреннего сгорания автомобиля / О. В. Кузьмин, В. А. Голиков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 2 (70). – С. 113–120. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).113-120

Информация о статье

поступила в редакцию: 05.03.2021, поступила после рецензирования: 11.03.2021, принята к публикации: 16.03.2021

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области в рамках научного проекта № 20-41-385001

Application of a “decision tree” method in the diagnostics of faults of the internal combustion engine of a motor vehicle

O. V. Kuz'min✉, V. A. Golikov

Irkutsk State University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ quzminov@mail.ru

Abstract

At the current level of development of the motor vehicle fleet, the first place is given to the issues of ensuring the reliability, reliability and environmental friendliness of the motor vehicle, which are designed to ensure the safety of its operation. The main motor vehicle unit, which accounts for the largest number of failures, is the internal combustion engine (ICE). The reliability of engines depends not only on their design, manufacturing technology, vehicle operating conditions, but to a large extent on the

organization and quality of their service. To improve the quality of the operational characteristics of the internal combustion engine, an essential role is played by timely and reliable diagnostics of its technical condition with the timely organization of regulatory measures, which are determined by the results of diagnostics. It can be argued that timely diagnostics of engine malfunctions and maintaining its performance characteristics at a high-quality level is the most important condition for the smooth operation of motor transport vehicles. During the operation of road transport, various deviations in the operation of the internal combustion engine often occur both during the movement and idle condition. The number of such deviations is variable and depends on a different combination of faults of mechanisms and systems. The resulting combinations of faults require an individual approach to their identification. Even for experienced drivers and mechanics who are well aware of the principles of engine systems and mechanisms, troubleshooting is difficult. In such cases diagnostic tools are used. This article discusses one of the ways to represent rules in a hierarchical, sequential structure – the method of decision trees, where each object corresponds to a single node that gives a decision. It gives the general principles and examples of the use of this method in the problems of diagnosing the technical condition of the engine of a motor vehicle. The paper also considers the issues of expert diagnostics of the technical status of the internal combustion engine of a motor vehicle in the condition of the car service station. A decision tree is proposed for low oil pressure in the engine. It can be used to create knowledge bases for employees of car service stations.

Keywords

hierarchical structure, partially ordered set, generalized Pascal pyramid, a “decision tree” method, automobile, internal combustion engine, maintenance, diagnostics, car service

For citation

Kuz'min O. V., Golikov V. A. Primenenie metoda “Derevo reshenii” v diagnostike neispravnosti dvigatelya vnutrennego sgoraniya avtomobilya [Application of a “decision tree” method in the diagnostics of faults of the internal combustion engine of a motor vehicle]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 2 (70), pp. 113–120. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).113-120

Article Info

Received: 05.03.2021, Revised: 11.03.2021, Accepted: 16.03.2021

Acknowledgements

The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research and the Government of the Irkutsk Region within the scientific project No. 20-41-385001

Введение

В последние годы неуклонно растет интерес к теории «больших систем», с которыми приходится иметь дело в самых различных областях науки и техники. Важным направлением исследования таких «больших» или «сложных» систем является рассмотрение их как многоуровневых систем или систем с иерархической структурой [1, 2]. Процесс поэтапного построения решения многокритериальных задач с иерархическими структурами часто может быть интерпретирован как траектория на конечной решетке [3–5], описывающая соответствующее ему частично упорядоченное множество [6]. Подобные задачи нередко встречаются при разработке методов автоматического анализа больших массивов данных в информационных системах и обработке сетей и бесконечных графов [7–12].

В статье [13] предложена схема построения комбинаторных чисел и полиномов на основе иерархической пирамидальной структуры с весами, названной обобщенной пирамидой Паскаля. В [14] широко известная техника теории частично упорядоченных множеств Рота – Стенли [4] применяется для исследования целого ряда комбинаторных объектов, описываемых схемой [13].

В данной работе, относящейся к области разработки методов анализа иерархических систем и их приложений в задачах принятия решений при диа-

гностике, изучаются алгоритмы построения дихотомической классификационной модели – бинарного «дерева решений», каждый узел которого имеет только двух потомков.

Построение «деревьев решений» (классификации) – один из основных и наиболее эффективных в настоящее время инструментов интеллектуального анализа данных и предсказательной аналитики. Он помогает в решении задач классификации и регрессии, а также задач, в которых отсутствует априорная информация о виде зависимости между исследуемыми данными. Иерархическое строение дерева классификации – одно из наиболее важных его свойств.

Первые идеи создания «деревьев решений» восходят к работам П. Ховленда (P. Hoveland) и Е. Ханта (E. Hunt) конца 50-х гг. XX в. Самая ранняя и наиболее известная из них – основополагающая монография Ханта и др. [15], давшая импульс развитию этого направления.

В статьях, посвященных применению метода «Дерево решений» при принятии решения о причине неисправности двигателя внутреннего сгорания (ДВС), обычно приводятся одна или несколько диаграмм, в которых наглядно продемонстрирована структура анализа технического состояния [16–19].

В данной статье рассматриваются общие принципы этого метода и области его применения в за-

дачах диагностики технического состояния ДВС автомобиля.

Основные понятия и соотношения

Обобщенной пирамидой Паскаля (или W-пирамидой) [13] называется иерархическая трехгранная пирамидальная структура W с весами, элементы которого удовлетворяют рекуррентным соотношениям

$$W(n, k, l) = \alpha_{n,k-l} W(n-1, k-1, l) + \beta_{n,k,l-1} W(n-1, k, l-1) + \gamma_{n,k,l} W(n-1, k, l) \quad (1)$$

с граничными условиями $W(0, 0, 0) = W_0, W(n, k, l) = 0$, если $\min(n, k, l, n-k-l) < 0$.

Частным случаем обобщенной пирамиды Паскаля является обобщенный треугольник Паскаля (или V-треугольник) [13], определяемый как иерархическая треугольная структура V с весами, элементы которого удовлетворяют рекуррентным соотношениям

$$V(n, k) = \alpha_{n,k-1} V(n-1, k-1) + \beta_{n,k} V(n-1, k) \quad (2)$$

с граничными условиями $V(0, 0) = V_0, V(n, k) = 0, V(n, k) = 0$, если $\min(n, k, n-k) < 0$ [13, 20–24].

Иерархическая структура V с весами, которую описывает соотношение (2), приведена далее (рис. 1), для краткости обозначим $V(n, k) = V_{nk}$.

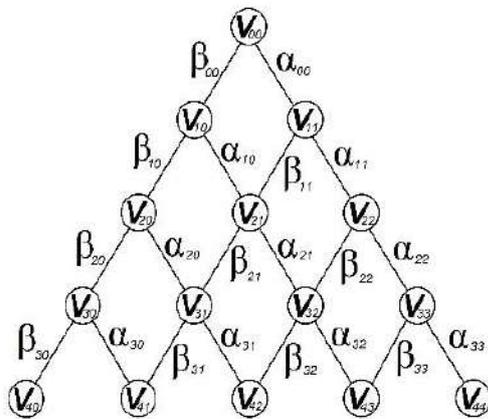


Рис. 1. Иерархическая структура обобщенного треугольника Паскаля
Fig. 1. The hierarchical structure of the generalized Pascal's triangle

Формулы (1) и (2) допускают перечислительные интерпретации в терминах решеточных путей, которые, в свою очередь, могут быть использованы при анализе решеточных структур [25, 26].

Согласно [27] основной принцип, на котором базируются методы поиска на «дереве решений», состоит в декомпозиции начальной задачи P_0 на не-

которое число подзадач P_1, \dots, P_k с последующей попыткой решить каждую из них:

1. Найти оптимальное решение задачи P_i , если оно определяется очевидным образом.
2. Показать, что решать задачу P_i не имеет смысла, поскольку значение оптимального решения для P_i заведомо хуже, чем для наилучшего из ранее найденных решений.
3. Показать, что подзадача P_i не является допустимой.

Это разбиение описывается деревом, где вершины изображают подзадачи (рис. 2).

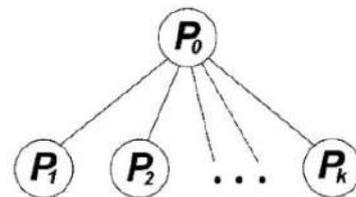


Рис. 2. Разбиение задачи P_0 на подзадачи
Fig. 2. Breaking problem P_0 into subtasks

Идея декомпозиции P_0 на подзадачи P_1, \dots, P_k состоит в том, что эти подзадачи или проще, или они имеют меньший размер, или обладают структурой, не присущей P_0 . Если подзадачу P_i нельзя решить, то она также разбивается на новые подзадачи $P_{i_1}, P_{i_2}, \dots, P_{i_r}$, (рис. 3). Это разбиение (ветвление) повторяется для каждой подзадачи, которая не может быть решена.

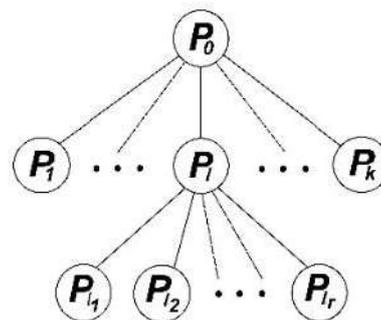


Рис. 3. Дерево после ветвления в вершине P_i
Fig. 3. The tree after branching at the vertex P_i

На любом этапе полное множество подзадач, требующих решения, представляется множеством конечных вершин (т. е. вершин степени 1) всех цепей, исходящих из корня P_0 дерева решений. Эти

вершины называются висячими вершинами, например, $P_1, \dots, P_i, P_{i_2}, \dots, P_i, \dots, P_k$ (см. рис. 3).

Если поиск исчерпан, то множество подзадач, на которые разбита задача, должно представлять все пространство подзадач исходной задачи.

Под операцией стягивания ребра понимаем отождествление смежных вершин u и v в графе G .

Как показано в [28], посредством задания весов, множества запрещенных вершин (запрещенных позиций [3]) и последующего стягивания ребер, иерархическая треугольная структура, описываемая соотношением (2), может быть преобразована в соответствующее «дерево решений» (рис. 4–5).

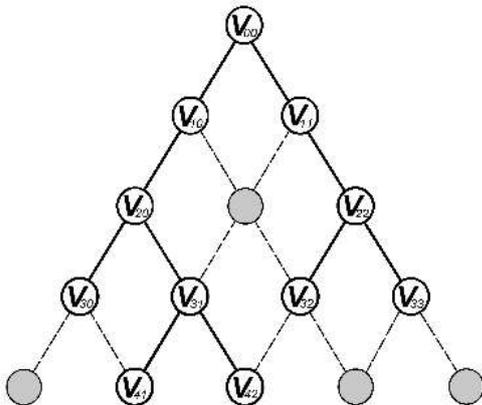


Рис. 4. Обобщенный треугольник Паскаля V
Fig. 4. Generalized Pascal's triangle V

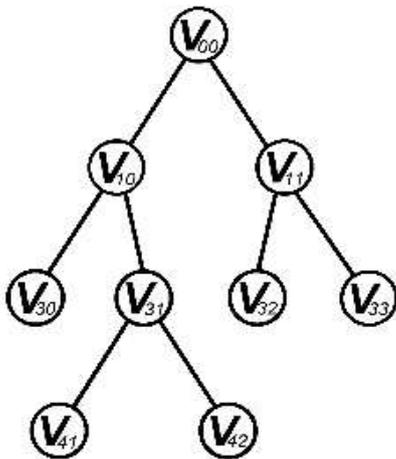


Рис. 5. Дерево решений с запрещенными позициями
Fig. 5. Decision tree with forbidden positions

На (рис. 5) показано дерево решений, полученное из V стягиванием ребер $\{V_{1,1}, V_{2,0}\}$ и $\{V_{1,0}, V_{2,2}\}$.

Неопределенность и процесс диагностирования

Практика ремонта автомобилей – есть принятие решений. Поскольку результат диагностики техни-

ческого состояния автомобиля заранее не определен, работники станции технического обслуживания (СТО) часто встают перед выбором.

Метод «Дерево решений» – количественно выраженные альтернативные возможности, доступные на каждой ступени обсуждения проблемы, могут изображаться в виде ветвей, иерархическая последовательность которых образует «дерево решений». Это графический метод, используемый в анализе принятия решений: набор возможных решений изображается в виде ветвей, а последующие исходы – в виде дочерних ветвей. Решения и вероятные исходы представлены в наиболее вероятном порядке их развития. Точки, в которых необходимо принять решения, называются узлами.

Простейшие деревья решений хороши своей наглядностью. Они не оперируют вероятностями или весами. Для решения реальных задач часто используют усложненные и дополненные модификации деревьев решений.

Метод дерева решений применяется в задачах классификации и прогнозирования, когда решения приходится принимать в условиях риска, неопределенности и исход событий зависит от вероятностей. На каждое решение влияют какие-то определенные факторы, и у каждого решения есть свои последствия, которым присущ вероятностный характер.

Вероятность: альтернативный способ выражения неопределенности

Большую часть оценок работник СТО делает на основе личного опыта, сравнивая имеющуюся проблему со встречавшимися ранее и на основании технической документации и приборов для диагностики технического состояния автомобиля. Термины, используемые работниками СТО для описания вероятности поломки автомобиля, имеют для разных людей различные значения (рис. 6).

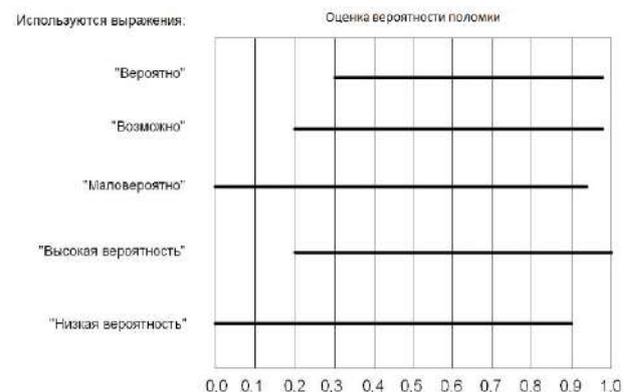


Рис. 6. Вероятность и используемые работниками станции технического осмотра выражения для нее
Fig. 6. The likelihood and expressions used by the technical inspection station staff for it

Сравнение неопределенных перспектив

Проблемы принятия решений в диагностике технического состояния двигателя автомобиля часто не могут быть решены с помощью обоснований. Например, когда исход ремонта непредсказуем, диагносту нужен метод для выбора вида ремонта. Для разрешения таких сложных проблем можно использовать два метода: «Дерево решений» – метод представления и сравнения ожидаемых исходов для каждого возможного варианта действий, и пороговую вероятность – метод решения того, может ли новая информация изменить определяющее решение [28]. Эти методы помогают внести ясность в проблему принятия решений и таким образом выбрать вариант ремонта, который с наибольшей вероятностью устранит неисправность.

Построение «дерева решений» на примере диагностики двигателя внутреннего сгорания

Рассмотрим вопросы диагностики неисправностей, влияющих на работу двигателя и связанных с ним систем автомобиля.

Серьезное повреждение двигателя может быть

вызвано низким значением давления масла. Как известно всем опытным автолюбителям для бесперебойной работы подшипников и минимизации трения подвижные элементы мотора должны постоянно смазываться.

Неопытные автолюбители могут допускать масляное голодание, что может привести к неисправности двигателя внутреннего сгорания (ДВС) [16]. При этом заметить недостаточное количество смазки в моторе довольно легко. Во многих современных автомобилях есть датчик давления масла, при недостатке смазки в ДВС данный датчик сигнализирует владельцу автомобиля о неисправности, посредством включения лампы предупреждения о нехватке масла. Также косвенными признаками масляного голодания двигателя могут служить: негативное изменение показателей мотора, трудности достижения необходимых значений мощности, наличие нехарактерного выхлопа, визуальные дефекты деталей, специфические звуки при запуске мотора.

Рассмотренные примеры указывают на различные неисправности отдельных узлов и агрегатов вследствие брака или некачественного ремонта. Указанные



Рис. 7. «Дерево решений» при низкой величине давления масла

Fig. 7. "Decision tree" at low oil pressure

признаки должны говорить водителю на неисправность, на которую автолюбитель должен обратить внимание и принять меры по их устранению.

Долгая работа двигателя при масляном голодании приводит к перегреву некоторых узлов и деталей, их отказу, а в дальнейшем к выходу из строя («заклиниванию») всего ДВС [17]. Для нормальной работы двигателя необходимо следить за показателем давления масла в системе. Низкая величина данной характеристики влечет к быстрому износу трущихся деталей. Важно наблюдать за состоянием коренных сальников, прокладок и шатунных подшипников, так как через зазоры в данных запасных частях зачастую и происходит утечка масла.

Приведем пример [16] «дерева решений» для диагностики технического состояния ДВС при низкой величине давления масла в двигателе (рис. 7).

Заключение

При принятии решения о ремонте двигателя автомобиля постоянно приходится учитывать вероятность угрожающих событий, сопряженных с вмешательством в механизм двигателя. Построение «дерева решений» позволяет наглядно продемонстрировать структуру данных и создать модель их классификации, какими бы громоздкими они ни были.

Предложенное «дерево решений» при низкой величине давления масла рекомендуется к применению для обнаружения предполагаемых причин и источников формирования отказа (нарушения работы) или для исследования вопросов возникновения конечного события с опорой на данные о достоверности исходных первичных событий.

Список литературы

1. Месарович М., Мако Д., Такаха И. Теория иерархических многоуровневых систем. М. : Мир, 1973. 344 с.
2. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М. : Радио и связь, 1993. 278 с.
3. Стенли Р. Перечислительная комбинаторика. М. : Мир, 1990. 434 с.
4. Биркгоф Г. Теория решеток. М. : Наука, 1984. 568 с.
5. Гретцер Г. Общая теория решеток. М. : Мир, 1982. 456 с.
6. Балагура А.А., Кузьмин О.В. Обобщенная пирамида Паскаля и частично упорядоченные множества // Обзорные приклад. и пром. математики. 2007. Т. 14, Вып. 1. С. 88–91.
7. Лебедев В.Б., Федотов Е.А. Моделирование данных информационных систем методами теории решеток // Изв. вузов. Поволж. регион. Сер. Техн. науки. 2015. № 3 (35). С. 104–110.
8. Басакер Р., Саати Т. Конечные графы и сети. М. : Наука, 1974. 368 с.
9. Евстигнеев В.А., Касьянов В.Н. Теория графов: алгоритмы обработки бесконечных графов. Новосибирск : Наука, 1998. 385 с.
10. Fidge C. J. Partial Orders for Parallel Debugging // ACM SIGPLAN Notices. 1989. Vol. 24. № 1. P. 183–194.
11. Ma T.-H., Spinrad J. P. Cycle-tree partial orders and chordal comparability graphs // Order. 1991. Vol. 8. № 1. P. 49–61.
12. Murthy S.K. Automatic construction of decision trees from data: A multidisciplinary survey // Data Min. Knowl. Discov., 1998. № 2(4). P. 345–389.
13. Кузьмин О.В. Обобщенные пирамиды Паскаля и их приложения. Новосибирск : Наука. Сиб. издат. фирма РАН, 2000. 294 с.
14. Kuzmin O.V., Balagura A.A., Kuzmina V.V., Khudonogov I.A. Partially ordered sets and combinatory objects of the pyramidal structure // Advances and Applications in Discrete Mathematics. 2019. Vol. 20. Is. 2. P. 229–242.
15. Hunt E.B., Janet Marin, Philip J.S. Experiments in Induction. N. Y. : Academic Press, 1966. 247 p.
16. Зайцева М.М., Кузьмин С.Е. Разработка деревьев решений диагностики различных неисправностей авторефрижераторов. Ч. 1 // Инженерный вестн. Дона, 2017. № 3 (46). С. 53. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/issue/130> (дата обращения 12.04.2021).
17. Смирнов Ю.А. Диагностика технического состояния автотранспортных средств. М. : ИНФРА-М, 2020. 180 с.
18. Огнев И.Г., Банных С.А. Алгоритмы поиска неисправностей двигателя без использования диагностического оборудования при нарушении правильного режима его работы // Теория и практика военного образования в гражданских вузах: педагогический поиск : сб. материалов I Всерос. науч.-практ. конф. Екатеринбург, 2019. С. 131–137.
19. Хрулев А.Э., Клименко В.Г. Особенности построения и применения логических методов поиска причин отказов поршневых двигателей внутреннего сгорания в эксплуатации // Авіаційно-космічна техніка і технологія. 2020. № 7(167). С. 146–157.
20. Балагура А.А., Кузьмин О.В. Обобщенные пирамиды Паскаля и их обратные // Дискретная математика. 2007. Т. 19, Вып. 4. С. 108–116.
21. Бондаренко Б.А. Обобщенные треугольники и пирамиды Паскаля, их фракталы, графы и приложения. Ташкент : Фан, 1990. 192 с.
22. Кузьмин О.В., Серёгина М.В. Верхние отсечения обобщенной пирамиды Паскаля и их интерпретации // Журн. Сиб. федер. ун-та. Математика и физика. 2010. Т. 3, Вып. 4. С. 533–543.
23. Кузьмин О.В., Серёгина М.В. Плоские сечения обобщенной пирамиды Паскаля и их интерпретации // Дискрет. математика. 2010. Т. 22, Вып. 3. С. 83–93.
24. Кузьмин О.В., Серёгина М.В. Восходящие сечения обобщенной пирамиды Паскаля и модели развития популяций // Обзорные прикладной и промышленной математики. 2010. Т. 17, Вып. 3. С. 430–432.

25. Kuzmin O.V., Khomenko A.P. and Artyunin A.I. Discrete model of static loads distribution management on lattice structures // *Advances and Applications in Discrete Mathematics*. 2018. Vol. 19. Is. 3. P. 183–193.
26. Kuzmin O.V., Khomenko A.P. and Artyunin A.I. Development of special mathematical software using combinatorial numbers and lattice structure analysis // *Advances and Applications in Discrete Mathematics*. 2018. Vol. 19. Is. 3. P. 229–242.
27. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. М. : Мир, 1978. 432 с.
28. Кузьмин О.В., Аталян А.В. Деревья принятия решений в задачах диагностики и прогнозирования // *Прикладные задачи дискретного анализа*. Иркутск, Изд-во ИГУ, 2019. С. 64–79.

References

1. Mesarović M.D., Macko D., Takahara Y. *Theory of hierarchical multilevel systems*. New York: Academic Press, 1970. 294 p. (Russ. ed.: Mesarovich M., Mako D., Takahara I. *Teoriya ierarkhicheskikh mnogourovnevnykh sistem*. Moscow: Mir Publ., 1973. 344 s.)
2. Saaty T.L. *The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation*. New York: McGraw-Hill, 1980. 287 p. (Saati T. *Prinyatie reshenii. Metod analiza ierarkhii*. Moscow: Radio i svyaz' Publ., 1993. 278 s.)
3. Stanley R.P. *Enumerative combinatorics, Vol. 1*. Cambridge University Press, Cambridge, 1997, 335 p. (Stenli R. *Perechislitel'naya kombinatorika*. Moscow: Mir Publ., 1990. 434 s.)
4. Birkhoff G. *Lattice theory*. American Mathematical Society, New York, 1967, 418 p. (Birkhof G. *Teoriya reshetok*. Moscow: Nauka Publ., 1984. 568 s.)
5. Grätzer G. *Lattice theory: Foundation*. Springer, Basel AG, 2011. 644 p. (Grettser G. *Obshchaya teoriya reshetok*. Moscow: Mir Publ., 1982. 456 s.)
6. Balagura A.A., Kuz'min O.V., Obobshchennaya piramida Paskalya i chastichno uporyadchennye mnozhestva [Generalized Pascal pyramid and partially ordered sets]. *Obozrenie prikladnoi i promyshlennoi matematiki [Surveys on applied and industrial mathematics]*, 2007. Vol. 14. No. 1. Pp. 88–91.
7. Lebedev V.B., Fedotov E.A. Modelirovanie dannykh informatsionnykh sistem metodami teorii reshetok [Information system data modeling using the lattice theory methods]. *Izv. vuzov. Povolzh. region. Ser. Tekhn. nauki. [University proceedings. The Volga region. Engineering sciences]*, 2015. No. 3 (35). Pp. 104–110.
8. Busaker R.G., Saaty T.L. *Finite graphs and networks: an introduction with applications*. Mc. Graw-Hill Book Company, New York, 1965. 294 p. (Russ. ed.: Basaker P., Saati T. *Konechnye grafy i seti*. Moscow: Nauka Publ., 1974. 368 p.)
9. Evstigneev V.A., Kasyanov V.N. Evstigneev V.A., Kas'yanov V.N. *Teoriya grafov: algoritmy obrabotki beskonturnykh grafov [Graph theory: algorithms for processing acyclic graphs]*. Nauka Publ., Novosibirsk, 1998. 385 p.
10. Fidge C.J. Partial orders for parallel debugging. *ACM SIGPLAN notices*, 1989. Vol. 24. No. 1. Pp. 183–194.
11. Ma T.-H., Spinrad J.P., Cycle-tree partial orders and chordal comparability graphs. *Order*, 1991. Vol. 8. No. 1. Pp. 49–61.
12. Murthy S.K. Automatic construction of decision trees from data: A multidisciplinary survey. *Data Min. Knowl. Discov.*, 1998. No. 2(4). Pp. 345–389.
13. Kuz'min O.V. Obobshchennye piramidy Paskalya i ikh prilozheniya [Generalized Pascal Pyramids and their Applications]. Nauka Publ., Novosibirsk, 2000. 294 p.
14. Kuz'min O.V., Balagura A.A., Kuz'mina V.V., Khudonogov I.A. Partially ordered sets and combinatory objects of the pyramidal structure. *Advances and Applications in Discrete Mathematics*, 2019. No. 20(2). Pp. 229–242.
15. Hunt E.B. Janet Marin and Philip J. Stone. *Experiments in Induction*. N. Y. : Academic Press, 1966. 247 p.
16. Zaitseva M.M., Kuz'min S.E. Razrabotka derev'ev reshenii diagnostiki razlichnykh neispravnoy avtorefrizheratorov. Ch. 1 [Development of decision trees for diagnosing various malfunctions of refrigerated trucks. Part 1]. *Inzhenernyi vestnik Dona [Engineering Bulletin of the Don]*, 2017, No. 3 (46). Pp. 53 [Electronic media]. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2017/4332>.
17. Smirnov Yu.A. Diagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya avtotransportnykh sredstv [Diagnostics of the technical condition of motor vehicles]. Moscow: INFRA-M Publ., 2020. 180 p.
18. Ognev I.G., Bannykh S.A. Algoritmy poiska neispravnoy dvigatelya bez ispol'zovaniya diagnosticheskogo oborudovaniya pri narushenii pravil'nogo rezhima ego raboty [Algorithms for troubleshooting the engine without the use of diagnostic equipment in case of violation of the correct mode of its operation]. *Teoriya i praktika voennogo obrazovaniya v grazhdanskikh vuzakh: pedagogicheskii poisk : sbornik materialov I Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Ekaterinburg, 10–12 dekabrya 2018 g.) [Theory and practice of military education in civil universities: pedagogical search: collection of materials of the I All-Russian Scientific and Practical Conference (Ekaterinburg, December 10–12, 2018)]*. Ekaterinburg: Ural University Publ., 2019. Pp. 131–137.
19. Khrulev A.E., Klimenko V.G. Osobennosti postroyeniya i primeneniya logicheskikh metodov poiska prichin otkazov porshnevnykh dvigatelei vnutrennego sgoraniya v ekspluatatsii [Features of construction and application of logical methods of searching for reasons for failures of internal combustion piston engines in operation]. *Aviatsiino-kosmichna tekhnika i tekhnologiya [Aviation and space engineering and technology]*, 2020. No. 7(167). Pp. 146–157.
20. Balagura A.A., Kuz'min O.V. Obobshchennye piramidy Paskalya i im obratnye [Generalized Pascal pyramids and their reciprocals]. *Diskretnaya matematika [Discrete mathematics and applications]*, 2007. Vol. 17. No. 6. Pp. 619–628.
21. Bondarenko B.A. *Generalized Pascal triangles and pyramids, their fractals, graphs, and applications*. The Fibonacci Association, Santa Clara. 2010. 296 p. (Russ. ed.: Bondarenko B.A. *Obobshchennye treugol'niki i piramidy Paskalya, ikh fraktali, grafy i prilozheniya*. Tashkent: Fan Publ., 1990. 192 s.)

22. Kuz'min O.V., Seryogina M.V. Verkhnie otsecheniya obobshchennoi piramidy Paskalya i ikh interpretatsii [Upper unit of the generalized Pascal pyramid and their interpretations]. *Zhurn. Sib. feder. un-ta. Matematika i fizika [Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics]*, 2010. Vol. 3. No. 4. Pp. 533–543.

23. Kuz'min O.V. and Seryogina M.V. Plane sections of the generalized Pascal pyramid and their interpretations. *Discrete Math.*, 2010. Appl. 20(4). Pp. 377–389 (Russ. ed.: Kuz'min O.V., Seregina M.V. Ploskie secheniya obobshchennoi piramidy Paskalya i ikh interpretatsii. *Diskret. Matematika*, 2010. T. 22, vyp. 3. S. 83–93).

24. Kuz'min O.V., Seregina M.V. Voskhodyashchie secheniya obobshchennoi piramidy Paskalya i modeli razvitiya populyatsii [Ascending sections of the generalized Pascal pyramid and population development models]. *Obozrenie prikladnoi i promyshlennoi matematiki [Surveys on applied and industrial mathematics]*, 2010. Vol. 17. No. 3. Pp. 430–432.

25. Kuz'min O.V., Khomenko A.P., Artyunin A.I. Discrete model of static loads distribution management on lattice structures. *Advances and Applications in Discrete Mathematics*, 2018. No. 19(3). Pp. 183–193.

26. Kuz'min O.V., Khomenko A.P., Artyunin A.I., Development of special mathematical software using combinatorial numbers and lattice structure analysis. *Advances and Applications in Discrete Mathematics*, 2018. No. 19(3). Pp. 229–242.

27. Christofides N. Graph theory: An algorithmic approach. Academic Press, London. 1975. 400 p. (Russ. ed.: Kristofides N. Teoriya grafov. Algoritmicheskii podkhod. Moscow: Mir Publ., 1978. 432 s.)

28. Kuzmin O.V., Atalyan A.V. Derev'ya prinyatiya reshenii v zadachakh diagnostiki i prognozirovaniya [Decision trees in the problems of diagnostics and forecasting]. *Prikladnye zadachi diskretnogo analiza [Applied problems of discrete analysis]*. Irkutsk, ISU Publ., 2019. Pp. 64–79.

Информация об авторах

Кузьмин Олег Викторович – д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой теории вероятностей и дискретной математики, Иркутский государственный университет, г. Иркутск, e-mail: quzminov@mail.ru

Голиков Вадим Александрович – магистрант, кафедра теории вероятностей и дискретной математики, Иркутский государственный университет, г. Иркутск, e-mail: captain.mekker@gmail.com

Information about the authors

Oleg V. Kuzmin – Dr. Sci. in Physics and Mathematics, Prof., Head of the Subdepartment of Probability Theory and Discrete Mathematics, Irkutsk State University, Irkutsk, e-mail: quzminov@mail.ru

Vadim A. Golikov – Master's degree student, the Subdepartment of Probability Theory and Discrete Mathematics, Irkutsk State University, Irkutsk, e-mail: captain.mekker@gmail.com

DOI 10.26731/1813-9108.2021.2(70).120-128

УДК 624.21/8

Совершенствование научно-технического сопровождения, мониторинга и контроля производства работ по устройству линейного транспортного сооружения

Е. В. Каимов✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ Eugen-Kaimov@yandex.ru

Резюме

Под функциональным качеством строительной продукции, включая объекты инфраструктуры линейных транспортных сооружений, подразумевается пригодность объектов к использованию по установленному (функционально-технологическому) назначению с обязательным соблюдением показателей эксплуатационной эффективности, надежности и безопасности. Обеспечение показателей функционального качества объектов транспортной инфраструктуры является постоянно актуальной задачей и требует привлечения различных методических приемов. Формирование функционального качества сопровождается образованием и функционированием многочисленных структурных элементов, входящих в состав сложной, комплексной и динамически изменяемой системы строительного производства. Как следствие этих особенностей, остаются актуальными инструменты методического совершенствования подходов по управлению функциональным качеством транспортных сооружений. В статье предлагается методическая основа для применения системного подхода к формированию и управлению показателями функционального качества в контексте научно-технического сопровождения. Процесс научно-технического сопровождения основных этапов жизненного цикла рассматриваемой строительной продукции представляется в виде укрупненного алгоритма осуществления контроля данных и разработки управляющих воздействий при выявлении недопустимых отклонений от установленного (нормируемого) уровня функционального качества строительной продукции. Методическую и практическую основу управления функциональным качеством составляют системотехнический подход к контролю процессов формирования и поддержания качества строительных объектов транспортной инфраструктуры и реализации алгоритма целенаправленного воздействия на неблагоприятные факторы, способные привести к отклонениям от установленных показателей. Основным результатом исследований является концепция системного и непрерывного выявления условий соответствия показателей функционального качества первоначальным значениям и предложение перехода на превентивное информационное моделирование особенностей свойств и возможных отклонений от проектируемых показателей функционального качества линейных транспортных сооружений, реализуемых в составе соответствующей программы научно-технического сопровождения. Область применения результатов исследований может быть распространена на процедуры и мероприятия по формирова-

нию и актуализации показателей функционального качества в составах информационных моделей функционального качества объектов транспортной инфраструктуры.

Ключевые слова

транспорт, линейные сооружения, научно-техническое сопровождение строительства, функциональное качество, система строительного производства, систематический контроль, управление качеством строительных объектов

Для цитирования

Каимов Е. В. Совершенствование научно-технического сопровождения, мониторинга и контроля производства работ по устройству линейного транспортного сооружения / Е. В. Каимов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 2 (70). – С. 120–128. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).120-128

Информация о статье

поступила в редакцию: 18.03.2021, поступила после рецензирования: 05.04.2021, принята к публикации: 15.04.2021

Development of scientific and technical support, monitoring and work production control on the arrangement of a linear transportation construction

E. V. Kaimov✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ Eugen-Kaimov@yandex.ru

Abstract

The functional quality of construction products, including linear transport structures, implies the suitability of these facilities for use at the established (functional and technological) purpose, with the obligatory observance of the current industry indicators of operational efficiency, reliability and safety. Ensuring efficiency, reliability and safety indicators is a constantly urgent task for the functioning transport infrastructure facilities. The formation of functional quality is accompanied by the synthesis and functioning of numerous structural elements that are part of a multi-component, complex and dynamically variable system of construction production. As a result of these features, tools for the methodological improvement of approaches for managing the functional quality of transport facilities remain relevant. This article proposes a methodological basis for applying a systematic approach to the formation and control of functional quality indicators in the context of a scientific and technical support. The process of a scientific and technical support at the main stages of the life cycle of the construction products under consideration is presented as an enlarged algorithm of data control and the development of management actions when unacceptable deviations from the established (normalized) level of functional quality of the construction products are identified. The methodological and practical basis of functional quality management is a systematic approach to the control of the processes of the formation and maintenance of the quality of construction objects of transport infrastructure and the implementation of an algorithm of a targeted impact on adverse factors that can result in deviations from the established indicators. The main result of the research is the concept of systematic and continuous detection of conditions of the compliance of functional quality indicators with initial values and the proposal to switch to preventive information modeling of the features of properties and possible deviations from the designed functional quality indicators of linear transport facilities, implemented as part of the corresponding scientific and technical support program. The scope of the research results can be extended to procedures and measures on the formation and updating of functional quality indicators within the information models of the functional quality of transport infrastructure facilities.

Keywords

transport, linear structures, scientific and technical support of construction, functional quality, system of construction operation, systematic control, quality management of construction projects

For citation

Kaimov E. V. Sovershenstvovanie nauchno-tekhnicheskogo soprovozhdeniya, monitoringa i kontrolya proizvodstva rabot po ustroystvu lineynogo transportnogo sooruzheniya [Development of scientific and technical support, monitoring and work production control on the arrangement of a linear transportation construction]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 2 (70), pp. 120–128. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).120-128

Article Info

Received: 18.03.2021, Revised: 05.04.2021, Accepted: 15.04.2021

Введение

В самом общем случае под научно-техническим сопровождением процессов формирования функци-

онального качества строительной продукции различной отраслевой принадлежности (включая объекты транспортной инфраструктуры) подразумева-

ется совокупность способов и методов решения задач и проблемных ситуаций, которые не отображены в действующих положениях нормативных документов. Проявления таких проблемных ситуаций возможны на любом из этапов жизненного цикла [1] формирования строительной продукции любого функционального назначения (рис. 1).

Методическую основу научно-технического сопровождения составляет системный подход как прогрессивное направление методологии научного познания, в основе которого лежит анализ свойств, состояний и поведения объекта исследований как системы или целостного комплекса взаимосвязанных структурных элементов. Важным аспектом системного подхода [2, 3] является создание единого и рационального алгоритма к изучению особенностей и закономерностей с целью получения наиболее полного и целостного представления о принятом объекте исследований (рис. 2).

Системный (системотехнический) подход в со-

ставе научно-технического сопровождения рассматривается как один из наиболее прогрессивных и эффективных методов управления процессами формирования функционального качества строительной продукции, включая инженерные сооружения в форматах линейных объектов транспортной инфраструктуры [4, 5].

Научно-техническая деятельность в отношении устройства линейных объектов транспортной инфраструктуры может включать:

- информационное обеспечение процессов формирования функционального качества строительной продукции;
- производство вариантного проектирования, проверочных или экспертных расчетов;
- разработку или имплементацию инновационных (не имеющих отечественного опыта применения) конструктивных, организационно-технологических решений;
- мониторинг и диагностику свойств и состояний

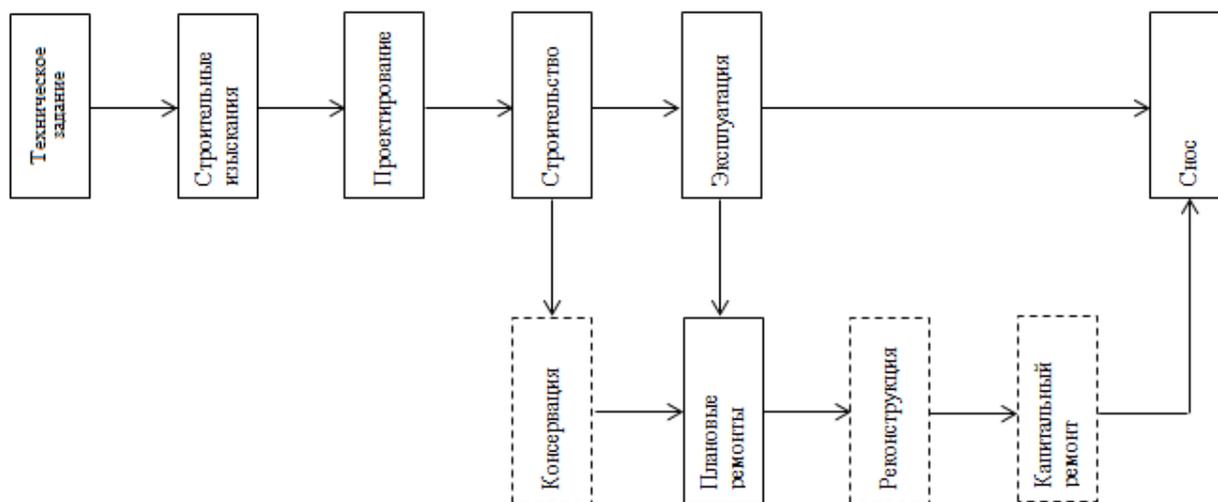


Рис. 1. Жизненный цикл формирования функционального качества строительной продукции
Fig. 1. The life cycle of the formation of the functional quality of construction products

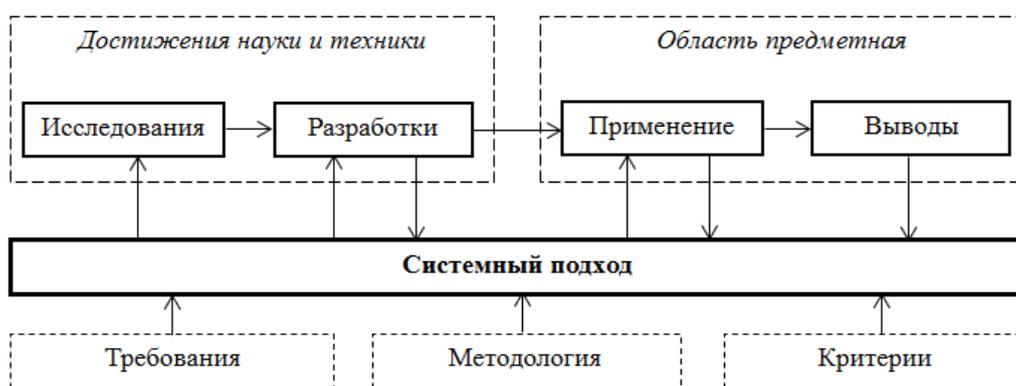


Рис. 2. Сущность и структура системного подхода к решению задач и проблемных ситуаций в строительстве

Fig. 2. The essence and structure of a systematic approach to solving problems and problematic situations in construction

объектов на различных этапах жизненного цикла;

– разработка рекомендаций по парированию проявлений возможных неблагоприятных факторов строительного производства;

– оценка пригодности к эксплуатации отдельных конструктивных элементов или завершенных строительством объектов, характеризующихся присутствием отклонений от установленных показателей функционального качества.

Расширение области применения научно-технического сопровождения в формате прогноза возможных изменений свойств и состояний позволит значительно повысить эффективность производства мониторинга, осуществляемого при устройстве линейных транспортных сооружений и пригодного для оценки последующей, эксплуатационной пригодности инфраструктурных объектов [6, 7].

Прогноз возможных особенностей состояния и свойств линейных сооружений транспортной инфраструктуры (и связанной с ним системы строительного производства) на этапе «строительство» жизненного цикла становится значительным фактором и условием, характеризующим принятие успешных управленческих решений по обеспечению функционального качества строительной продукции.

Особенности строительных процессов при устройстве (возведении) линейных сооружений транспортной инфраструктуры

Период устройства (возведения) является ключевым этапом жизненного цикла для обеспечения показателей функционального качества линейных транспортных сооружений различной технологической сложности и уровня ответственности [8, 9].

Далее представлена классификация строительных процессов, применяемых для формирования функционального качества при устройстве (возведении) линейных сооружений транспортной инфраструктуры (рис. 3).

Можно отметить, что структура и свойства строительных процессов при устройстве линейных сооружений характеризуются различными по значимости показателями технологичности и организационно-технологической надежности производства. Системный подход позволяет организовать согласование и взаимодействие разнообразных структурных элементов [3–5] в составе единой и целостной системы строительного производства для обеспечения установленных показателей функционального качества (рис. 4).

Система строительного производства линейных сооружений железнодорожного транспорта обеспечивает показатели функционального качества вы-

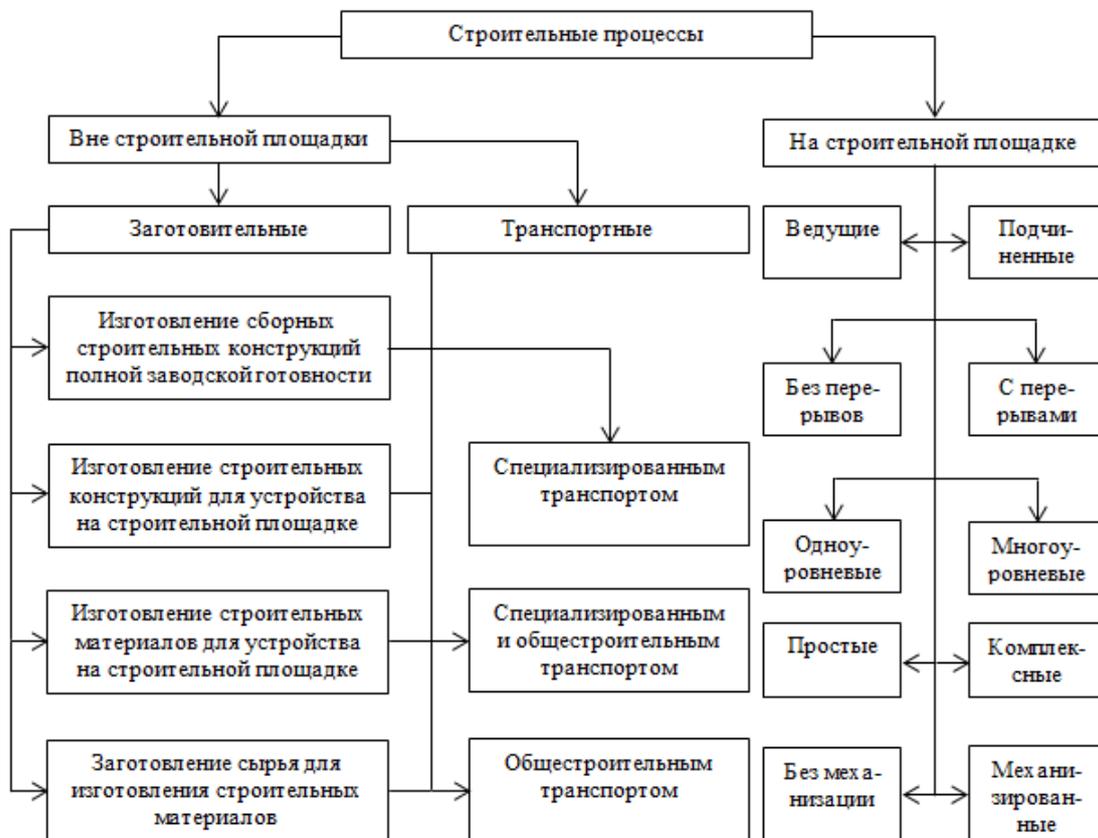


Рис. 3. Классификация строительных процессов по укрупненным, характерным признакам
Fig. 3. Classification of construction processes according to enlarged, characteristic features

полнения строительных процессов по возведению железнодорожного пути (включая устройство земляного полотна, верхнего строения пути, водопропускных сооружений), технологических сооружений, транспортных зданий.

Каждый из комплексов работ требует оптимизации индивидуальных особенностей выполнения отдельных строительных процессов, показателей организационно-технологической надежности и обязательного соответствия проектному уровню функционального качества конечной строительной продукции [9, 10].

Разработка мероприятий по формированию функционального качества строительной продукции посредством научно-технического сопровождения строительных процессов может осуществляться по следующим основным направлениям:

- своевременного внесения изменений и дополнений в состав первоначальной проектной документации;
- имплементации положений нормативных и законодательных актов в соответствующие разделы проектно-технологической документации (технологических карт, проектов производства работ);
- разработки отдельных (специальных) решений, отображающих реальные особенности производства работ, природно-климатические и инженерно-геологические условия, виды и способы обеспечения материально-техническими ресурсами;
- контроля качества материалов, изделий и конструкций;
- мониторинга состояния строительных объектов и окружающей среды.

Производство научно-технического сопровождения строительных процессов при устройстве линейных сооружений целесообразно осуществлять на основании предварительно разработанной и согласованной программы (программы научно-технического сопровождения), дополненной условиями проведения необходимых оперативных мероприятий, вызванных внезапными проблемными ситуациями.

Контроль параметров функционального качества

По отношению к устройству линейных сооружений строительные процессы, осуществляемые на строительной площадке (см. рис. 3), можно рассматривать и как способ формирования основной или промежуточной строительной продукции, и как метод устранения выявляемых отклонений функционального качества.

Разработка программы контроля показателей качества выполняемых операций (простых и комплексных строительных процессов) позволяет снизить трудозатраты на восстановление функционального качества линейных сооружений как на этапе возведения, так и на этапе эксплуатации завершенных строительством.

Далее представлен укрупненный алгоритм анализа контролируемых данных и разработки управляющих воздействий при выявлении недопустимых отклонений от установленного (нормируемого) уровня функционального качества строительной продукции (рис. 5).

Условие соответствия параметров простых или

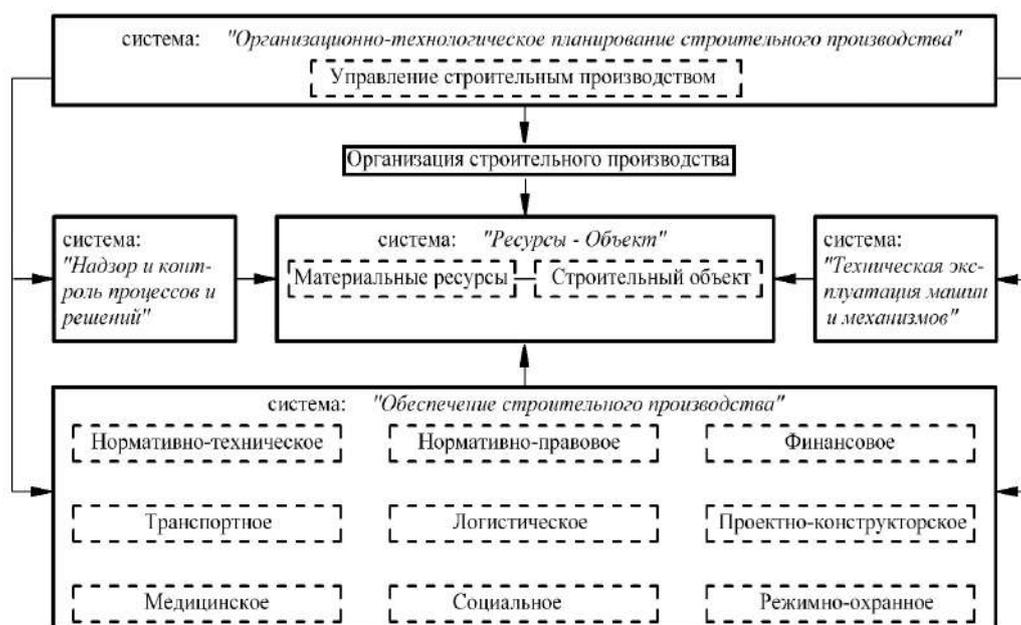


Рис. 4. Схема взаимодействия структурных элементов системы строительного производства

Fig. 4. Scheme of interaction of structural elements of the construction production system

комплексных строительных процессов установленным контрольным значениям, отображается обобщенными функциональными зависимостями:

$$\left. \begin{aligned} Q_i(t) < Q_{i\text{пр}} (i = 1..I); \\ M_j(t) < M_{j\text{пр}} (j = 1..J); \\ W_k(t) < W_{k\text{пр}} (k = 1..K). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь $Q_{i\text{пр}}$ – предельное значение параметров свойств и состояния конструктивных элементов (геометрические характеристики, напряженно-деформированное состояние оснований); $M_{j\text{пр}}$ – предельное значение параметров свойств и состояния внутренней среды (физико-механические характеристики строительных материалов, производительность дорожно-строительной техники); $W_{k\text{пр}}$ – предельное значение параметров свойств и состояния внешней среды (величина температуры, количество осадков); $Q_i(t)$, $M_j(t)$, $W_k(t)$ – значения контролируемых параметров свойств и состояний строительного процесса в момент времени t ; I , J , K – количество контролируемых параметров свойств и состояний строительного процесса; $t < T$, где T – продолжительность простоя или комплексного

строительного процесса.

Контроль соответствия параметров функционального качества строительной продукции первоначальным проектным значениям целесообразно осуществлять в автоматизированных, постоянных или периодических режимах в зависимости от установленного уровня требований организационно-технологической надежности строительного производства.

Информационное моделирование организационно-технологической последовательности строительного производства

Значительная продолжительность производственно-технологического цикла (возведения), высокая стоимость строительной продукции, материалоемкость строительного производства, зависимость от местных природно-климатических условий, характеризующихся соотношением (1), определяют необходимость применения адаптивных организационно-технологических и управленческих решений на этапе устройства линейных объектов транспортной инфраструктуры.

Прогнозную оценку функционального качества

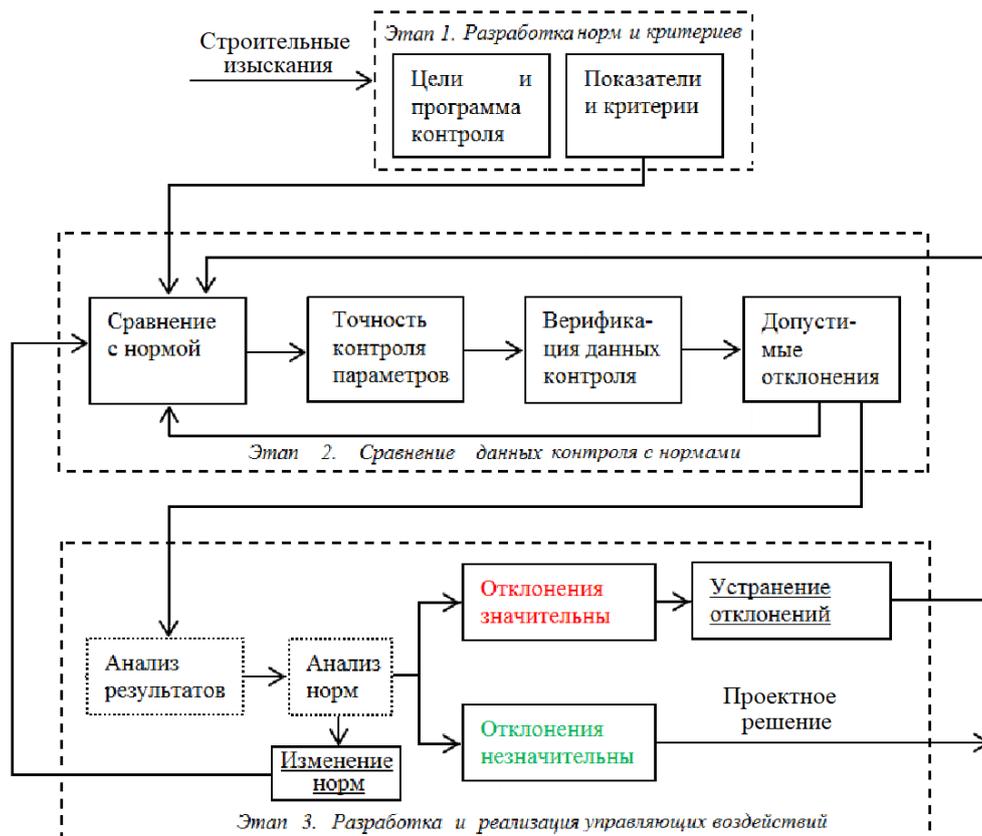


Рис. 5. Алгоритм производства процедуры контроля параметров отклонений и управляющих воздействий

Fig. 5. Algorithm for the production of the procedure of controlling the parameters of deviations and management actions

строительной продукции (линейных объектов транспортной инфраструктуры) предлагается осуществлять с использованием соответствующей математической модели, составленной с учетом особенностей основных, обязательных этапов жизненного цикла (см. рис. 1):

$$\begin{aligned} ИМ &= G_{ТЗ} \cdot ИМ_{ТЗ} + G_{СИ} \cdot ИМ_{СИ} + \\ &+ G_{ПР} \cdot ИМ_{ПР} + G_{СП} \cdot ИМ_{СП} = \\ &= \sum_{i=1}^4 G_i \cdot ИМ_i, \quad \sum_{i=1}^4 G_i = 1, \end{aligned} \quad (2)$$

где $ИМ$ – значение комплексного показателя функционального качества, отображаемого структурными этапами жизненного цикла; $ИМ_{ТЗ}$ – значение показателя качества, формируемого в период разработки технического задания (ТЗ); $G_{ТЗ}$ – значимость показателя качества в период разработки ТЗ; $ИМ_{СИ}$ – значение показателя качества, формируемого в период проведения строительных изысканий (СИ) жизненного цикла; $G_{СИ}$ – значимость показателя качества периода СИ; $ИМ_{ПР}$ – значение показателя качества, формируемого в период разработки проектных решений (ПР) жизненного цикла; $G_{ПР}$ – значимость показателя качества периода ПР; $ИМ_{СП}$ – значение показателя качества, формируемого в период строительства (СП); $G_{СП}$ – значимость показателя качества СП.

Организационно-технологическую модель последовательности устройства линейного сооружения можно рассматривать как составную часть его информационной модели и виртуальный образ отображения свойств и состояний строительного объекта на этапе строительства [1, 11].

Моделирование является одним из наиболее эффективных методов анализа возможных свойств и состояний функционального качества объекта строительства по ключевым особенностям.

Современный уровень состояния информационных технологий позволяет с достаточной степенью подобия и достоверности отобразить предполагаемые особенности устройства линейных сооружений:

– обеспечения надежности организационно-технологической последовательности производства строительных процессов;

– осуществления программ и мероприятий в рамках производственного и технического контроля, авторского и государственного надзора;

– материально-технического и ресурсного обеспечения строительного производства;

– экспертизы качества и условий допуска законченного объекта к эксплуатации;

– прогноза показателей эффективности, надежности и безопасности эксплуатации [12–18].

Заключение

Очевидным преимуществом применения информационного моделирования является то обстоятельство, что анализ поведения и возможных состояний объекта строительства может осуществляться на основании неполной и/или не полностью формализованных данных о состоянии параметров внешней и внутренней среды, отображаемых аналитической зависимостью вида (2).

Информационное моделирование продолжительности и материальных затрат характеризует современный, инновационный подход к осуществлению процедур планирования, организации и управления параметрами состояний строительного производства и функционального качества строительной продукции при устройстве линейных сооружений транспортной инфраструктуры.

Применение прогнозных моделей в составе программы научно-технического сопровождения позволяет осуществить осмысленную и целенаправленную трансформацию анализа особенностей строительного производства от способа накопления и апостериорного анализа многочисленных, но разрозненных данных к формату априорной оценки результатов эффективности принятого варианта организационно-технологической последовательности строительных процессов для обеспечения функционального качества строительной продукции.

Список литературы

1. Абакумов Р.Г., Наумов А.Е., Зобова А.Г. Преимущества, инструменты и эффективность внедрения технологий информационного моделирования в строительстве // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 5. С. 171–181.
2. Семечкин А.Е. Системный анализ и системотехника. М. : SvS-Аргус, 2005. 536 с.
3. Неумолотов О.Б. Системный подход при решении задач в области капитального строительства. Воронеж : ВГТУ, 2002. 332 с.
4. Кузахметова Э.К., Григоренко Н.И. Поднятие научного уровня технического сопровождения проектирования, строительства и реконструкции инженерных сооружений // Евразийский союз учёных. 2016. № 2-4(23). С. 64–65.
5. Морозов Д.В. Методы определения надежности организационно-технологических решений при строительстве и реконструкции железных дорог с позиций системотехники : дис. канд. техн. наук. М. : 2004. 176 с.
6. Абакумов Р.Г., Грищенко Е.Н., Стрекозова Л.В. Теоретические аспекты анализа и оценки организационно-технологических рисков в строительстве // Инновационная наука. 2016. № 5. С. 10–12.
7. Гинис Л.А. Обзор методов научного прогнозирования // Изв. Южн. федер. ун-та. Технические науки. 2009. Тем. вып. С. 231–236.

8. Бадиева В.В. Устройство железнодорожного пути: учебное пособие. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2019. 240 с.
9. Шабалина Л.Н. Организация и технология строительства железных дорог. М. : Маршрут, 2006. 255 с.
10. Тарасова Е.Н. Анализ взаимодействия комплексов работ по возведению линейной основы железной дороги с целью повышения результативности строительства : дис. канд. техн. наук. М. : 1995. 162 с.
11. Скворцов А.В., Сарычев Д.С. Жизненный цикл проектов автомобильных дорог в контексте информационного моделирования // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2015. № 1(4). С. 4–14.
12. Куприяновский В.П. и др. Цифровая железная дорога – ertms, bim, GIS, PLM и цифровые двойники // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2017. Т. 13. № 3. С. 129–166.
13. Баранник С.В. Применимость BIM-технологий в дорожной отрасли // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2015. № 1(4). С. 24–28.
14. СП 333.1325800.2017. Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на различных стадиях жизненного цикла. М. : М-во строительства и жилищно-коммунал. хозяйства Рос. Федерации. 2017. 40 с.
15. Быкова Н.М., Баранов Т.М., Толстикова Е.О. Развитие методики оценки грузоподъемности мостов с использованием мобильных автоматизированных систем мониторинга // Транспортные сооружения. 2015. № 4. URL: <https://ts.today/PDF/01TS415.pdf> (дата обращения 18.04.2021).
16. Веревкина О.И. О гибридном методе прогнозирования рисков на железнодорожном транспорте на основании общего логико-вероятностного метода // Изв. Петерб. ун-та путей сообщ. 2017. Т. 14. № 4. С. 615–627.
17. Веревкина О.И. Результаты применения гибридного метода оценки функциональных рисков нарушения безопасности движения на региональном и линейном уровнях в хозяйстве пути // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 1 (25). С. 106–117.
18. Веревкина О.И. О системе оценки рисков в области функциональной безопасности движения поездов // Мир транспорта. 2017. Т. 15. № 6 (73). С. 206–221.

References

1. Abakumov R.G., Naumov A.E., Zobova A.G. Preimushchestva, instrumenty i effektivnost' vnedreniya tekhnologii informatsionnogo modelirovaniya v stroitel'stve [The benefits, the tools and the effectiveness of the implementation of information modeling in building construction]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova [Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov]*, 2017. No. 5. Pp. 171–181.
2. Semechkin A.E. Sistemnyi analiz i sistemotekhnika [System analysis and system engineering]. Moscow: SvS-Argus Publ., 2005, 536 p.
3. Neumolotova O.B. Sistemnyi podkhod pri reshenii zadach v oblasti kapital'nogo stroitel'stva [A systematic approach to solving problems in the field of capital construction]. Voronezh: VSTU Publ., 2002. 332 p.
4. Kuzakhmetova E.K., Grigorenko N.I. Podnyatie nauchnogo urovnya tekhnicheskogo soprovozhdeniya proektirovaniya, stroitel'stva i rekonstruktsii inzhenernykh sooruzhenii [Raising the scientific level of technical support of the design, construction and reconstruction of engineering structures]. *Evraziiskii soyuz uchyonykh [The Eurasian Union of scientists]*, 2016. No 2-4(23). Pp. 64–65.
5. Morozov D.V. Metody opredeleniya nadyozhnosti organizatsionno-tekhnologicheskikh reshenii pri stroitel'stve i rekonstruktsii zheleznykh dorog s pozitsii sistemotekhniki: dissertatsiya na soiskanie uchyonoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk: 05.23.11 [Methods for determining the reliability of organizational and technological solutions in the construction and reconstruction of railways from the standpoint of system engineering: a Ph.D. (Engineering) diss.: 05.23.11]. Moscow, 2004. 176 p.
6. Abakumov R.G., Grischenko E.N., Strekozova L.V. Teoreticheskie aspekty analiza i otsenki organizatsionno-tekhnologicheskikh riskov v stroitel'stve [Theoretical aspects of the analysis and assessment of organizational and technological risks in building]. *Innovatsionnaya nauka [Innovative science]*, 2016. No. 5. Pp. 10–12.
7. Ginis L.A. Obzor metodov nauchnogo prognozirovaniya [An overview of the methods of scientific forecasting]. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta [Proceedings of Southern Federal University. Technical sciences]*, 2009, Thematic issue. Pp. 231–236.
8. Badieva V.V. Ustroistvo zheleznodorozhnogo puti [Railway track arrangement]. Moscow: FSBO APE «Training and Methodological Center for Education in Railway Transport» Publ., 2019. 240 p.
9. Shabalina L.N. Organizatsiya i tekhnologiya stroitel'stva zheleznykh dorog [Organization and technology of railway construction]. Moscow: Marshrut Publ., 2006. 255 p.
10. Tarasova E.N. Analiz vzaimodeistviya kompleksov rabot po vozvedeniyu lineinoy osnovy zheleznoi dorogi s tsel'yu povysheniya rezul'tativnosti stroitel'stva: dissertatsiya na soiskanie uchyonoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Analysis of the interaction of the complexes of works on the construction of the linear basis of the railway in order to increase the effectiveness of building: a Ph.D. (Engineering) diss.: 05.23.13]. Moscow, 1995. 162 p.
11. Skvortsov A.V., Sarychev D.S. Zhiznennyi tsykl projektov avtomobil'nykh dorog v kontekste informatsionnogo modelirovaniya [The life cycle of road projects in the context of information modeling]. *SAPR I GIS avtomobil'nykh dorog [CAD and GIS for roads]*, 2015. No. 1(4). Pp. 4–14.
12. Kupriyanovskii V.P., Alen'kov V.V., Klimov A.A., Sokolov I.A., Zazhigalkin A.V. et al. Tsifrovaya zheleznyaya doroga – ERTMS, BIM, GIS, PLM i tsifrovye dvoyniki [Digital Railway – ERTMS, BIM, GIS, PLM and digital doubles]. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie [Modern information technologies and IT education]*, 2017. Vol. 13. No. 3. Pp. 129–166.

13. Baranik S.V. Primenimost' BIM-tekhnologii v dorozhnoy otrasli [The applicability of BIM technologies in the road industry]. *SAPR i GIS avtomobil'nykh dorog [CAD and GIS for roads]*, 2015. No. 1(4). Pp. 24–28.

14. Informatsionnoe modelirovanie v stroitel'stve. Pravila formirovaniya informatsionnoi modeli ob'ektov na razlichnykh stadiyakh zhyznennogo tsykla [Information modeling in construction. Rules for forming an information model of objects at various stages of the life cycle]: SR 333.1325800.2017: approved by the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation on September 18, 2017; effective from March 19, 2018. Moscow: Standartinform Publ., 2017. 40 p.

15. Bykova N.M., Baranov T.M., Tolstikov E.O. Razvitie metodiki otsenki gruzopod'yomnosti mostov s ispol'zovaniem mobil'nykh avtomatizirovannykh sistem monitoringa [Development of methods for assessing the load capacity of bridges using mobile automated monitoring systems]. *Transportnye sooruzheniya [Transport facilities]*, 2015. Vol. 2. No. 4(8). URL: <https://ts.today/PDF/01TS415.pdf>. DOI: 10.15862/01TS415.

16. Veryovkina O.I. O gibridnom metode prognozirovaniya riskov na zheleznodorozhnom transporte na osnovanii obschego logiko-veroyatnostnogo metoda [On the hybrid method of forecasting risks in railway transport based on the general logical-probabilistic method]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobscheniya [Proceedings of Petersburg Transport University]*, 2017. Vol. 14. No. 4. Pp. 82–89.

17. Veryovkina O.I. Rezul'taty primeneniya gibridnogo metoda otsenki funktsional'nykh riskov narusheniya bezopasnosti dvizheniya na regional'nom i lineynom urovnyakh v khozyaystve puti [Results of the hybrid method of assessing functional risks of traffic safety violations at the regional and linear levels in the economy of the road]. *Nadyozhnost' i kachestvo slozhnykh sistem [Reliability and quality of complex systems]*, 2019. No. 1 (25). Pp. 106–117.

18. Veryovkina O.I. O sisteme otsenki riskov v oblasti funktsional'noi bezopasnosti dvizheniya poezdov [About the risk assessment system in the field of functional safety of train traffic]. *Mir transporta [World of transport]*, 2017. Vol. 15. No. 6 (73). Pp. 206–221.

Информация об авторах

Каимов Евгений Витальевич – канд. техн. наук, доцент кафедры строительства железных дорог, мостов и тоннелей, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: Eugen-Kaimov@yandex.ru

Information about the authors

Evgenii V. Kaimov – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, the Subdepartment of Building of Railways, Bridges and Tunnels, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: Eugen-Kaimov@yandex.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.2(70).128-138

УДК 625.151, 625.171

Инновации в сфере контроля состояния стрелочных переводов

В. В. Атапин^{1,2}, **А. А. Чекин^{1,2}**, **А. В. Баширов¹**

¹Самарский государственный университет путей сообщения, г. Самара, Российская Федерация

²Научно-производственный центр информационных и транспортных систем, г. Самара, Российская Федерация

✉ vitap88@rambler.ru; atapin@infotrans-logistic.ru

Резюме

В статье рассматриваются вопросы контроля и оценки состояния стрелочных переводов. Показана значимость стрелочного перевода как одного из основных объектов инфраструктурного комплекса с широким перечнем контролируемых параметров с указанием их наименования, раздела в форме ПУ-29 и применяемого средства контроля. Представлена существующая технология контроля состояния стрелочных переводов, описан порядок и измерительные устройства, применяемые в процессе контроля состояния стрелочных переводов. Приведена основная форма отчетности по состоянию стрелочных переводов ПУ-29 «Книга записи результатов проверки стрелочных переводов и глухих пересечений» с подробным описанием способа ее заполнения. Указаны предпосылки и важность перехода на использование электронных путевых шаблонов, описаны их отличительные особенности от обычных ручных механических средств диагностики, приведены технические характеристики и рассмотрен принцип работы каждого из устройств. В работе представлена новая технология контроля состояния стрелочных переводов, дана схема взаимодействия автоматизированных путевых шаблонов с программным обеспечением мобильного рабочего места Единой корпоративной автоматизированной системой управления инфраструктурой, которое предназначено для проведения объективного контроля за нормируемыми техническими параметрами стрелочных переводов в эксплуатации. Благодаря использованию данного программного обеспечения исключается влияние человеческого фактора на процессы записи измерений и формирование отклонений в содержании путем управления процессом записи и передачи измеряемых параметров. Приведены примеры измерений отдельных параметров стрелочного перевода автоматизированным путевым шаблоном АПСИ-03МС. Представлены достоинства и недостатки внедрения новых средств диагностики. Предлагаются технические решения, позволяющие оптимизировать и улучшить процесс контроля состояния стрелочных переводов.

Ключевые слова

стрелочный перевод, электронный шаблон, Единая корпоративная автоматизированная система управления инфраструктурой, форма ПУ-29, синхронизация, комплексная оценка, матрица рисков, неисправность, схема измерения, время промера

Для цитирования

Атапин В. В. Инновации в сфере контроля состояния стрелочных переводов / В. В. Атапин, А. А. Чекин, А. В. Баширов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 2 (70). – С. 128–138. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).128-138

Информация о статье

поступила в редакцию: 20.03.2021, поступила после рецензирования: 11.04.2021, принята к публикации: 19.04.2021

Innovations in the field of monitoring of the state of turnout switches

V. V. Atapin^{1,2}✉, A. A. Chekin^{1,2}, A. V. Bashirov¹

¹Samara state University of railway transport, Samara, the Russian Federation

²Research and Production Center of Information and Transport Systems, Samara, the Russian Federation

✉ vitap88@rambler.ru; atapin@infotrans-logistic.ru

Abstract

The article considers the issues of control and assessment of the state of turnout switches. It shows the significance of a turnout switch as one of the main objects of the infrastructure complex with a wide list of controlled parameters, with an indication of their name, the section in the form PU-29 and the control means used. The existing procedure and measuring devices used in the process of monitoring the state of turnout switches are described. The authors represent the main form of reporting on the state of turnout switches PU-29 «Book of recording the results of checking turnout switches and crossings at grade" with a detailed description of the method of filling it out. The paper indicates the prerequisites for and importance of the transition to the use of electronic gauge templates. It describes features distinguishing them from conventional hand tools, provides their technical characteristics and considers the principle of operation of each of the devices. A new technology for monitoring the state of turnout switches is represented. The authors describe the scheme of interaction of automated gauge templates with the mobile workplace software, the unified corporate automated infrastructure management system, which is designed to objectively control the normalized technical parameters of turnout switches in operation. Thanks to the use of this software, the influence of the human factor on the measurement recording processes and the formation of deviations in the content are eliminated by controlling the recording process and transmitting the measured parameters. Examples of measurements of individual parameters of the turnout switch are provided by the automated APSH-03MS track gauge. The advantages and disadvantages of the introduction of new diagnostic tools are presented. Technical solutions are proposed to optimize and improve the process of monitoring the state of turnout switches.

Keywords

turnout switch, electronic template, unified corporate automated infrastructure management system, form PU-29, synchronization, complex risk assessment, matrix of risks, malfunction, measurement scheme, measuring time

For citation

Atapin V. V., Chekin A. A., Bashirov A. V. Innovatsii v sfere kontrolya sostoyaniya strelochnykh perevodov [Innovations in the field of monitoring of the state of turnout switches]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 2 (70), pp. 128–138. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).128-138

Article info

Received: 20.03.2021, Revised: 11.04.2021, Accepted: 19.04.2021

Введение

Для обеспечения бесперебойности движения поездов, планирования работ планово-предупредительного характера по текущему содержанию пути, а также работ по ремонту проводятся регулярные осмотры и проверки состояния пути, стрелочных переводов и различных сооружений. Сроки и порядок контроля перечисленных объектов устанавливаются Инструкцией по текущему содержанию железнодорожного пути [1].

В сфере путевого хозяйства немаловажную роль занимает контроль стрелочных переводов.

Описание существующей технологии контроля состояния стрелочных переводов

При осмотрах стрелочных переводов проверяются:

- прямолинейность пути по контрольной нити прямого направления и плавность кривизны переводной и крестовинных кривых (визуально или по ординатам);
- соответствие фактического состояния стрелочного перевода нормам устройства и содержания в плане и профиле;
- состояние деревянных и железобетонных брусков и шпал, наличие «кустов» негодных деревянных и железобетонных брусков и шпал (визуально), наличие дефектных брусков и шпал (визуально);
- состояние рельсов, крестовин, контрольных, креплений, зазоров и ступенек в стыках, изолирующих стыках;
- состояние балластной призмы, водоотводов.

Обобщенный перечень контролируемых параметров стрелочного перевода, а также средства, которыми осуществляется их контроль, приведены далее (табл. 1).

Таблица 1. Перечень контролируемых параметров стрелочного перевода
Table 1. The list of controlled parameters of the turnout switch

№ п/п	Наименование параметра	Раздел в ПУ-29	Средства контроля		
			Существующие	Новые	
1	2	3	4	5	
1	Шаблон и уровень в стыке рамного рельса	Первый раздел	ЦУП и аналоги	АПШ-03МС, ШЭП-2, Нева-1	
2	Шаблон и уровень у острия остряка				
3	Шаблон и уровень в корне по прямому и боковому пути				
4	Шаблон и уровень в середине переводной кривой				
5	Шаблон и уровень в переднем вылете крестовины по прямому и боковому пути				
6	Шаблон и уровень в крестовине (сечение 40 мм) по прямому и боковому пути				
7	Шаблон и уровень в заднем вылете крестовины по прямому и боковому пути				
8	Расстояние от рабочей грани контррельса до рабочей грани сердечника крестовины по прямому и боковому пути		Расчетный параметр (ЦУП и штангенциркуль)		
9	Расстояние от рабочей грани контррельса до рабочей грани усовика по прямому и боковому пути		Штангенциркуль путевой ПШВ		
10	Ширина желоба в контррельсе по прямому и боковому пути				
11	Ширина желоба в крестовине по прямому и боковому пути				
12	Боковой износ рамного рельса по прямому и боковому пути				
13	Боковой износ остряка в сечении 50 мм по прямому и боковому пути				
14	Вертикальный износ сердечника крестовины по прямому и боковому пути				
15	Вертикальный износ усовика крестовины по прямому и боковому пути				
16	Понижение остряка против рамного рельса в сечении 50 мм и более по прямому и боковому пути				
17	Неприлегание остряка к рамному рельсу по прямому и боковому пути				Штангенциркуль путевой ПШВ, мерный клин
18	Неприлегание остряка к подушкам по прямому и боковому пути				
19	Неприлегание сердечника к усовику по прямому и боковому пути для НПК				
20	Неприлегание сердечника к подушкам по прямому и боковому пути для НПК				
21	Отступления от проектного положения между передним торцом усовиком и торцом сердечника для НПК		Рулетка		
22	Отступления от проектного положения между длинным и коротким рельсом сердечника для НПК				
23	Ординаты переводной кривой в разных сечениях стрелочного перевода	Второй раздел	ЦУП, рулетка	АПШ-03МС, ШЭП-2, Нева-1	
22	Взаимное положение остряка и рамного рельса	Третий раздел	Шаблон модели 00316 или КОР	КОР	
23	Прямолинейность поверхности катания		Мерная линейка	–	
24	Расстояние от острия остряка до проектных сечений		Рулетка		

	5, 10, 15, 20 и 50 мм		
25	Боковой износ остряка в сечении 20 мм и вне пределов боковой строжки по прямому и боковому пути	Штангенциркуль путевой ПШВ	АПШ-03МС, ШЭП-2, Нева-1
26	Понижение остряка против рамного рельса в острие остряка, сечении 5, 10, 15 и 20 мм по прямому и боковому пути		
27	Разъединение стрелочных остряков и подвижных сердечников крестовин с тягами	Оценивается визуально	-
28	Выкрашивание остряка или подвижного сердечника		
29	Излом остряка или рамного рельса		
30	Разрыв контррельсового болта в одноболтовом, или обоих болтов в двухболтовом вкладыше		
31	Зазор в стыках	Штангенциркуль путевой ПШВ	АПШ-03МС
32	Вертикальные и горизонтальные ступеньки в стыках	Мерный клин	-
33	Износ контррельсов разных профилей		
34	Шаг остряка	Штангенциркуль путевой ПШВ	АПШ-03МС
35	Вертикальный износ рамного рельса по прямому и боковому пути		-
36	Ширина желоба башмакобрасывателя		АПШ-03МС, ШЭП-2, Нева-1

Из приведенных данных (см. табл. 1) видно, что на каждом стрелочном переводе более 30 шт. контролируемых параметров. Все параметры являются по-своему важными и имеют свою категоричность в отчетных документах. При анализе норм на содержание стрелочных переводов можно сделать вывод, что по многим из параметров при превышении установленных допусков, осуществляется ограничение скорости движения или закрытие движения [2].

С давних времен основной формой отчетности по состоянию стрелочных переводов является форма ПУ-29: «Книга записи результатов проверки стрелочных переводов и глухих пересечений». Ведение и заполнение данной формы осуществлялось в ручном режиме по результатам осмотра. Пример данной формы приведен (рис. 1).

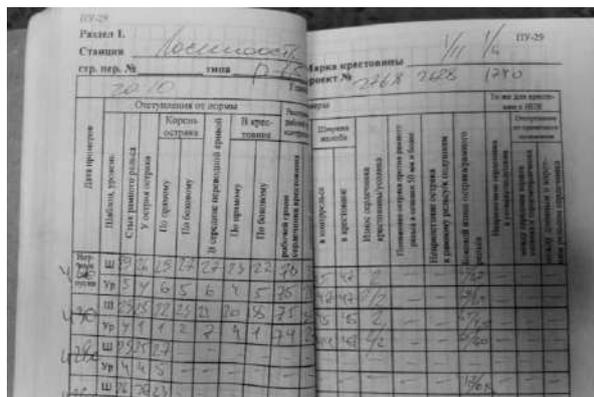


Рис. 1. Пример существующей формы ПУ-29 (заполняется вручную)

Fig. 1. The example of an existing form PU-29 (to be filled in manually)

Измерение параметров, входящих в указанную форму (см. рис. 1), производится с использованием путеизмерительного шаблона ЦУП (рис. 2), универсального шаблона модели 00316, шаблона КОР (рис. 3), штангенциркуля (рис. 4), мерного клина, металлической линейки и рулетки [3–6].



Рис. 2. Шаблон путевой ПШ-1520 (аналог ЦУП)
Fig. 2. Gauge template PSh-1520 (analogous to TsUP)



Рис. 3. Шаблон КОР для измерения очертаний и контуров
Fig. 3. KOR gauge for measuring outlines and contours

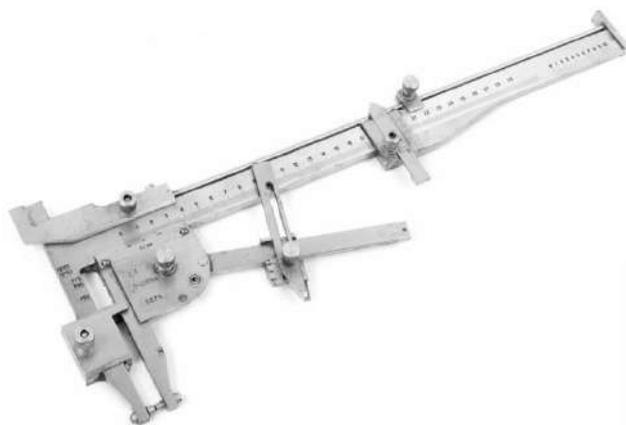


Рис. 4. Штангенциркуль путевой типа ПШВ
Fig. 4. The rail sliding caliper of a PShV type

Корпус путевых шаблонов типа ЦУП изготовлен из алюминиевого профиля, который подвержен температурным изменениям. Принцип, заложенный в измерение параметра «уровень» зачастую не обеспечивает необходимую точность, требуемую действующими нормативными документами. Путевой штангенциркуль ПШВ является непростым инструментом, измерение им требует выполнения определенных выставок и установок, а главное полностью зависит от человеческого фактора.

Таким образом, существующая технология контроля состояния стрелочных переводов привела к необходимости проведения «революции» не только в сфере измерительных устройств, но и к изменению формы ведения ПУ-29, созданию рабочих заданий на выполнение промеров, планированию работ и устранению выявленных неисправностей с полным отсутствием человеческого фактора или его максимальным исключением [7–8].

Описание новой технологии контроля состояния стрелочных переводов

Использование новой технологии контроля состояния стрелочных переводов началось с утверждения распоряжения ОАО «РЖД» «О проведении опытной эксплуатации автоматизированных путевых шаблонов для измерения геометрических параметров рельсовой колеи железнодорожного пути и стрелочных переводов с передачей данных в ЕК АСУИ на полигоне Октябрьской дирекции инфраструктуры» [9] № ЦДИ-402/р от 6 апреля 2018 г.

Главной целью данного распоряжения стало проведение в I полугодии 2018 г. на участках Бологовской и Вышневолоцкой дистанций пути Октябрьской дирекции инфраструктуры опытной эксплуатации автоматизированных путевых шаблонов с передачей данных в Единую корпоративную автоматизированную систему управления инфраструктурой

(ЕК АСУИ) следующих фирм-производителей:

- ООО «Мобильные системы диагностики Холдинг» (модель – Нева-1);
- АО «Фирма Твема» (модель – ШЭП-2);
- АО «Научно-производственный центр информационных и транспортных систем» (модель – АПШ-3МС).

Конечным результатом данной эксплуатации стала разработка Комплекта устройств для автоматизированного измерения геометрических параметров железнодорожного пути, стрелочных переводов, обработки полученной информации, передачи результатов в ЕК АСУИ (далее – Комплект).

Основное назначение Комплекта заключается в обеспечении объективного контроля (мониторинга) за нормируемыми техническими параметрами пути и стрелочных переводов в эксплуатации. Исключение влияния человеческого фактора на процессы записи измерений и формирование отклонений в содержании (инцидентов) должно обеспечиваться путем управления процессом записи и передачи измеряемых параметров с помощью специального программного обеспечения (ПО).

Применительно к самим устройствам были заложены следующие требования:

- диапазон рабочей температуры от -40 до $+40$ °С (при температуре окружающего воздуха от $+40$ до $+20$ °С – не менее 8 ч, от $+20$ до 0 °С – не менее 6 ч, от 0 до -20 °С – не менее 4 ч, от -20 до -40 °С – не менее 2 ч);
- габариты (длина × ширина × высота) шаблона в рабочем положении не более $1\,770 \times 220 \times 310$ мм;
- сохранять работоспособность при эксплуатации на открытом воздухе при наличии осадков в виде дождя и снега;
- обеспечивать передачу результатов измерений на мобильное устройство;
- соответствовать современным требованиям технической эстетики и эргономики, обеспечивать удобство работы и считывание значений контролируемых параметров;
- легкодоступный и быстросъемный аккумуляторный отсек;
- контроль уровня заряда аккумуляторной батареи;
- обслуживание одним оператором в процессе работы;
- наличие противокоррозионного покрытия лакокрасочного по ГОСТ 9.032, металлического и неметаллического по ГОСТ 9.303;
- сохранять работоспособность при воздействии помех от сигнальных и тяговых токов;
- сопротивление электроизоляции между измерительными наконечниками не менее 50 Мом;
- масса электронного шаблона без мобильного устройства, дополнительных аккумуляторов и зарядного устройства не более 4,0 кг;

– срок службы – не менее 5 лет [10].

Мобильное устройство (МРМ) должно обеспечивать прием информации от электронного шаблона и длительность непрерывной работы (при 50 % яркости постоянно включенного экрана, активных Bluetooth и Глонасс / (GPS)) при температуре окружающего воздуха +40 до +20 °С – не менее 8 ч, от +20 до 0 °С – не менее 6 ч, от 0 до –20 °С – не менее 4 ч. Устройство должно располагаться в пыле-, влаго-, ударозащитном корпусе или иметь пыле-, влаго-, ударозащитный чехол. Масса МРМ не должна превышать 0,2 кг.

Изначальный вид изделий, которые проходили опытную эксплуатацию на Октябрьской дирекции инфраструктуры, приведен (рис. 5).

Представлен также вид изделий, эксплуатируемых практически на всех дирекциях инфраструктуры (рис. 6) [11–13].

Показан принцип работы данных устройств и взаимодействия (рис. 7). Для проведения промера стрелочного перевода первоначально пользователь (контролер пути) или руководитель работ (старший контролер, начальник участка, специалист технического отдела ПЧ) планирует промер в системе ЕК АСУИ, т. е. формирует рабочее задание (РЗ) на промер стрелочного перевода. После авторизации пользователя в ПО МРМ ЕК АСУИ, которое должно быть установлено на специализированный смартфон, осуществляется синхронизация и загрузка суточного плана работ по промеру стрелочных переводов, т. е. перечень ранее созданных РЗ.

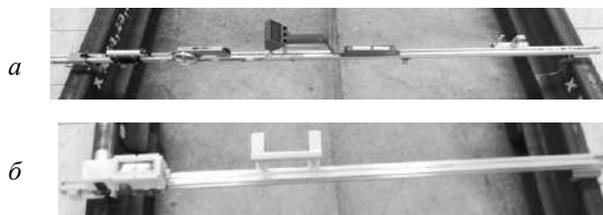


Рис. 5. Автоматизированные путевые шаблоны (опытные образцы):

a – Нева-1; *б* – ШЭП-2; *в* – АПШ-03МС

Fig. 5. Automated gauge templates (prototypes):

a – Neva-1; *b* – ShEP-2; *c* – APSh-03MS



Рис. 6. Автоматизированные путевые шаблоны (эксплуатируемые на сети ОАО «РЖД»):

a – Нева-1; *б* – ШЭП-2; *в* – АПШ-03МС

Fig. 6. Automated gauge templates (operated on the network of Russian Railways OAO):

a – Neva-1; *b* – ShEP-2; *c* – APSh-03MS

Далее осуществляется выбор и подключение необходимого электронного шаблона к мобильному устройству (смартфону) посредством сопряжения по Bluetooth. При первоначальном подключении также выполняется привязка шаблона к активу ЕТБ ДМ.

Для проведения измерений пользователь в активе выбирает конкретное рабочее задание и осуществляет промер согласно заданному перечню измерений. Для удобства работы и оптимизации про-



Рис. 7. Схема взаимодействия автоматизированных путевых шаблонов с программным обеспечением мобильного рабочего места Единой корпоративной автоматизированной системы управления инфраструктурой

Fig. 7. Scheme of interaction of automated gauge templates with the software of the mobile workstation of the Unified corporate automated infrastructure management system

мера в ПО МРМ ЕК АСУИ реализовано несколько схем (последовательностей) измерений: прямая; обратная; от остряка правая; от остряка левая; от крестовины правая; от крестовины левая; универсальная.

Кроме того, у любого пользователя имеется возможность создания своей схемы (последовательности) измерений параметров стрелочного перевода.

Передача результатов измерений от измерительного устройства к ПО МРМ ЕК АСУИ осуществляется посредством Bluetooth.

По окончании промера осуществляется передача данных из ПО МРМ ЕК АСУИ непосредственно в систему ЕК АСУИ для просмотра формы ПУ-29, проведения дополнительной аналитики [14]. Пример электронной формы ПУ-29, формируемой в системе ЕК АСУИ по результатам промера, приведен далее (рис. 8).

Приведены примеры измерений отдельных параметров стрелочного перевода автоматизированным путевым шаблоном АПС-03МС (рис. 9).

Таким образом, внедрение новых средств диагно-

ПУ-29. Книга записи результатов проверки стрелочных переводов и глухих пересечений

Ограничения по дате промера: 01.05.2020-30.06.2020

ПЧ-17 Московско-Смоленская

МОСКВА-ПАСАЖИРСКАЯ-СМОЛЕНСКАЯ Марка крестовины - 1/11

Стр.пар.№ 10 типа правый проект №174000000 ID ЕКАСУИ:А2455045

Раздел 1.

Дата промера	Средств измер	Исполн	Шаблон	Отступления от нормы												Главнейшие размеры				То же для крестовин с НК				Промежутки								
				Коронка остряка		В крестовине						Напря (Пр-Бк)	Расстояние от рабочей грани контрольера до	Ширина желоба	Износ острого крест	Износ острого крест	Износ острого крест	Износ острого крест	Непрямостр. крест	Непрямостр. крест	Боковой износ остряка	Боковой износ рельса	Непрямостр. крест		Непрямостр. крест	Отступление от проектного положения						
				Пр	Бк	передний вылет	в сердечнике	задний вылет	Пр	Бк	Пр																Бк	Пр	Бк	Пр	Бк	Пр
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		21	22	23	24	25	26	27	28
22.05.20 10:08:10	АПС-03МС №149	Д.С. Сурнин	Ш	1527	1529	1526	1525	1533	1529	1529	1519	1520	1524	1522	Пр	1472	1421	46,97	50,47	0,0	2,414	0,646	0,0	0,0	0,0	4,008	2,571	0,0	0,0	0,0	0,0	20

Раздел 2.

Дата промера	Средство измерения	Исполнитель	величина ординат в расстояниях, м, от корня остряка										В конце переводной кривой
			1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	
22.05.20 10:08:10	АПС-03МС № 149	Д.С. Сурнин	182,40	258,00	348,00	449,40	560,50	693,60	838,80	1000,30	0,00	0,00	

Рис. 8. Пример электронной формы ПУ-29, полученной из Единой корпоративной автоматизированной системы управления инфраструктурой

Fig. 8. An example of the electronic form PU-29, obtained from the Unified corporate automated infrastructure management system

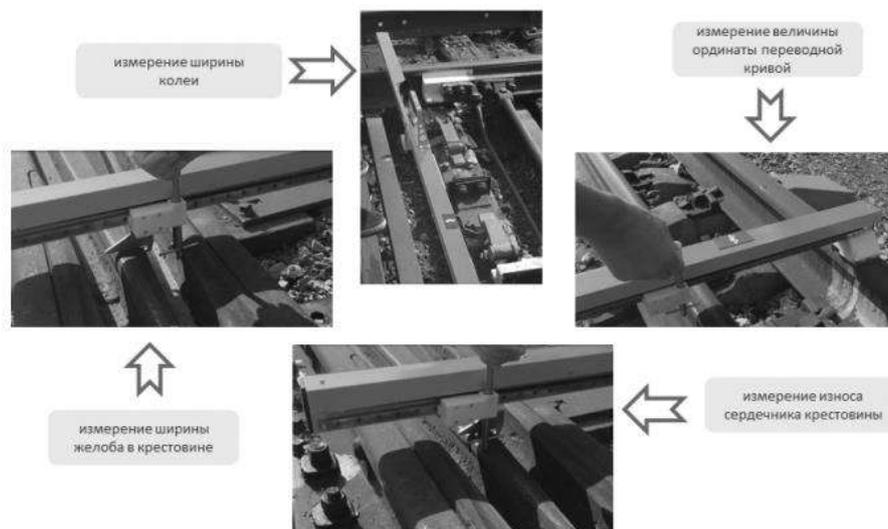


Рис. 9. Измерения параметров стрелочного перевода электронным шаблоном

Fig. 9. Measurement of turnout switch parameters with an electronic template

стики позволило автоматизировать процесс контроля состояния стрелочных переводов, а также частично или полностью решить ряд следующих задач:

- минимизация влияния человеческого фактора на процесс измерений;
- повышение точности измерений за счет применения современных измерительных датчиков;
- уход от ручного ведения формы ПУ-29;
- создание инцидентов при выявлении различных нарушений (рис. 10);
- оптимизация времени проведения измерений;
- централизованное хранение всех результатов измерений в базе данных ЕК АСУИ [15];
- возможность ведения карточки измерений с регистрацией типа и номера измерительного устройства, имени исполнителя, географических координат и т. п.

При всех перечисленных положительных качествах новой технологии контроля состояния стрелочных переводов, необходимо отметить также ряд недостатков и недоработок:

- зачастую длительная синхронизация созданных рабочих заданий;
- невозможность проведения измерений при полной разрядке аккумуляторной батареи в измерительном устройстве или в мобильном устройстве (смартфоне);
- невозможность проведения измерений в случае проблем с Bluetooth-соединением;
- необходимость постоянного заряда и контроля аккумуляторных батарей устройств;
- отсутствие алгоритма по оперативному устранению инцидентов, по которым уже реально были проведены работы;
- недостаток аналитической информации для

управленческого аппарата для принятия решений и др.

Заключение

С целью оптимизации и улучшения новой технологии контроля состояния стрелочных переводов предлагаются следующие технические решения:

1. Реализовать комплексную оценку по каждому стрелочному переводу с использованием матрицы рисков, аналогично той, которая применяется при оценке предотказного состояния [16–18]. На первоначальном этапе предлагается оценивать все параметры стрелочного перевода, входящие в перечень ПУ-29, по следующему принципу (табл. 2).

Таблица 2. Предлагаемые критерии для комплексной оценки состояния стрелочных переводов
Table 2. Proposed criteria for a comprehensive assessment of the state of the turnout switches

Оценка	Описание
«Недопустимое» состояние (красный цвет)	Назначается в том случае, если величина измеренного параметра превышает установленные действующими нормативными документами допуски
«Допустимое» состояние (желтый цвет)	Назначается в том случае, если величина измеренного параметра находится в пределах установленных действующими нормативными документами допусков
«Не учитываемое» состояние (зеленый цвет)	Назначается в том случае, если величина измеренного параметра соответствует номинальному значению

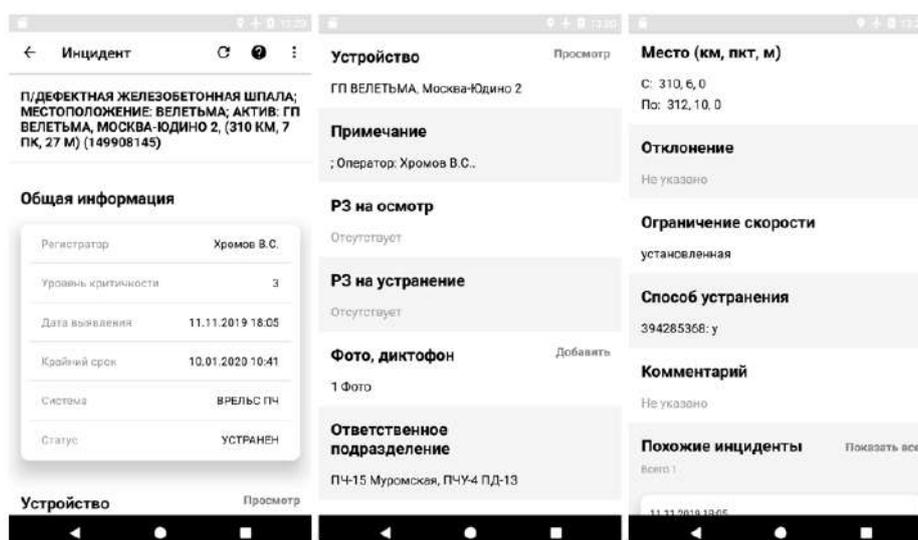


Рис. 10. Пример карточки инцидента в программном обеспечении мобильного рабочего места Единой корпоративной автоматизированной системы управления инфраструктурой

Fig. 10. An example of an incident card in the software of the mobile workplace of the Unified corporate automated infrastructure management system

Визуально в системе ЕК АСУИ или ПО МРМ ЕК АСУИ предлагаемая оценка должна выглядеть следующим образом (табл. 3).

Таблица 3. Ведомость комплексной оценки состояния стрелочного перевода: №, тип, марка крестовины, станция

Table 3. List of comprehensive assessment of the state of the turnout switch: number, type, crosspiece brand, station

№ п/п	Контролируемый параметр	Измеренная величина, мм	Номинальный размер, мм
1	Ширина колеи в стыке рамного рельса	1523,5 (желтый)	1 520
2	Уровень в стыке рамного рельса	+1,2 (зеленый)	до 16
3	Боковой износ рамного рельса по прямому пути	2,2 (желтый)	0
...

2. При планировании промеров выстраивать матрицу приоритетов, которая должна учитывать комплексную оценку состояния стрелочного перевода за предыдущую проверку (табл. 4).

Таблица 4. Матрица приоритетов

Table 4. Matrix of priorities

Очередность промеров	Состояние
1. Стрелочные переводы, расположенные на главных путях	«недопустимое» состояние
2. Стрелочные переводы, расположенные на станционных путях	«недопустимое» состояние
3. Стрелочные переводы, расположенные на приемо-отправочных и прочих путях	«недопустимое» состояние
4. Стрелочные переводы, расположенные на главных путях	«допустимое» состояние
...	...

Данная приоритетность позволит осуществлять контроль за своевременностью устранения выявленных ранее неисправностей, проверку качества проведения ремонтных работ.

3. Осуществлять оперативное устранение созданных инцидентов путем измерения данного параметра электронным шаблоном с внесением в базу данных сразу после проведения ремонтных работ, т. е. on-line контроль качества выполненных ремонтных работ.

Список литературы

1. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути : утв. распоряжением ОАО «РЖД» №2288/р от 14 нояб. 2016 г.
2. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации : утв. приказом Минтранса России № 286 от 21 дек. 2010 г.
3. Путьевой шаблон : пат. 2245956 Рос. Федерация / М.Б. Атлас 10.02.2005 ; заявл. 02.06.2003.
4. Путьевой шаблон для измерения ширины колеи и уровня рельсов : пат. 143317 Рос. Федерация / М.Р. Сулейманов, Г.Г. Киселев, Ю.А.Кочетков. № 2013154913/11 ; заявл. 10.12.2013.
5. Шаблон путьевой : пат. 4977 Рос. Федерация / В.И. Абросимов, Л.С. Крымская, О.Н. Фролов. № 96114430/20 ; заявл. 11.07.1996.
6. Штангенциркуль : пат. 2029221 Рос. Федерация / А.Ф. Лубенец, Г.М. Манусов, В.М. Снегов. № 4932091/28 ; заявл. 26.04.1991.
7. Смирнова Л.Б., Авсиевич А.В., Дронина Д.А., Фатеев В.А. К вопросу совершенствования автоматизированных систем контроля механических параметров стрелочного перевода // Наука и образование транспорту. 2019. № 1. С. 340–344.
8. Рыбкин В.В., Каленик К.Л. Совершенствование методики контроля положения в плане стрелочных переводов // Проблемы проектирования и строительства железных дорог : межвуз. сб. науч. тр. Хабаровск, 2011. С. 98–106.
9. О проведении опытной эксплуатации автоматизированных путьевых шаблонов для измерения геометрических параметров рельсовой колеи железнодорожного пути и стрелочных переводов с передачей данных в ЕК АСУИ на полигоне Октябрьской дирекции инфраструктуры : распоряжение ОАО «РЖД» № ЦДИ-402/р от 06 апр. 2018 г.
10. Стенд контроля путьевых шаблонов : пат. 2114949 Рос. Федерация / М.Б. Атлас. № 97101419/28 ; заявл. 30.01.1997.
11. Статическая экспозиция. Натурные образцы // Железнодорожный транспорт. 2019. № 10. С. 40–58.
12. Многофункциональный электронный путьевой шаблон : пат. 2687537 Рос. Федерация / И.Н. Гончаров, А.Р. Шепехнев, Ю.А. Гродецкий. № 2018127972 ; заявл. 30.07.2018.
13. Путьеизмерительный шаблон с измерительной кареткой : пат. 186438 Рос. Федерация / Л.А. Афанасьев, А. Ковалев, В.Г. Сафин и др. № 2018141177 ; заявл. 22.11.2018.
14. Классификатор дефектов и повреждений элементов стрелочных переводов : утв. распоряжением ОАО «РЖД» № 1653р от 16 авг. 2012 г.

15. Чеботарева Е.А. Концепция создания комплексной цифровой оценки состояния станционной инфраструктуры // Альманах мировой науки. 2018. № 5 (25). С. 46–52.
16. Седелкин Ю.А., Атапин В.В. Методология УРРАН для определения предотказного состояния инфраструктуры // Путь и путевое хозяйство. 2015. № 3. С. 8–11.
17. Седелкин Ю.А., Атапин В.В. Новые горизонты технологии УРРАН // Путь и путевое хозяйство. 2015. № 8. С. 103–105.
18. Атапин В.В., Атапина Н.А. Управление рисками при оценке состояния бесстыкового пути // Путь и путевое хозяйство. 2019. № 5. С. 20–24.

References

1. Instruksiya po tekushchemu sodержaniyu zheleznodorozhnogo puti, utverzhdena rasporyazheniem OAO «RZhD» №2288/r ot 14 noyabrya 2016 g. [Instructions for the current maintenance of the railway track, approved by the order of OAO «Russian Railways» No. 2288/r dated November 14, 2016].
2. Pravila tekhnicheskoi ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossiiskoi Federatsii, utverzhdeny prikazom Mintransa Rossii № 286 ot 21 dekabrya 2010 g. [Rules of technical operation of railways of the Russian Federation, approved by Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation No. 286 dated December 21, 2010].
3. Atlas M.B. *Putevoi shablon* [The gauge template]. Patent for the invention RU 2245956 C1, 10.02.2005. Application no. 2003116223/11 dated June 02, 2003].
4. Suleimanov M.R., Kiselev G.G., Kochetkov Yu.A. *Putevoi shablon dlya izmereniya shiriny kolei i urovnya rel'sov* [The gauge template for measuring gauge template and rail level]. Utility model patent RU 143317 U1, 20.07.2014. Application no. 2013154913/11 dated December 10, 2013.
5. Abrosimov V.I., Krymskaya L.S., Frolov O.N. *Shablon putevoi* [The gauge template]. Utility model patent RU 4977 U1, 16.09.1997. Application No. 96114430/20 dated July 11, 1996.
6. Lubenets A.F., Manusov G.M., Snegov V.M. *Shtangentsirkul'* [Caliper]. Patent for the invention RU 2029221 C1, 20.02.1995. Application No. 4932091/28 dated April 26, 1991.
7. Smirnova L.B., Avsievich A.V., Tonina D.A., Fateev V.A. K voprosu sovershenstvovaniya avtomatizirovannykh sistem kontrolya mekhanicheskikh parametrov strelochnogo perevoda [On the question of improvement of automated control systems of mechanical parameters of the switch]. *Nauka i obrazovanie transportu* [Science and education for transport], 2019. No. 1. Pp. 340–344.
8. Rybkin V.V., Kalenik K.L. Sovershenstvovanie metodiki kontrolya polozheniya v plane strelochnykh perevodov [Improvement of the methodology of controlling the position in the plan of railroad switches]. Khabarovsk, 2011. Pp. 98–106.
9. O provedenii opytnoi ekspluatatsii avtomatizirovannykh putevykh shablonov dlya izmereniya geometricheskikh parametrov rel'sovoi kolei zheleznodorozhnogo puti i strelochnykh perevodov s peredachei dannykh v EK ASUI na poligone Oktyabr'skoi direksii infrastruktury, rasporyazhenie OAO «RZhD» No. TsDI-402/r ot 06 aprelya 2018 g. [On the pilot operation of automated gauge templates for measuring the geometric parameters of the railway track gauge and switches with data transmission to EKASUI at the site of the October Infrastructure Directorate, the order of OAO “Russian Railways” No. CDI-402/r of 06.04.2018].
10. Atlas M.B. *Stend kontrolya putevykh shablonov* [Gauge template control stand]. Patent for the invention RU 2114949 C1, July 10, 1998. Application No. 97101419/28 dated January 30, 1997.
11. Statischeckaya ekspozitsiya. Naturnye obraztsy [Static exposition. Full-scale samples]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2019. No. 10. Pp. 40–58.
12. Goncharov I.N., Shepokhnyov A.R., Grodetskii Yu.A. *Mnogofunktsional'nyi elektronnyi putevoi shablon* [The multifunctional electronic gauge template]. Patent for the invention RU 2687537 C1, 14.05.2019. Application no. 2018127972 dated July 30, 2018.
13. Afanas'ev L.A., Kovalyov A., Safin V.G. et al. *Puteizmeritel'nyi shablon s izmeritel'noi karetkoi* [The gauge measuring template with a measuring carriage]. Utility model patent RU 186438 U1, 21.01.2019. Application no. 2018141177 dated November 22, 2018. Authors:
14. Klassifikator defektov i povrezhdenii elementov strelochnykh perevodov, utverzhden Rasporyazheniem OAO «RZhD» ot 16 avgusta 2012 g. No. 1653r. [Classifier of defects and damages of switch elements, approved by the Order of OAO “Russian Railways” dated August 16, 2012 No. 1653r].
15. Chebotaryova E.A. Kontseptsiya sozdaniya kompleksnoi tsifrovoi otsenki sostoyaniya stantsionnoi infrastruktury [The concept of creating a comprehensive digital assessment of the state of the station infrastructure]. *Al'manakh mirovoi nauki* [The Almanac of World Science], 2018. No. 5 (25). Pp. 46–52.
16. Sedyolkin Yu.A., Atapin V.V. Metodologiya URRAN dlya opredeleniya predotkaznogo sostoyaniya infrastruktury [The methodology of URRAN of determining the pre-failure state of infrastructure]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Railway track and track facilities], 2015. No. 3. Pp. 8–11.
17. Sedyolkin Yu.A., Atapin V.V. Novye gorizonty tekhnologii URRAN [New horizons of the URRAN technology]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Railway track and track facilities], 2015. No. 8. Pp. 103–105.
18. Atapin V.V., Atapina N.A. Upravlenie riskami pri otsenke sostoyaniya besstykovogo puti [Risk management in the evaluation of continuous welded rails]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Railway track and track facilities], 2019. No. 9. Pp. 20–24.

Информация об авторах

Атапин Виталий Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры пути и путевого хозяйства, Самарский государственный университет путей сообщения, ведущий инженер методико-технологического департамента Научно-производственного центра информационных и транспортных систем, г. Самара, e-mail: vitap88@rambler.ru; atapin@infotrans-logistic.ru

Чекин Артем Анатольевич – старший преподаватель кафедры пути и путевого хозяйства, Самарский государственный университет путей сообщения, ведущий инженер методико-технологического департамента Научно-производственного центра информационных и транспортных систем, г. Самара e-mail: chekin@infotrans-logistic.ru

Баширов Артур Васильевич – факультет Строительства железных дорог и информационных технологий, Самарский государственный университет путей сообщения, г. Самара, e-mail: artur-bashirov-98@mail.ru

Information about the authors

Vitalii V. Atapin – Ph.D. in Engineering Science, Senior Lecturer of the Subdepartment of Railway Track and Railway Equipment, Samara State Transport University, lead engineer of the methodical and technological department of INFOTRANS, Samara, e-mail: vitap88@rambler.ru; atapin@infotrans-logistic.ru

Artyom A. Chekin – lector of the Subdepartment of Railway Track and Equipment, Samara State Transport University, lead engineer of the methodical and technological department of INFOTRANS, Samara, e-mail: chekin@infotrans-logistic.ru

Artur V. Bashirov – student of the Subdepartment of Construction of Railway Tracks and Unformation Technology, Samara State Transport University, Samara, e-mail: artur-bashirov-98@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.2(70).138-145

УДК 621.332

Анализ повреждений токоприемников электроподвижного состава и модернизация систем контроля разрегулировки опор контактной сети

С. Ф. Амиров✉, Т. Н. Бадретдинов, И. Н. Баянов

Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент, Республика Узбекистан

✉ amirovsf@bk.ru

Резюме

Повышенные скорости движения и увеличение грузопотока на электрифицированных железных дорогах предъявляют высокие требования ко всей инфраструктуре, в том числе и к устройству контактной сети. Она как раз и является зачастую наиболее уязвимым элементом системы тягового электроснабжения. Это связано с тем, что наравне с воздействием климатических и природных явлений, сложных технических условий эксплуатации, она подвергается различным электрическим влияниям, а так как этот элемент электрифицированных железных дорог не имеет резерва ее основных компонентов, то к ней и предъявляются повышенные технические требования. В данной статье рассмотрена задача поиска наиболее рационального способа контроля состояний устройств контактной сети и определение их «слабых мест» в эксплуатации при совмещенном движении различных типов поездов. Проведен анализ нарушений контактной сети на основе теории Парето, определены наиболее частые виды нарушений устройств контактной сети, приведен краткий научный обзор имеющихся наработок по контролю разрегулировки железобетонных опор контактной сети. Также разработан алгоритм обработки полученных данных с измерительных датчиков для определения максимального угла отклонения опорных конструкций контактной сети. В предложенном способе измерения угла наклона опор, влияние конусности железобетонных стоек опор на точность измерений отсутствует. Методика исследования базируется на сборе и обработке исходных данных в целях поиска рационального решения вопроса диагностики устройств контактной сети.

Ключевые слова

железнодорожный транспорт, контактная сеть, опора контактной сети, диагностика контактной сети, диаграмма Парето, угол наклона железобетонных опор, разрегулировка

Для цитирования

Амиров С.Ф. Анализ повреждений токоприемников электроподвижного состава и модернизация систем контроля разрегулировки опор контактной сети / С. Ф. Амиров, Т. Н. Бадретдинов, И. Н. Баянов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 2 (70). – С. 138–145. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).138-145

Информация о статье

поступила в редакцию: 17.03.2021, поступила после рецензирования: 01.04.2021, принята к публикации: 11.04.2021

Analysis of damage of electric stock current collectors and modernization of catenary support misalignment control systems

S. F. Amirov✉, T. N. Badretdinov, I. N. Bayanov

Tashkent State Transport University, Tashkent, the Republic of Uzbekistan

✉ amirovsv@bk.ru

Abstract

Increased traffic speeds and increased freight traffic on electrified railways place high demands on the entire infrastructure, including catenary devices. It is often the most vulnerable element of the traction power supply system. This is due to the fact that, along with the impact of climatic, natural phenomena and complex technical operating conditions, it is exposed to various electrical influences. And since this element of electrified railways does not have a reserve of its main components, it is subject to increased technical requirements. This article deals with the problem of finding the most rational way to control the state of the catenary devices and determine their gravest flaws in operation with the combined movement of various types of trains. It analyzes catenary faults based on the Pareto theory, determines the most frequent types of faults of catenary devices and gives a brief scientific review of the available developments on the control of the misalignment of reinforced concrete catenary supports. An algorithm has also been developed for processing the data obtained from measuring sensors to determine the maximum angle of deflection of catenary support structures. In the proposed method of measuring the inclination angle of the supports, the tapering of the reinforced concrete poles of the supports does not influence the measurement accuracy. The research methodology is based on the collection and processing of initial data in order to find a rational solution to the problem of diagnostics of catenary devices.

Keywords

railway transport, catenary, catenary supports, catenary diagnostics, the Pareto diagram, angle of inclination of reinforced concrete supports, misalignment

For citation

Amirov S. F., Badretdinov T. N., Bayanov I. N. K analizu povrezhdenii tokopriyomnikov elektropodvizhnogo sostava i modernizatsiya sistem kontrolya razregulirovki opor kontaktnoi seti [Analysis of damage of electric stock current collectors and modernization of catenary support misalignment control systems]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 2 (70), pp. 138–145. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).138-145

Article info

Received: 17.03.2021, Revised: 01.04.2021, Accepted: 11.04.2021

Введение

С повышением скоростей движения и увеличением грузопотока к объектам электрифицированной железной дороги предъявляются высокие требования, в частности к устройству контактной сети. Одним из таких требований является соблюдение геометрии расположения контактной подвески для обеспечения надежности токосъема при заданных скоростях движения, а также обеспечения безопасного движения поездов с минимальными эксплуатационными затратами.

На начало 2020 г. протяженность электрифицированного участка Узбекских железных дорог составляет 1 646 км, в том числе скоростной участок, где скорости движения электроподвижного состава «Afrosiyob» Talgo 250 (производства испанской компании «Patentes Talgo S.L.») превышают 200 км/ч – 718,6 км. На железнодорожных участках Республики Узбекистан, предназначенных для скоростного движения, эксплуатируются поезда с локомотивами разных серий и электропоездов с различными массами и скоростями. На большей части электрифицированных железных дорог сооружена полукомпенсированная контактная подвеска, и только на участках, где проходят скоростные поезда, применяется компенсированная контактная подвеска [1].

Проект перехода на высокоскоростное движение в 2011 г. осуществлялся с помощью зарубежных

специалистов компании АО «Универсал – контактная сеть», которая спроектировала контактную подвеску КС-250-UZ для участка Ташкент – Самарканд под скорости 250 км/ч [2]. Последующие проекты электрификации или реконструкции контактной подвески под скоростное движение осуществляются собственными силами проектных и строительных организации АО «Ўзбекстон темир йуллари» (АО «Узбекские железные дороги»).

Анализ повреждений токоприемников

На сегодняшний момент на электрифицируемых железных дорогах Республики Узбекистан мало внимания уделяется детальному контролю диагностирования состояния объектов тягового электрооборудования, а имеющиеся в наличии средства диагностирования контактной сети не в полной мере удовлетворяют требованиям эксплуатации устройств электрооборудования в связи с недостаточным количеством определяемых параметров контактной сети. Это приводит к низкому качеству и неточности прогноза показателей срока службы и момента предотказного состояния устройств контактной сети [3]. Согласно статистике локомотивной службы АО «Ўзбекстон темир йуллари» за 2019 г. о поломках токоприемников различных типов локомотивов по локомотивному депо «Узбекистан» на основании предполагаемых причин поломки токо-

приемников была построена диаграмма Парето (рис. 1) для определения процентной доли каждого из видов нарушения и выявления основных нарушений [4]. Проанализировав полученный график, можно сделать вывод, что 81 % нарушений на электрифицированном железнодорожном транспорте приходится на два вида – захлест контактного провода и обрыв струны.

Нарушение габарита при обрыве струны обусловлено поломкой струновых зажимов для несущего троса, который, как правило, состоит из двух щек, соединенных стяжным болтом, поэтому необходима модернизация струнового зажима, которая позволит уменьшить нарушения по причине обрыва струны.

Захлест контактного провода чаще всего возникает по двум основным причинам:

1. Ветровые воздействия.

Однако этот параметр учитывают при проектировании и анализе максимального ветра в данном ветровом районе за последние 25 лет, а если произошли климатические изменения и усилились ветровые нагрузки, необходимо предусматривать ветроустойчивую контактную подвеску.

2. Разрегулировка зигзага у опоры, связанная с точностью установки и контроля поддерживающих и фиксирующих конструкции контактной сети.

Наличие слабых грунтов в местах установок опор контактной сети с совокупностью влияния

аэродинамического потока воздушных масс и вибродинамического воздействия движущих поездов вносит свой вклад в изменение угла наклона опор, что, в свою очередь, приводит к разрегулировке контактной подвески и влияет на качество токоотдачи [5].

Особенностью электрифицированных участков Узбекистана является то, что даже на скоростных магистралях в основном применяются железобетонные опоры с частично напряженной арматурой, установленные на фундаментах. Данное решение было принято на основании того, что на территории Республики Узбекистан не имеется больших запасов железной руды и нет запасов качественного каменного угля (антрацита), а выпускаемый заводами металл в основной массе состоит из вторичного сырья. Такой металл не соответствует нормам, необходимым для изготовления металлических опор [1]. Приобретение металлических изделий иностранного производства экономически не обоснованно, так как это увеличивает процесс окупаемости контактной сети и удорожает оплату перевозок по электрифицированным железным дорогам. На начало 2020 г. в эксплуатации Узбекских железных дорог имелось около 56 тыс. опор (рис. 2).

Железобетонные опоры в сравнении с металлическими более экономически выгодны, тем более что в Узбекистане имеется сырье для их изготовле-

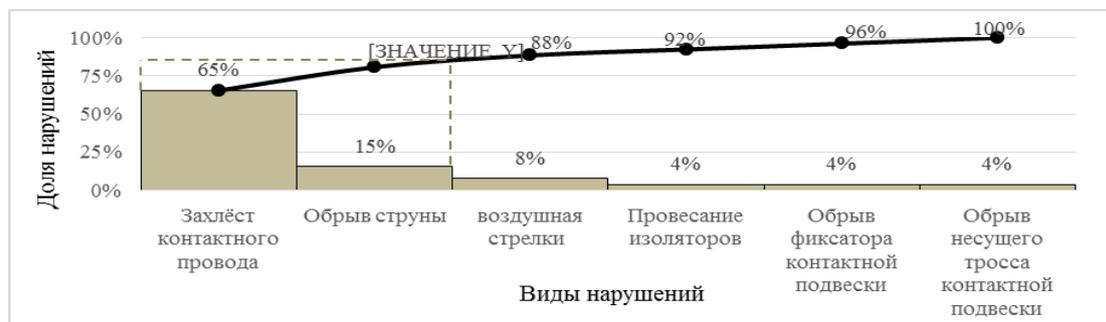


Рис. 1. Анализ нарушений контактной сети на основе теории Парето
Fig. 1. Analysis of the catenary faults based on the Pareto theory

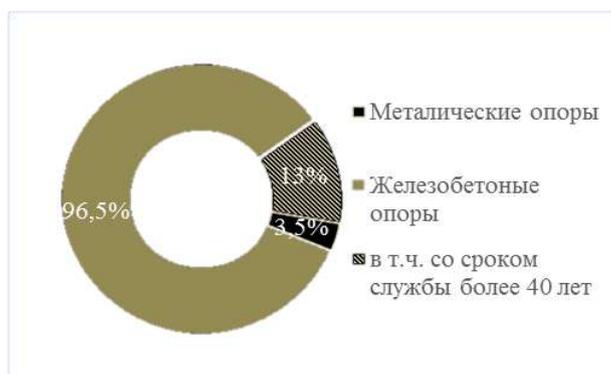


Рис. 2. Статистический анализ опор в эксплуатации АО «Ўзбекстон темир йуллари»
Fig. 2. Statistical analysis of supports in the operation of “Uzbek Railways” OAO

ния, и налажен выпуск опор с частично напряженной арматурой собственными силами. Однако применение железобетонных опор в условиях эксплуатации их на дорогах смещенного типа, где проезжают как тяжеловесные поезда, так и скоростные, и высокоскоростные электроподвижные составы (ЭПС), предъявляет повышенные требования к надежности [6].

В связи с этим встает вопрос о создании системы своевременного диагностирования контроля технического состояния опор на протяжении всего жизненного цикла и необходимости прогнозирования остаточного ресурса эксплуатируемых опор [7, 8].

Краткий обзор существующих способов измерения угла наклона опор контактной сети

Имеется несколько разработок по определению угла наклона опор. Одна из них – патент [9], включающий в себя строительный уровень, на который устанавливается веб-камера, соединенная с компьютером. Причем имеется два варианта использования данного устройства. В первом случае веб-камера размещается на строительном уровне с фокусированием на краю направляющей, находящейся на нулевой отметке линейки. Во втором случае веб-камера размещается таким образом, чтобы горизонтальный пузырьковый уровень полностью присутствовал в кадре. Более подробно описание устройства изложено в диссертации А.А. Ковалева [10].

Известна система непрерывного мониторинга состояния контактной сети рельсового транспорта [11], состоящая из датчиков физических параметров контактной подвески, блока сбора информации, блока обработки информации, блока оповещения персонала, блока бесперебойного питания, одной из задач которого является диагностирование опор контактной сети при помощи установки на каждую опору вибрационного датчика (инклинометра). Такой датчик определяет динамическое воздействие на опору контактной сети и изменение угла наклона, что позволяет непрерывно контролировать угол наклона опоры. Система мониторинга состояния контактной сети подробно описана в работах [11–13].

Также разработан способ контроля угла наклона опор контактной сети железных дорог [14], состоящий из штатива с уровнем, лазерного дальномера и мобильного электронного устройства со специальной программой, содержащей все основные параметры опор различных марок и их поправочные коэффициенты, которые уменьшают влияние конусности стойки железобетонных опор на точность измерений. Измерение производится со стороны рельсового пути. На штативе установлен лазерный дальномер, с которого измеряется расстояния до опоры с двух уровней поочередно. По разности этих двух расстояний и определяется угол наклона с учетом коэффициента

конусности опоры. О данном способе измерения угла подробно излагается в статьях [15, 16].

Приведенные системы для измерения угла наклона опор обладают рядом недостатков:

В устройстве [9] – ручной способ обработки результатов по видеоизображению, а использование веб-камеры существенно уменьшает точность измерения.

В системе непрерывного мониторинга [11] недостатком является наличие большого количества датчиков, установленных по всему анкерному участку контактной сети, которые необходимо обслуживать.

В способе [14] – ручной способ измерения, длительность подготовительных работ к каждому измерению, а также отсутствие возможности определения наклона опор вдоль железнодорожного пути.

Нами предлагается система определения наклона опор во всех направлениях относительно пути и увеличение быстродействия процесса измерения угла наклона опор.

Способ измерения угла наклона опор контактной сети

Поставленная задача решается тем, что в способ, в котором используется лазерный дальномер, штатив и мобильное электронное устройство, добавлено три дальномера, штатив дополнен гироскопом, датчиками позиционирования, а мобильное электронное устройство – блоком передачи данных. Измерение наклона опоры осуществляется в двух перпендикулярных плоскостях при помощи двух пар лазерных дальномеров, расположенных под углом 90° между парами, 45° по отношению к оси пути в горизонтальной плоскости и 30° между собой в вертикальной плоскости, установленных на подвижной железнодорожной единице. Замеры производятся в движении (рис. 3, 4).

В каждой плоскости измеряется расстояние до точек опоры. Измерение осуществляется с помощью лазерных дальномеров, установленных на штативе с гироскопом. Первые датчики в каждой паре измеряют расстояние перпендикулярно опоре, вторые – под углом 30° вверх по отношению к первым. Угол 30° выбран из соображения, что при габарите опор более 4,2 м расстоянию между точками замера не будет доходить до нижнего узла крепления, фиксирующего или поддерживающего конструкции контактной подвески, при меньшем угле точность измерения уменьшается.

При помощи мобильного электронного устройства, где программой в образующемся треугольнике ABC (рис. 4) рассчитываются неизвестные углы β_1 и β_2 каждого замера, по ним определяется максимальный угол отклонения железобетонной опоры β и сравнивается с нормативным значением. Если β не превышает 3° , то опора пригодна для эксплуатации.

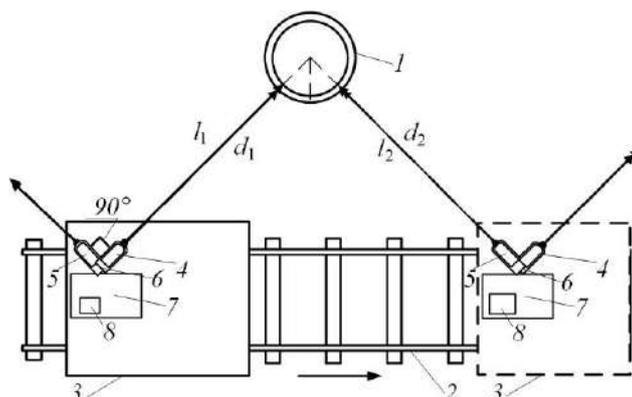


Рис. 3. Схема измерений наклона железобетонных опор контактной сети относительно железной дороги в горизонтальной плоскости:

1 – железобетонная опора; 2 – железнодорожный путь; 3 – самоходная единица; 4, 5 – соответственно первая и вторая пара измеряемых лазерных дальномеров; 6 – штатив с гироскопом; 7 – мобильное электронное устройство; 8 – датчики позиционирования

Fig. 3. Scheme of measuring the slope of reinforced concrete supports of the catenary relative to the railway in the horizontal plane:

1 – reinforced concrete support; 2 – railway track; 3 – self-propelled unit; 4, 5 – respectively, the first and second pair of measured laser rangefinders; 6 – a tripod with a gyroscope; 7 – mobile electronic device; 8 – positioning sensors

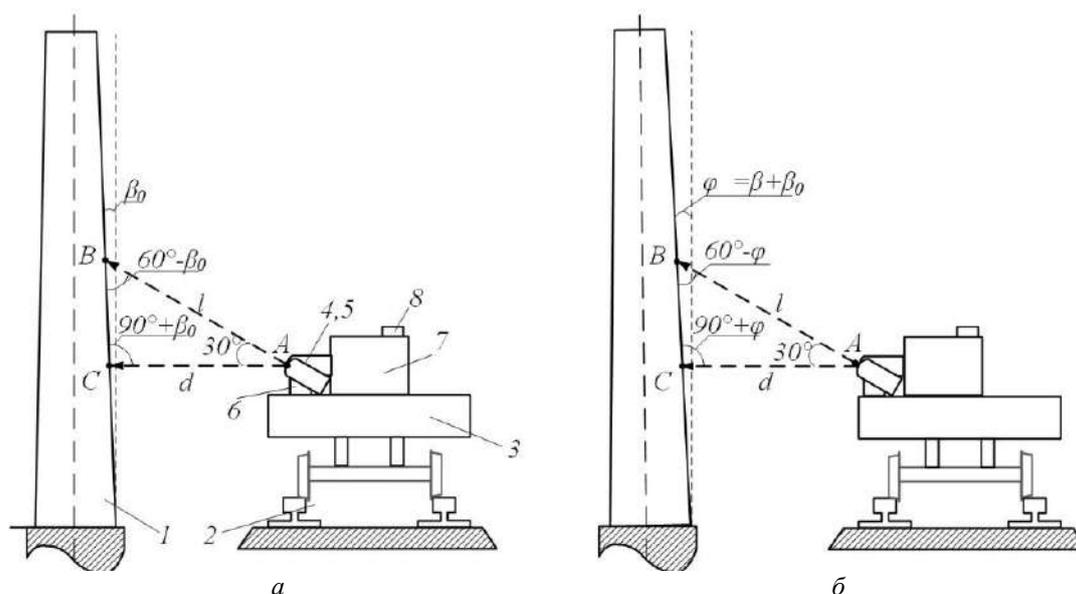


Рис. 4. Схема измерений наклона железобетонных опор контактной сети в продольной плоскости:

a – правильное положение опоры; *б* – опора с наклоном на угол β

Fig. 4. Scheme of measurements of the slope of reinforced concrete supports of the catenary in the longitudinal plane:

a – the correct position of the support; *b* – the support with an angle of inclination β

При превышении β в любой плоскости более чем на 3° полученные датчиком позиционирования координаты опоры передаются обслуживающему персоналу для проведения мероприятий по выправке опор. Алгоритм расчета выполнен таким образом, что может определить уклон опоры в любую сторо-

ну на любой угол. Данные по углам отклонения всех опор сохраняются в их электронном паспорте.

При определении угла наклона опор таким способом влияние конусности железобетонных стоек опор на точность определения наклона отсутствует, так как в расчетах используется угол конусности, который определяется по формуле (1) (рис. 5).

$$\beta_0 = \arctg\left(\frac{D-d}{2 \cdot L}\right) \quad (1)$$

Основные размеры железобетонных стоек опор контактных сетей типа СС, применяемых на железных дорогах Республики Узбекистан, представлены в (табл.). Из расчета видно, что угол конусности одинаков для всех марок железобетонных опор и примерно равен $\beta_0 \approx 0,425^\circ$. Тем самым расчет облегчается, а процесс измерения может осуществляться в движении.

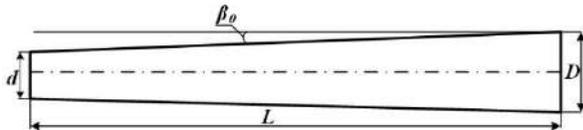


Рис. 5. Габариты железобетонной конической стойки типа СС

Fig. 5. Dimensions of a reinforced concrete conical pole of the SS type

Далее представлен упрощенный алгоритм обработки полученных данных с измерительных датчиков для определения максимального угла отклонения, сравнения его с допустимыми нормами и, в случае отклонения от норм, передачи обслуживающей организации для принятия решения (рис. 6).

Заключение

Проведенный анализ повреждений токоприемников на основе теории Парето показал, что более 80 % всех случаев повреждений связаны с захлестом контактного провода и обрывом струн по вине струновых зажимов. В связи с этим встал вопрос об усовершенствовании струновых зажимов, исключающих падение струн и нарушение габарита, а также преобразовании системы мониторинга технического состояния опор с применением современного диагностического устройства.

Авторами разработана мобильная система контроля угла наклона опор с использованием современных технических средств – лазерных дальноте-

Параметры железобетонных стоек типа СС
Parameters of reinforced concrete poles of the SS type

Марка железобетонной стойки	СС 104.7	СС 108.7	СС 128.7	СС 136.7	СС 136.7
Длина L , мм	10 400	10 800	12 800	13 600	14 600
Диаметр вершины d , мм	290	290	290	290	290
Диаметр в комле D , мм	445	450	480	492	508
Угол конусности β_0	$0,427^\circ$	$0,424^\circ$	$0,425^\circ$	$0,425^\circ$	$0,428^\circ$

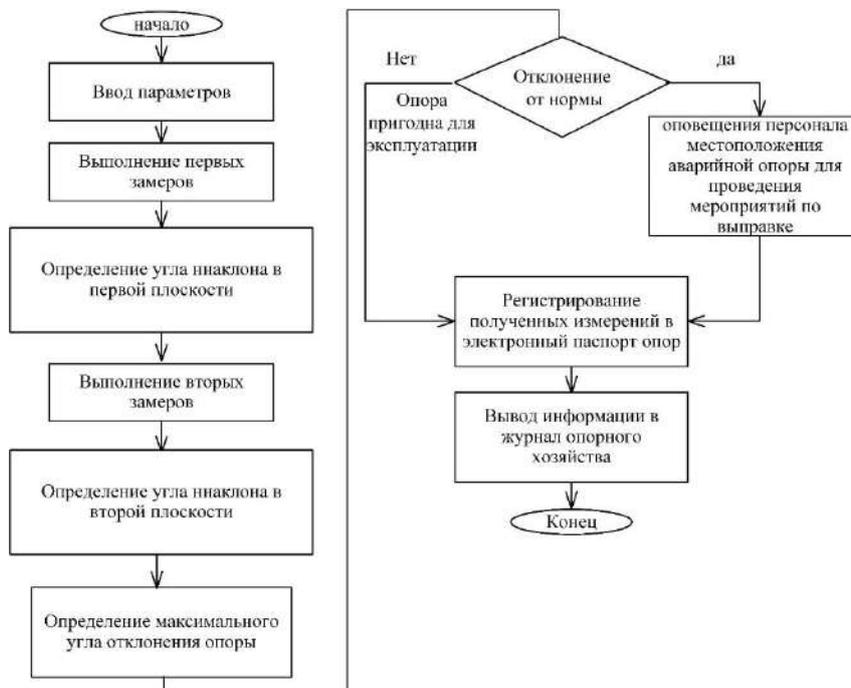


Рис. 6. Упрощенный алгоритм обработки полученных данных

Fig. 6. Simplified algorithm for processing the received data

ров, мобильных электронных устройств и алгоритма выполнения вычислений.

Благодаря использованию двух пар лазерных дальнометров предлагаемая система контроля позволяет определить наклон железобетонных опор в любую сторону в режиме движения и увеличить скорость определения наклона за счет использования

упрощенного вычислительного алгоритма обработки результатов измерения. Данная функция может также применяться для контроля точности монтажа железобетонных опор и отклонения от габарита при новом строительстве. На данный способ измерения угла наклона железобетонных опор подана заявка на патент.

Список литературы

1. Бадретдинов Т.Н. Проблемы эксплуатации электрифицированных железных дорог на примере Узбекистана // *Universum: технические науки*. 2020. № 9-2 (78). С. 103–105.
2. Иванов В.А., Кудряшов Е.В. Контактная сеть КС-200: история, особенности, перспективы // *Локомотив*. 2013. № 6 (678). С. 38–40.
3. Assessment and prediction of the quality of the contact network under high-speed motion of electric transport / S.F. Amirov, I.N. Bayanov, K.X. Turdibekov et al. // *Jour of Adv Research in Dynamical & Control Systems*. 2020. Vol. 12. Special Issue-02. P. 160–165.
4. Галкин А.Г., Ковалев А.А., Микава А.В. Влияние угла наклона опоры на высоту подвеса контактного провода относительно уровня головки для скоростных и высокоскоростных контактных подвесок // *Изв. Транссиба*. 2018. № 4 (36). С. 69–75.
5. Аксенов Н.А. Оценка возникновения риска отказа участка контактной сети // *Инновационный транспорт*. 2015. № 4 (18). С. 57–61.
6. Окунев А.В., Галкин А.Г., Ковалев А.А. Определение предельных состояний опор контактной сети на основе математического моделирования изменения их несущей способности // *Изв. Транссиба*. 2019. № 2 (38). С. 82–90.
7. Galkin A.G., Kovalev A., Okunev A.V. Assessing remained service time of contact-line support under the constant load // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. T. 1115. P. 693–702.
8. Устройство для измерения угла наклона оси опоры контактной сети (варианты) : пат. 2340476 Рос. Федерация / А.А. Ковалев, А.Г. Галкин. № 2007125430/11 ; заявл. 05.07.2007 ; опубл. 10.12.2008
9. Ковалев А.А. Формирование управляющих воздействий на контактной сети с учетом процесса разрегулировок опор : дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2008. 142 с.
10. Система и способ непрерывного мониторинга состояния контактной сети рельсового транспорта : пат. 2701887 Рос. Федерация / Д.В. Ефанов, В.А. Гросс, А.М. Романчиков и др. № 2018129315 ; заявл. 10.08.2018 ; опубл. 02.10.2019.
11. Организация непрерывного мониторинга углов наклона опор железнодорожной контактной сети / Д.В. Ефанов, Г.В. Осадчий, Д.В. Седых // *Транспорт Урала*. 2017. № 2 (53). С. 37–41.
12. Permanent monitoring systems of the contact-wire of railroad catenary: the main tasks of implementation / D.V. Efanov, G.V. Osadchy, D.V. Barch et al. // 2019 IEEE East-West Design and Test Symposium (EWDTS). DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884442.
13. Способ контроля угла наклона опор контактной сети железных дорог : пат. 2660195 / Н.А. Аксёнов, А.А. Ковалев. № 2017116774 ; заявл. 12.05.2017 ; опубл. 05.07.2018.
14. Аксенов Н.А., Ковалев А.А. Разработка прибора по контролю установочных параметров опоры контактной сети // *Инновационный транспорт*. 2017. № 4 (26). С. 49–53.
15. Аксенов Н.А. Современные способы определения степени разрегулировки опор контактной сети // *Инновационный транспорт*. 2016. № 4 (22). С. 48–51.

References

1. Badretdinov T.N. Problemy ekspluatatsii elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog na primere Uzbekistana [Problems of operation of electrified railways by the example of Uzbekistan]. *Universum: tekhnicheskije nauki* [Universum: technical sciences], 2020. No. 9-2 (78). Pp. 103–105.
2. Ivanov V.A., Kudryashov Ye.V. Kontaktnaya set' KS-200: istoriya, osobennosti, perspektivi [KS-200 catenary: history, features, prospects]. *Lokomotiv* [Locomotive], 2013. No. 6 (678). Pp. 38–40.
3. Amirov S.F., Bayanov I.N., Turdibekov K.X., Abdullaeva R. Assessment and prediction of the quality of the contact network under high-speed motion of electric transport. *Jour. of adv. research in dynamical & control systems*, Vol. 12, Special issue-02, 2020. Pp. 160–165.
4. Galkin A.G., Kovalyov A.A., Mikava A.V. Vliyanie ugla naklona opory na vysotu podvesa kontaktnogo provoda otnositel'no urovnya golovki dlya skorostnykh i vysokoskorostnykh kontaktnykh podvesok [Influence of the angle of inclination of the support on the height of the suspension of the contact wire relative to the head level for high-speed and high-speed contact suspensions]. *Izvestiya Transsiba* [Proceedings of the Trans-Siberian Railway], 2018. No. 4 (36). Pp. 69–75.
5. Aksyonov N.A. Otsenka vzniknoveniya riska otказа uchastka kontaktnoi seti [Assessment of the risk of failure of the catenary section]. *Innovatsionnyi transport* [Innovative transport], 2015. No. 4 (18). Pp. 57–61.
6. Okunev A.V., Galkin A.G., Kovalyov A.A. Opredelenie predel'nykh sostoyanii opor kontaktnoi seti na osnove matematicheskogo modelirovaniya izmeneniya ikh nesushchei sposobnosti [The definition of the limit states of catenary supports on the basis of mathematical modeling of changes in their carrying capacity]. *Izvestiya Transsiba* [Proceedings of the Trans-Siberian Railway], 2019. No. 2 (38). Pp. 82–90.

7. Galkin A.G., Kovalyov A., Okunev A.V. Assessing remained service time of contact-line support under the constant load. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Vol. 1115. Pp. 693–702.

8. Kovalyov A.A., Galkin A.G. *Ustroistvo dlya izmereniya ugla naklona osi opory kontaktnoi seti (varianty)*. [A device for measuring the inclination angle of the contact system support axis (options)] Patent for invention RU 2340476 C1, December 10, 2008. Application No. 2007125430/11 dated July 05, 2007.

9. Kovalyov A.A. *Formirovanie upravlyayushhikh vozdeistvii na kontaktnoi seti s uchytom protsessa razregulirovok opor*: dis. kand. techn. nauk: 05.22.07 [Formation of management actions in the catenary taking into account the process of misalignment of supports: a Ph.D. (Engineering) diss.: 05.22.07. Ural state transport university. Ekaterinburg, 2008.

10. Efanov D.V., Gross V.A., Romanchikov A.M., Bolotskii D.N., Vasil'ev A.Yu. *Sistema i sposob nepreryvnogo monitoringa sostoyaniya kontaktnoi seti relsovogo transporta* [The system and method of continuous monitoring of the state of the rail transport catenary]. Patent for invention RU 2701887 C1, October 02, 2019. Application No. 2018129315 dated August 10, 2018.

11. Efanov D.V., Osadchii G.V., Sedykh D.V., Barch D.V. Organizatsiya nepreryvnogo monitoringa uglov naklona opor zheleznodorozhnoi kontaktnoi seti [Organization of continuous monitoring of tilt angles of railway catenary supports]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2017. No. 2 (53). Pp. 37–41.

12. Efanov D.V., Osadchii G.V., Barch D.V., Belyi A.A. Permanent monitoring systems of the contact-wire of railroad catenary: the main tasks of implementation. *2019 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTS 2019*, 2019. Pp. 8884442.

13. Aksyonov N.A., Kovalyov A.A. *Sposob kontrolya ugla naklona opor kontaktnoi seti zheleznykh dorog* [A method of controlling the inclination angle of railway catenary supports]. Patent for invention RU 2660195 C1, July 05, 2018. заявка No. 2017116774 dated May 12, 2017.

14. Aksyonov N.A., Kovalyov A.A. *Razrabotka pribora po kontrolyu ustanovochnykh parametrov opory kontaktnoi seti* [Development of a device for monitoring the installation parameters of the catenary supports]. *Innovatsionnyi transport* [Innovative transport], 2017. No. 4 (26). Pp. 49–53.

15. Aksyonov N.A. *Sovremennye sposoby opredeleniya stepeni razregulirovki opor kontaktnoi seti* [Modern methods of determining the degree of misalignment of catenary supports]. *Innovatsionnyi transport* [Innovative transport], 2016. No. 4 (22). Pp. 48–51.

Информация об авторах

Амиров Султан Файзулаевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электроснабжения, Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент, e-mail: amirovsvf@bk.ru

Бадретдинов Тимур Наильевич – докторант кафедры электроснабжения, Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент, e-mail: tim_bad2107@mail.ru

Баянов Ильдар Назипович – докторант, доцент кафедры электроснабжения, Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент, e-mail: ildar-lili@yandex.ru

Information about the authors

Sultan F. Amirov – Doctor of Engineering Science, Professor, head of the Subdepartment of Power Supply, Tashkent State Transport University, Tashkent. e-mail: amirovsvf@bk.ru

Timur N. Badretdinov – Doctoral student of the Subdepartment of Power Supply, Tashkent State Transport University, Tashkent, e-mail: tim_bad2107@mail.ru

Ildar N. Bayanov – Doctoral student, acting Associate Professor of the Subdepartment of Power Supply, Tashkent State Transport University, Tashkent, e-mail: ildar-lili@yandex.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.2(70).145-153

УДК 621.396.96

Анализ влияния траектории движения динамического управляемого объекта на точность определения навигационных параметров

В. В. Ерохин¹, **В. А. Караченцев²**, **Н. П. Малисов²**

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

² Иркутский филиал Московского государственного технического университета гражданской авиации, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ Ww_erohin@mail.ru

Резюме

Для реализации требований международной организации гражданской авиации по увеличению пропускной способности и эффективности использования воздушного пространства разработана стратегия зональной навигации и ее составляющая – свободная маршрутизация полетов. Целью исследований является анализ влияния траектории динамического управляемого объекта на точность определения координат при зональной навигации и свободной маршрутизации полетов. В статье проведен анализ влияния выбранного маршрута полета на точность определения навигационных параметров в рамках использования алгоритма расширенного фильтра Калмана. Показано, что существует однозначная зависимость радиальной погрешности, геометрического фактора и меры наблюдаемости от угла поворота траектории. На основе проведенного анализа предложено использовать меру наблюдаемости для формирования критерия оптимизации при реализации зональной навигации. Методами имитационного статистического моделирования подтверждена однозначная зависимость между геометрическим фактором, мерой наблюдаемости и следом ковариационной матрицы оши-

бок фильтрации для различных траекторий движения динамического управляемого объекта. Предложенный подход представляется более рациональным по сравнению с вычислением ковариационной матрицы ошибок оценивания при практической реализации алгоритмов оптимального управления в навигационном процессоре благодаря уменьшению объема вычислений. Результаты проведенного анализа позволяют в дальнейшем рассматривать максимум меры наблюдаемости в качестве решающего правила в задачах оптимизации траектории, в том числе и в алгоритмах управления наблюдениями.

Ключевые слова

динамический управляемый объект, оптимизация, наблюдаемость, управление траекторией, фильтр Калмана, погрешность навигационных определений, траектория, геометрический фактор

Для цитирования

Ерохин В.В. Анализ влияния траектории движения динамического управляемого объекта на точность определения навигационных параметров / В. В. Ерохин, В. А. Караченцев, Н. П. Малисов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 2 (70). – С. 145–153. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).145-153

Информация о статье

поступила в редакцию: 10.03.2021, поступила после рецензирования: 05.04.2021, принята к публикации: 16.04.2021

Analysis of the influence of the trajectory of motion of a dynamic controlled object on the accuracy of determining navigation parameters

V. V. Erokhin¹✉, V. A. Karachentsev², N. P. Malisov²

¹ Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

² The Irkutsk branch of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, Irkutsk, the Russian Federation

✉ Ww_erohin@mail.ru

Abstract

To implement the requirements of the International Civil Aviation Organization of increasing the capacity and use efficiency of airspace, an area navigation strategy and its component – free flight routing – have been developed. The aim of the research is to analyze the influence of the trajectory of a dynamic controlled object on the accuracy of determining coordinates in the course of area navigation and free flight routing. This article analyzes the influence of the chosen flight route on the accuracy of determining the navigation parameters within the framework of the Kalman's extended filter algorithm. It is shown that there is an unambiguous dependence of the radial error, geometric factor, and observability measure on the trajectory rotation angle. Based on the analysis, it is proposed to use the observability measure to form an optimization criterion in the process of implementation of area navigation. The methods of statistical simulation have confirmed the unambiguous relationship between the geometric factor, the observability measure and the trace of the covariance matrix of filtering errors for various trajectories of movement of a dynamic controlled object. The proposed approach seems to be more rational in comparison with the calculation of the covariance matrix of the estimation errors while practically implementing optimal control algorithms in the navigation processor because of the reduction in the amount of computations. The results of the analysis allow us to consider the maximum of the observability measure as a decision rule in the problems of trajectory optimization, as well as in observation control algorithms.

Keywords

dynamic controlled object, optimization, observability, trajectory control, Kalman's filter, navigation definition errors, trajectory, geometric factor

For citation

Erokhin V. V., Karachentsev V. A., Malisov N. P. Analiz vliyaniya traektorii dvizheniya dinamicheskogo upravlyаемого ob"ekta na tochnost' opredeleniya navigatsionnykh parametrov [Analysis of the influence of the trajectory of motion of a dynamic controlled object on the accuracy of determining navigation parameters]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2021, No. 2 (70), pp. 145–153. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).145-153

Article info

Received: 10.03.2021, Revised: 05.04.2021, Accepted: 16.04.2021

Введение

При классическом полете наведение таких динамических управляемых объектов (ДУО), как воздушные суда и беспилотные летательные аппараты обеспечивается за счет наземных радионавигационных средств, а маршруты прокладывают через ази-

мутальные радиомаяки, что приводит к серьезному уплотнению маршрутов. В то же время полеты проходят через заданные пункты по утвержденным трассам, которые имеют ряд изломов. Для реализации требований международной организации гражданской авиации по увеличению пропускной спо-

собности и эффективности использования воздушного пространства разработана стратегия свободной маршрутизации полетов. Согласно данной стратегии экипажам предоставляется возможность выполнять полет по оптимальному, в соответствии с заданным критерием, маршруту [1, 2]. При решении задачи построения маршрута полета необходимо учитывать требованиями безопасности, условия воздушной обстановки, расхода топлива, длительности полета, точностные характеристики самолетовождения и др. [3, 4]. Предлагаемый подход позволит повысить безопасность и экономичность авиационных перевозок, а также рационально использовать воздушное пространство [5].

Основная цель свободной маршрутизации полетов заключается в выведении ДУО по требуемой траектории в заданную область пространства за минимальный интервал времени при высокой точности навигационных определений и обеспечении требуемого уровня безопасности полетов. При этом достигаются экономия топлива и времени за счет распределения ДУО по наиболее коротким маршрутам. Реализация свободной маршрутизации полетов возможна только при высокой точности навигационного обеспечения за счет комплексной обработки информации в инерциально-спутниковых системах навигации (ИССН) [6, 7]. В то же время, при решении ряда задач, системы спутниковой навигации не удовлетворяют требуемым навигационным характеристикам, что обусловлено влиянием различных показателей, в том числе геометрического фактора (ГФ) [6, 7]. Погрешности, обусловленные влиянием дестабилизирующих факторов, существенно влияют на точность навигации. Далее представлены маршруты полета при зональной и классической навигации (рис. 1) (HDOP – Horizontal Dilution of Precision – горизонтальный геометрический фактор).

Для устранения недостатков спутниковой навигации применяют функциональные дополнения [7], в частности, контрольно-корректирующие станции. В качестве канала обмена навигационной информацией предлагается использовать ультракоротковолновую линию передачи данных радиовещательного автоматического зависимого наблюдения (АЗН-В). При организации обмена навигационной информацией взаимодействующие объекты системы АЗН-В представляют собой навигационные опорные точки (НОТ) [8]. Пропадание сигналов навигационных спутников (НС) в случае преднамеренных и непреднамеренных помех снижает точность местоопределения в бортовой аппаратуре глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС), в то же время абоненты АЗН-В создают избыточное количество НОТ [8–11]. В ГНСС НОТ являются НС, которые находятся на фиксированных орбитах и формируют более стабильный ГФ. В системе АЗН-В НОТ могут быть подвижные и неподвижные объекты: наземные станции, воздушные и морские суда и др. Объекты АЗН-В образуют многопозиционную систему, погрешности определения координат в которой зависят от траектории (маршрута) полета ДУО (рис. 2).

В работе [8] приведены результаты исследования эффекта уменьшения погрешностей бесплатформенной инерциальной навигационной системы при маневрировании ДУО. В частности, отмечено увеличение наблюдаемости определения курса при измерениях скорости. Кроме того, в [12] приведена иллюстрация зависимости среднеквадратического отклонения (СКО) определения курса от геометрии решения задачи определения местоположения и рассмотрены различные методы траекторного управления наблюдением. Результаты исследований [13] демонстрируют изменение ГФ при маневрировании ДУО.

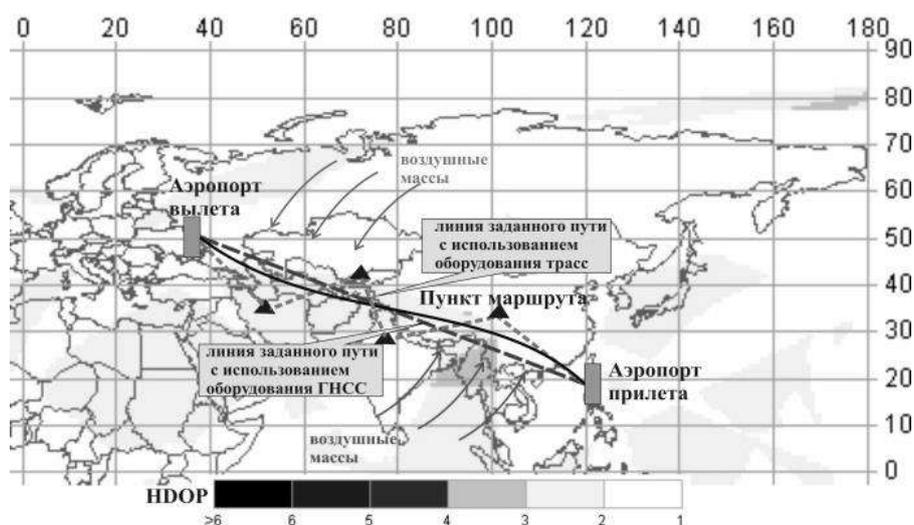


Рис. 1. Маршруты полета при классической и зональной навигации

Fig. 1. Flight routes for classical and area navigation

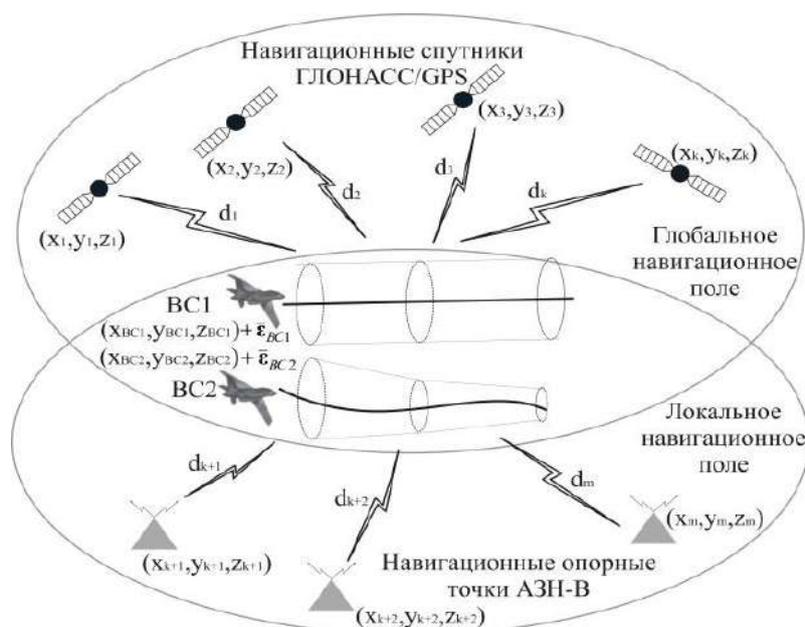


Рис. 2. Обмен информацией между взаимодействующими объектами в системе радиовещательного автоматического зависимого наблюдения

Fig. 2. Exchange of information between interacting objects in the system broadcast automatic dependent surveillance

Погрешности навигационных определений в ИССН зависят от различных условий функционирования, в том числе от ГФ, характеризующего взаимное положение объектов. Изменение маршрута полета может повысить, либо снизить точность позиционирования, что обуславливается характером маневрирования и начальным состоянием системы.

Цель работы – исследование влияния траектории ДУО на точность определения координат при свободной маршрутизации полетов.

Математическая модель

Для построения траектории при движении по маршруту применим модель ДУО, имитирующую управляемый полет, которая характеризуется вектором переменных состояний:

$$x(t) = [x(t), y(t), z(t), V(t), \psi(t), m(t)]^T, \quad (1)$$

где x, y, z – пространственные координаты; V – истинная воздушная скорость; ψ – курс; m – масса [14].

Динамика переменных вектора (1) представлена системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{dx}{dt} \equiv \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{V} \\ \dot{\psi} \\ \dot{m} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V \cos \psi \cos \gamma + w_x \\ V \sin \psi \cos \gamma + w_y \\ V \sin \gamma + w_h \\ (T - d) / m - g_0 \sin \gamma \\ L \sin \varphi / (mV) \\ -\eta T \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где φ – угол крена; γ – угол наклона траектории; d – сила лобового сопротивления; g_0 – ускорение свободного падения; L – подъемная сила; T – сила тяги двигателя; η – расход топлива; $W = [w_x, w_y, w_z]$ – вектор скорости ветра.

Согласно методике расчета η , силы L и d , приведенной в [15], вычисления производятся следующим образом:

$$L = \frac{C_L S \rho}{2} V^2; \quad d = \frac{C_d S \rho}{2} V^2,$$

где C_d – коэффициент лобового сопротивления; C_L – коэффициент подъемной силы; ρ – плотность воздуха; S – площадь крыла.

В (1), (2) значения величин $z, V, m, T, \gamma, \varphi$ задаются исходя из действующих ограничений на параметры ДУО. Управляющими сигналами являются угол наклона траектории γ , тяга двигателя T , угол крена φ .

Постановка задачи

Уравнения (2) в векторно-матричной форме имеют стандартный вид:

$$\frac{dx(t)}{dt} = F(t)x(t) + B(t)u(t) + G(t)w(t), \quad (3)$$

$$x(0) = M[x(0)],$$

где $u(t)$ – вектор управляющих сигналов; $u(t) \in U$ – множество допустимых значений управлений; $F(t)$ – матрица динамики системы; $B(t)$ – матрица коэффициентов управления; $w(t)$ – белый гаусс-

совский шум с нулевым математическим ожиданием и корреляционной матрицей

$M[w(t)w(t)^T] = Q(t)\delta(t - \tau)$; $Q(t)$ – положительно определенная матрица штрафов; $G(t)$ – матрица интенсивности шумов; $M[\bullet]$ – операция вычисления математического ожидания [16].

Для получения уравнения измерений необходимо учесть, что определение местоположения ДУО осуществляется в псевдодалномерном режиме, т. е. результаты навигационных измерений представляют собой псевдодалности (ПД):

– ДУО – НС D_1, D_2, \dots, D_m , где m – число принимаемых сигналов от НС;

– ДУО – НОТ $D_{m+1}, D_{m+2}, \dots, D_n$, где n – число принимаемых сигналов от НОТ.

Уравнение наблюдений имеет следующий вид:

$$\xi(t) = H(t)x(t) + n(t),$$

где $H(t) = \left[\frac{\partial h^T(x(t))}{\partial(x(t))} \right]^T$ – матрица якоби с элементами $\left\{ \frac{\partial h_i(x)}{\partial x_j} \right\}$; $n(t)$ – белый гауссовский шум измерения с корреляционной матрицей $M[n(t)n(t)^T] = R(t)\delta(t - \tau)$.

$$\text{Элементы матрицы } H = \begin{bmatrix} \frac{\partial D_{НС}}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial D_{НОТ}}{\partial \mathbf{x}} \end{bmatrix}^T$$

определяются как частные производные ПД по соответствующим переменным вектора состояния $x(t)$, в частности

$$H_{1,i} = \frac{\partial D_i}{\partial x} = \frac{x_i - x}{D_i},$$

где $D_i = c\tau_i(t) = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} + c\Delta t$

– значение псевдодалности от местоположения ДУО до i -го НС или НОТ; x_i, y_i, z_i – координаты i -го НС или НОТ; $\tau_i(t) = t_2 - t_1$ – длительность временного интервала между моментами t_1 и t_2 (задержка сигнала); c – скорость распространения радиоволн; Δt – расхождение шкал времени НС и ДУО.

Комплексная обработка навигационной информации

Используя методологию синтеза расширенного фильтра калмана [16] получим комплексный алгоритм навигационных определений в иссн, оптимальный по критерию

$$M[(x(t) - \hat{x}(t))(x(t) - \hat{x}(t))^T] = \min,$$

который имеет вид:

$$\frac{d\hat{x}(t)}{dt} = F(t)\hat{x}(t) + K(t)\left(\xi(t) - \frac{\partial h(\Delta x(t), t)}{\partial(\Delta x)} \hat{x}(t)\right), \quad (4)$$

$$K(t) = P(t) \frac{\partial h(\Delta x(t), t)}{\partial(\Delta x)} R^{-1}(t), \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{dP(t)}{dt} &= F(t)P(t) - \\ &- P(t) \left[\frac{\partial h(\Delta x(t), t)}{\partial(\Delta x)} \right]^T R^{-1}(t) \left[\frac{\partial h(\Delta x(t), t)}{\partial(\Delta x)} \right] P(t) + \\ &+ P(t)F^T(t) + G(t)Q(t)G^T(t). \end{aligned} \quad (6)$$

где $\hat{x}(t)$ – оптимальная оценка вектора состояния $x(t)$; $K(t)$ – матричный коэффициент усиления; $P(t)$ – матрица ошибок фильтрации.

В реальности движение ДУО характеризуется уравнением

$$\frac{dx_g(t)}{dt} = F_g(t)x_g(t) + G_g(t)u(t) + \eta(t), \quad (7)$$

$$x_g(0) = M[x_g(0)],$$

где $x_g(t) \in X$ – действительный вектор состояния ДУО; $\eta(t)$ – белый шум [17].

В соответствии с уравнениями (2)–(7) получим выражение для ошибки фильтрации:

$$\varepsilon(t) = x_g(t) - \hat{x}(t);$$

$$\begin{aligned} \frac{d\varepsilon}{dt} &= (F(t) - K(t)H(t))\varepsilon(t) + G(t)u(t) + \\ &+ \Delta F(t)x_g(t) + \eta(t) - K(t)n(t), \end{aligned} \quad (8)$$

где $\Delta F(t) = F_g(t) - F(t)$.

Из (8) следует, что ошибка фильтрации содержит как детерминированную, так и флуктуационную составляющие. При этом детерминированная составляющая зависит как от структуры системы обработки информации, определяемой составом внутренних связей, так и от соответствия $F_g(t)$ и $F(t)$. Таким образом:

$$M\|\varepsilon(t)\|^2 = \|\bar{\varepsilon}(t)\|^2 + tr\{P(t)\}, \quad (9)$$

где $\bar{\varepsilon}(t)$ – математическое ожидание $\varepsilon(t)$; $tr\{P(t)\}$ – математическая операция по вычислению следа ковариационной матрицы [18].

С учетом того, что $tr\{P(t)\}$ не зависит от $\eta(t)$ и $n(t)$ запишем:

$$\begin{aligned} \frac{d\varepsilon(t)}{dt} &= (F(t) - K(t)H(t))\bar{\varepsilon}(t) + \\ &+ G(t)u(t) + \Delta F(t)x_g(t). \end{aligned}$$

Погрешности навигационных определений в ИССН зависят от интенсивности шумов и помех, а также от ГФ. Отличительной особенностью свободной маршрутизации полетов является возможность управления взаимным положением ДУО на основе изменения параметров траекторного движения.

Для оценки влияния маршрута полета на точность определения координат используется ГФ K – коэф-

фициент, учитывающий взаимное положение НОТ и ДУО. Значение ГФ определяется по формуле [7]:

$$K = \left(\text{tr} \left[(H^T H)^{-1} \right] \right)^{-1/2}. \quad (10)$$

Элементы в составе матрицы $H = \begin{bmatrix} \frac{\partial D_{HC}}{\partial x} & \frac{\partial D_{HOT}}{\partial x} \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix}^T$ вычисляются как частные производные ПД $D = |D_{HC1}, \dots, D_{HCn}, D_{HOT1}, \dots, D_{HOTm}|^T$ по соответствующим переменным вектора состояния $x = |x, y, z, \tau|^T$:

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial D_{HC1}}{\partial x} & \frac{\partial D_{HC1}}{\partial y} & \frac{\partial D_{HC1}}{\partial z} & \frac{\partial D_{HC1}}{\partial \tau} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial D_{HCn}}{\partial x} & \frac{\partial D_{HCn}}{\partial y} & \frac{\partial D_{HCn}}{\partial z} & \frac{\partial D_{HCn}}{\partial \tau} \\ \frac{\partial D_{HOT1}}{\partial x} & \frac{\partial D_{HOT1}}{\partial y} & \frac{\partial D_{HOT1}}{\partial z} & \frac{\partial D_{HOT1}}{\partial \tau} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial D_{HOTm}}{\partial x} & \frac{\partial D_{HOTm}}{\partial y} & \frac{\partial D_{HOTm}}{\partial z} & \frac{\partial D_{HOTm}}{\partial \tau} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_{HC1} - x}{D_{HC1}} & \frac{y_{HC1} - y}{D_{HC1}} & \frac{z_{HC1} - z}{D_{HC1}} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_{HCn} - x}{D_{HCn}} & \frac{y_{HCn} - y}{D_{HCn}} & \frac{z_{HCn} - z}{D_{HCn}} & 1 \\ \frac{x_{HOT1} - x}{D_{HOT1}} & \frac{y_{HOT1} - y}{D_{HOT1}} & \frac{z_{HOT1} - z}{D_{HOT1}} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_{HOTm} - x}{D_{HOTm}} & \frac{y_{HOTm} - y}{D_{HOTm}} & \frac{z_{HOTm} - z}{D_{HOTm}} & 1 \end{bmatrix}$$

где n – число псевдодалностей до спутников; m – число псевдодалностей до НОТ (наземных, воздушных).

Среднеквадратическая радиальная ошибка σ_{CPO} (CPO) и среднеквадратическое сферическое отклонение σ_{CCO} (CCO) определяются по формулам:

$$\sigma_{CPO} = \sigma_{\text{ПД}} K_{XY}; \sigma_{CCO} = \sigma_{\text{ПД}} K,$$

где $\sigma_{\text{ПД}}$ – СКО погрешности определения ПД [7].

Использование ГФ для анализа точности местоопределения по данным многопозиционных радионавигационных систем позволяет проводить параметрические исследования без учета данных о точности определения ПД [7].

Ввиду того, что наблюдаемость переменных состояния ДУО является необходимым условием их качественной оценки, перед синтезом навигационного процессора на основе фильтра Калмана требуется исследовать ИССН на наблюдаемость. Характеристикой точности оценки навигационных параметров является мера наблюдаемости, которая при бесконечно малом значении времени наблюдения $\Delta t = t_k - t_0$ определяется выражением:

$$\Gamma = \int_{t_0}^{t_k} H^T H dt = H^T H \Delta t. \quad (11)$$

Очевидно, что чем больше значение $\det \Gamma$, тем выше точность оценки $\hat{x}(t)$. При этом, если наблюдается только часть элементов $x(t)$, то $\det \Gamma = 0$, следовательно, вектор $x(t)$ не определяется [18]. Значит, мера наблюдаемости может выступать в качестве показателя эффективности при анализе влияния маршрута (траектории) полета ДУО на точность оценки переменных состояния.

Такими образом, $\det \Gamma$ может использоваться как мера наблюдаемости системы траекторного управления ДУО. С помощью меры наблюдаемости можно дать количественную оценку «хорошо» и «слабо» наблюдаемым навигационным параметрам, что даст возможность принимать решение об управлении траекторией полета с целью повышения точности позиционирования. Предложенный подход анализа влияния траектории движения ДУО на точность местоопределения позволит проводить системный анализ навигационного обеспечения свободной маршрутизации полетов.

Мера наблюдаемости может характеризовать наблюдаемость переменных вектора состояния ДУО в вертикальной и горизонтальной плоскостях и позволяет количественно определить «хорошо» и «слабо» наблюдаемые координаты. Поэтому меру наблюдаемости компонент оцениваемого вектора состояния можно использовать для решения задачи оптимизации траектории с целью минимизации погрешностей определения координат ДУО. При таком подходе решающее правило оптимизации будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} u(t) &= \arg \min_{u(t) \in U} (\text{tr}[P(t)]) = \\ &= \arg \min_{u(t) \in U} ((\text{tr}[(H(t)^T H(t))^{-1}])^{1/2}) = \\ &= \arg \max_{u(t) \in U} (\det[H(t)^T H(t)]). \end{aligned}$$

Проведенный анализ указывает на однозначную зависимость радиальной погрешности, геометрического фактора и меры наблюдаемости от параметров траекторного движения. На основе проведенного анализа предложено использовать меру наблюдаемости для формирования критерия оптимизации при реализации зональной навигации. Предложенный подход представляется более рациональным по сравнению с вычислением ковариационной матрицы ошибок оценивания при практической реализации алгоритмов оптимального управления в навигационном процессоре благодаря уменьшению объема вычислений.

Моделирование и обсуждение результатов

Методами имитационного статистического моделирования проведены исследования рассмотренных характеристик. Моделировалась ситуация воздушной обстановки в районе аэроузла «Раздолье» (рис. 6). Для анализа возможных ситуаций выбраны пересекающиеся трассы P 173, UA 310 и UR 478. Воздушные суда (ВС) движутся по данным маршрутам на эшелоне $H = 10\,600$ м. В процессе движения ВС вычисляет координаты на основе псевдодальномерных, моделей навигационных измерений и орбитального движения спутников по данным альманаха, а также при использовании сигнала станции АЗН-В. В качестве исходных данных для моделирования использовались параметры характеризующие работу ГНСС и АЗН-В:

– шумы измерений $\sigma_{D,GNSS} = 33$ м, $\sigma_{\dot{D},GNSS} = 0,1$ м/с, $\sigma_{D,AZH} = 10$ м, $\sigma_{\dot{D},AZH} = 0,05$ м/с;

– дискретность отсчетов моделирования полета ДОУ по траектории $dt = 0,001$ с;

– дискретность поступления данных и обработки измерений в фильтре Калмана $dT_1 = 0,2$ с.

Выполнялось построение маршрутов полета ВС на основе модели (1), (2): кривая 1 соответствует траектории при полете по наикратчайшему маршруту при зональной навигации? 2 – классической траектории полета на радиомаяк.

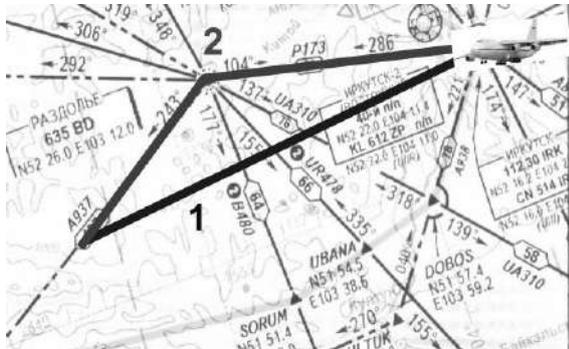


Рис. 3. Моделируемые траектории полета
Fig. 3. Simulated flight paths

Далее представлены результаты расчета радиальной среднеквадратической погрешности местопределения (рис. 4), в соответствии с выражением (6) для моделируемых траекторий (см. рис. 3): кривая 1 соответствует траектории полета 1; кривая 2 – траектории 2 маршрутного полета по промежуточным пунктам маршрута.

Представлены графики горизонтального ГФ HDOP, рассчитанные по формуле (10) для моделируемых траекторий (рис. 5).

На (рис. 6) представлены графики меры наблюдаемости, полученные в результате расчетов на основе выражения (11) для моделируемых траекторий.

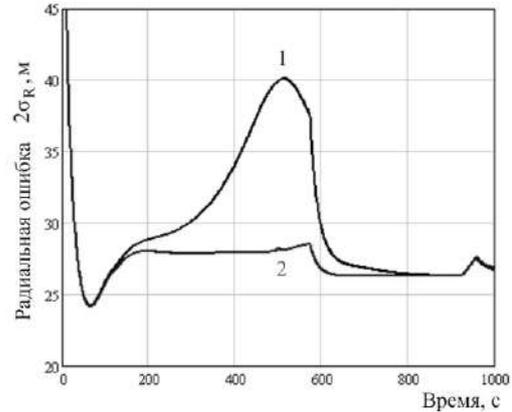


Рис. 4. Среднеквадратическая радиальная ошибка
Fig. 4. Root mean square radial error

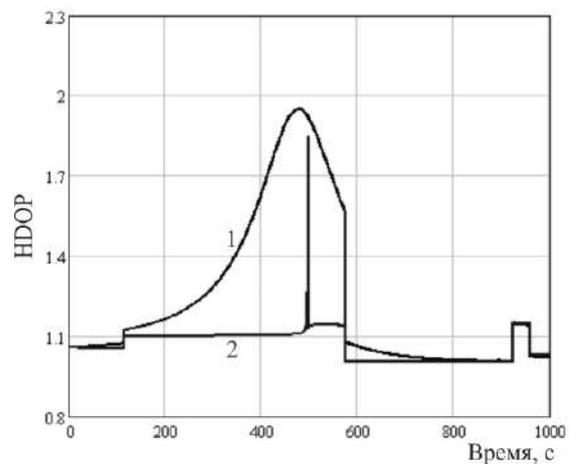


Рис. 5. Геометрический фактор
Fig. 5. Geometric factor

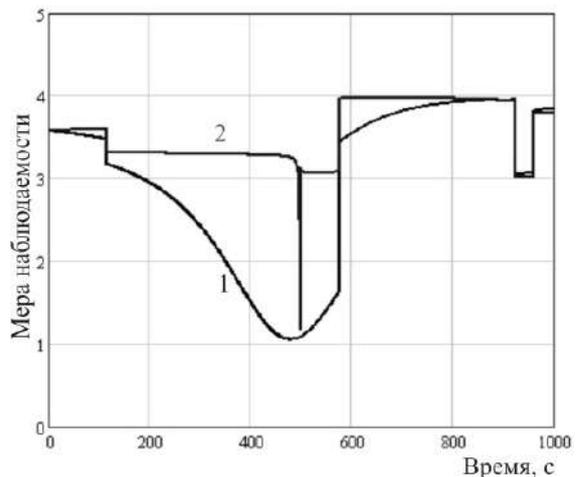


Рис. 6. Мера наблюдаемости
Fig. 6. Measure of observability

Результаты исследований (см. рис. 4–6), указывают на существование однозначной зависимости радиальной погрешности, ГФ и меры наблюдаемости от траектории полета. Чем больше значение \det

Γ , тем выше точность оценки $\hat{x}(t)$, если наблюдается только часть элементов $x(t)$, то $\det \Gamma = 0$, следовательно, вектор $x(t)$ не определяется. В то же время, чем больше $\det \Gamma$, тем выше точность оценки $\hat{x}(t)$. Таким образом, мера наблюдаемости может выступать в качестве показателя эффективности при анализе влияния траектории полета на точность оценки навигационных параметров.

При максимальном значении меры наблюдаемости достигается минимизация геометрического фактора и радиальной погрешности, что дает основания для применения максимума меры наблюдаемости в формировании решающего правила в задачах свободной маршрутизации полетов, в том числе и в алгоритмах управления наблюдениями. При практической реализации алгоритмов оптимального управления в специализированных навигационных процессорах изложенный в статье подход представляет

ся более рациональным за счет уменьшения объема вычислений по сравнению с вычислением ковариационной матрицы ошибок оценивания.

Заключение

Анализ результатов исследований показывает существование однозначной зависимости радиальной погрешности определения местоположения, ГФ и меры наблюдаемости от траектории полета.

Результаты исследования влияния маршрута полета на точность местоопределения ДУО позволяют проводить информационный анализ навигационного обеспечения системы траекторного управления и выполнять планирование маршрута полета. Обоснована возможность использования меры наблюдаемости при формировании решающего правила в алгоритмах оптимизации траектории полета ДУО.

Список литературы

1. Maolaisha A. Free-Flight Trajectory Optimization by Mixed Integer Programming : a thesis submitted to fulfillment of the requirements for the degree of master in science. Applied Mathematics and Optimization Series (AMOS). Hamburg, 2015. 74 p.
2. Toratani D. Study on Simultaneous Optimization Method for Trajectory and Sequence of Air Traffic Management : doctoral Thesis. Yokohama National University, 2016. 101 p.
3. Rub'en Ant'on Guijarro. Commercial aircraft trajectory optimization using optimal control : bachelor Thesis. Universidad Carlos III de Madrid, 2015. 64 p.
4. Multiphase Mixed-Integer Optimal Control Approach to Aircraft Trajectory Optimization / M. Soler, A. Olivares, E. Staffetti, P. Bonami // Journal of Guidance, Control and Dynamics. 2013. Vol. 36(5). P. 1267–1277.
5. Wickramasinghe N.K., Harada A., Miyazawa Y. Flight trajectory optimization for an efficient air transportation system // Proceedings of the 28th International Congress of the Aeronautical Sciences. 2012. Pp. 1–12.
6. Интегрированные инерциально-спутниковые системы ориентации и навигации / Г.И. Емельянцева, А.П. Степанов. СПб. : Концерн «ЦНИИ «Электрон», 2016. 394 с.
7. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. Изд. 4-е, перераб. и доп. М. : Радиотехника, 2010. 800 с.
8. Шестаков И.Н., Крыжановский Г.А. Расширение поля СРНС с помощью наземных станций АЗН-В // Науч. вестн. МГТУ ГА. 2014 (210). С. 114–117.
9. Investigation and realisation of integrated navigation system using optimal pseudo sensor enhancement method / Ya.M. Madany, El-Sayed A. El-Badawy, Nour Eldin H. Ismail et al. // IET Radar, Sonar & Navigation. 2019. Vol. 13. DOI: 10.1049/iet-rsn.2018.5295.
10. Cho T., Lee C., Choi. S. Multi-Sensor Fusion with Interacting Multiple Model Filter for Improved Aircraft Position Accuracy // Sensors. 2013. Vol. 13. P. 4122–4137. DOI: 10.3390/s130404122.
11. Strohmeier M., Lenders V., Martinovic I. On the Security of the Automatic Dependent Surveillance-Broadcast // Protocol IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2014. Vol. 17 (2). P. 1065–1087.
12. Методы траекторного управления наблюдением в интегрированных многодатчиковых двухпозиционных системах радиомониторинга воздушного базирования / В.И. Меркулов, Д.А. Миляков, О.Е. Радоминов и др. // Журнал радиоэлектроники. 2016. № 4. С. 1–64.
13. Aleshechkin A.M., Erokhin V.V. Trajectory optimization of dynamically controlled objects in INS/GNSS integrated navigation system // Gyroscopy and Navigation. 2017. Vol. 8. Iss. 1. P. 15–23.
14. Монаков А.А., Киселев В.Ю. Предсказание траектории воздушного судна в автоматизированных системах управления воздушным движением // Информационно-управляющие системы. 2015. № 4. С. 33–40.
15. User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA). Revision 3.12 [Electronic resource]. Access mode: URL: https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/field_tabs/content/documents/sesar/user-manual-bada-3-12.pdf (accessed date: 06/05/2017).
16. Bruce P., A Gibbs. Advanced Kalman filtering, least-squares and modeling: a practical handbook. John Wiley & Sons, Inc., publication, 2011. 605 p.
17. Тятюшкин А.И. Многометодная технология оптимизации управляемых систем. Новосибирск : Наука, 2006. 343 с.
18. Карапетян Р.М. Алгоритмы оценки качества и синтеза линейных систем управления. Рига : ЛПИ ВНТОМ, 1989. 52 с.

References

1. Maolaiaisha A. Free-flight trajectory optimization by mixed integer programming. A thesis submitted to fulfillment of the requirements for the degree of master in science. Applied Mathematics and Optimization Series (AMOS) # 24. University of Hamburg. 2015. 74 p.
2. Toratani D. Study on simultaneous optimization method for trajectory and sequence of air traffic management: doctoral thesis. Yokohama National University, 2016. 101 p.
3. Rub'en Ant'on Guijarro. Commercial aircraft trajectory optimization using optimal control: Bachelor Thesis. Universidad Carlos III de Madrid, 2015. 64 p.
4. Soler M., Olivares A., Staffetti E., Bonami P. Multiphase mixed-integer optimal control approach to aircraft trajectory optimization. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 2013. Vol. 36(5). Pp. 1267–1277.
5. Wickramasinghe N.K., Harada A., Miyazawa Y. Flight trajectory optimization for an efficient air transportation system. Proceedings of the 28th International Congress of the Aeronautical Sciences, 2012. Pp. 1–12.
6. Emelyantsev G.I., Stepanov A.P. Integrirovannye inertial'no-sputnikovye sistemy orientatsii i navigatsii [Integrated inertial-satellite systems of orientation and navigation]. In Peshekhonov V.G., the member of the RAS (ed.) St. Petersburg: The State Research Center of the Russian Federation OAO «Elektropribor» Group of Companies Publ., 2016. 394 p.
7. GLONASS. Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya [GLONASS. Principles of construction and functioning] In Perov A.I., Kharisov V.N. (eds.) 4th ed., rev. and abridged. Moscow: Radiotekhnika Publ., 2010. 800 p.
8. Shestakov I.N., Kryzhanovskii G.A. Rasshirenie polya SRNS s pomoshchyu nazemnykh stantsii AZN-V [Expansion of the SRNS field with the help of ground stations ADS-B]. *Nauchnyi vestnik MGTU GA* [Scientific bulletin of MSTU CA]. 2014 (210). Pp. 114–117.
9. Madany Ya.M., El-Badawy El-Sayed A., Ismail Nour Eldin H., Soliman A.M. Investigation and realisation of integrated navigation system using optimal pseudo sensor enhancement method. *Journal: IET Radar, Sonar & Navigation*, 2019. Vol. 13 [Electronic media]. DOI: 10.1049/iet-rsn.2018.5295. URL: <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-rsn.2018.5295>. (Accessed: February 16, 2019).
10. Cho T., Lee C., Choi S. Multi-sensor fusion with interacting multiple model filter for improved aircraft position accuracy. *Sensors*, 2013. Vol. 13. Pp. 4122–4137; DOI:10.3390/s130404122.
11. Strohmeier M., Lenders V., Martinovic I. On the security of the automatic dependent surveillance-broadcast. *Protocol IEEE communications surveys & tutorials*, 2014. Vol. 17 (2). Pp. 1065–1087.
12. Merkulov V.I., Milyakov D.A., Radominov O.E., Chernov V.S. Metody traektorного upravleniya nablyudeniem v integrirovannykh mnogodatchikovykh dvukhpozitsionnykh sistemakh radiomonitoringa vozdušnogo bazirovaniya [Methods of the trajectory control of observation in integrated multi-sensor two-position airborne radio monitoring systems], *Zhurnal radioelektroniki* [Radio electronics journal], 2016. No. 4. Pp. 1–64.
13. Aleshechkin A.M., Erokhin V.V. Trajectory optimization of dynamically controlled objects in INS/GNSS integrated navigation system. *GyroscoPy and Navigation*, 2017. Vol. 8. Iss. 1. Pp. 15–23.
14. Monakov A.A., Kiselev V.Yu. Predskazanie traektorii vozdušnogo sudna v avtomatizirovannykh sistemakh upravleniya vozdušnym dvizheniem [Predicting the trajectory of an aircraft in automated air traffic control systems. Informatsionno-upravlyayushchie sistemy [Information and control systems], 2015. No. 4. Pp. 33–40.
15. User manual for the base of aircraft data (BADA). Revision 3.12 [Electronic media]. URL: https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/field_tabs/content/documents/sesar/user-manual-bada-3-12.pdf (Accessed: May 06, 2017).
16. Bruce P., Gibbs A. Advanced Kalman filtering, least-squares and modeling: a practical handbook. John Wiley & Sons, Inc., publication, 2011. 605 p.
17. Tyatyushkin A.I. Mnogometodnaya tekhnologiya optimizatsii upravlyayemykh sistem [Multi-method technology of optimizing controlled systems]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2006. 343 p.
18. Karapetyan R.M. Algoritmy otsenki kachestva i sinteza lineynykh sistem upravleniya [Algorithms of quality assessment and synthesis of linear control systems]. Riga, 1989. 52 p.

Информация об авторах

Ерохин Вячеслав Владимирович – д-р техн. наук, доцент, доцент кафедры информационных систем и защиты информации, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: Ww_erohin@mail.ru
Караченцев Виталий Анатольевич – канд. техн. наук, доцент кафедры авиационного радиоэлектронного оборудования, Иркутский филиал Московского государственного технического университета гражданской авиации, г. Иркутск e-mail: kara1126@mail.ru
Малисов Николай Павлович – ст. преподаватель кафедры авиационного радиоэлектронного оборудования, Иркутский филиал Московского государственного технического университета гражданской авиации, г. Иркутск e-mail: malisovnik@mail.ru

Information about the authors

Vyacheslav V. Erokhin – Doctor of Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Subdepartment of Information Systems and Information Security, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: Ww_erohin@mail.ru
Vitalii A. Karachentsev – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Subdepartment of Aviation Radioelectronic Equipment, Irkutsk branch of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, Irkutsk, e-mail: kara1126@mail.ru
Nikolai P. Malisov – Senior Lecturer at the Subdepartment of Aviation Radioelectronic Equipment, Irkutsk Branch of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, e-mail: malisovnik@mail.ru

Изменение работы тягового подвижного состава на участках железных дорог Восточного полигона

А. А. Власенский¹, Г. И. Суханов²✉, А. В. Супруновский², И. Г. Белозерова³

¹ ОАО «РЖД» Центр управления перевозками на Восточном полигоне, г. Иркутск, Российская Федерация

² Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

³ Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, Российская Федерация

✉ sukhanov_gi@irgups.ru

Резюме

Восточный полигон является ключевой транспортной артерией Российской Федерации, которая позволяет доставлять различные грузы в Азиатско-Тихоокеанский регион. Данное направление является перспективным в рамках поставленных задач Правительством РФ для экономического роста страны. На сегодняшний день приоритетной задачей является организация тяжеловесного движения на сети железных дорог Восточного полигона. Это требует пересмотреть подход к организации ряда показателей эксплуатационной работы. Один из таких параметров – количество плановых технических осмотров локомотивов. При использовании машин нового типа появится возможность уменьшить количество технических осмотров. Это позволит увеличить длину пробега локомотива и, следовательно, сократить количество стоянок на технических станциях. В статье рассмотрены варианты работы тяговых плеч локомотивов на Восточном полигоне. Среди них были выделены наиболее проблемные, которые влияют на эксплуатационные показатели работы, а именно, увеличивают число технических осмотров. Это влечет за собой увеличение времени простоя на станциях, а в некоторых случаях требует подвода дополнительных тяговых единиц на станции. В работе предлагается измененная схема работы локомотивов на участках Восточного полигона, что позволит исключить технические осмотры на станции Карымская и даст возможность увеличить длину пробега локомотивов. Данное предложение позволит более эффективно использовать как тяговые ресурсы, так и время работы локомотивных бригад.

Ключевые слова

железнодорожный транспорт, Восточный полигон, тяговые ресурсы, оборот локомотива

Для цитирования

Власенский А. А. Изменение работы тягового подвижного состава на участках железных дорог Восточного полигона / А. А. Власенский, Г. И. Суханов, А. В. Супруновский, И. Г. Белозерова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 2 (70). – С. 154–161. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).154-161

Информация о статье

поступила в редакцию: 06.05.2021, поступила после рецензирования: 13.05.2021, принята к публикации: 19.05.2021

Changes in the operation of locomotives on the railway sections of the Eastern polygon

A. A. Vlasenskii¹✉, G. I. Sukhanov², A. V. Suprunovskii², I. G. Belozerova³

¹ OAO «RZD» Transportation control center at the Eastern polygon, Irkutsk, the Russian Federation

² Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

³ Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, the Russian Federation

✉ sukhanov_gi@irgups.ru

Abstract

The Eastern polygon is a key transport artery of the Russian Federation that allows the delivery of various goods to the Asia-Pacific region. This direction is promising within the framework of the tasks set by the government for the country's economic growth. At the moment, the priority task has become the organization of heavy traffic on the railway network of the Eastern polygon. This, in turn, requires a revision of the approach to the organization of a number of indicators of operational work. One of these parameters is the number of scheduled technical inspections of locomotives. When using machines of a new type, it becomes possible to reduce the amount of maintenance. This will increase the length of the locomotive's mileage and, as a result, reduce the number of stops at technical stations. The article discusses the options for the operation of locomotive runs on the Eastern polygon. Among them, the most problematic ones were identified that affect the operational performance of work, namely, increase the number of maintenance. This entails an increase in detention at the stations, and in some cases requires the supply of additional traction units at the station. The paper proposes a modified scheme of locomotive operation in the sections of the Eastern polygon, which will eliminate maintenance at the Karymskaya station and will make it possible to increase the length of the locomotive mileage. This proposal will allow more efficient use of both traction resources and the operating time of locomotive crews.

Keywords

railway transport, Eastern polygon, traction resources, locomotive turnover

For citation

Vlasenskii A. A., Sukhanov G. I., Suprunovskii A. V., Belozerova I. G. Izmeneniye raboty tyagovogo podvizhnogo sostava na uchastkakh zheleznykh dorog Vostochnogo poligona [Changes in the operation of locomotives on the railway sections of the Eastern polygon]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 2 (70), pp. 154–161. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).154-161

Article Info

Received: 06.05.2021, Revised: 13.05.2021, Accepted: 19.05.2021

Введение

В конкурентной среде рыночной экономики российские железные дороги должны постоянно изыскивать возможности повышения эффективности своей деятельности. Важную роль в этом играет переход к полигонным технологиям управления перевозочным процессом, основанным на организации эксплуатационной работы не в пределах железных дорог, а на укрупненных, технологически увязанных полигонах сети [1, 2].

В настоящее время доля электрифицированных линий с каждым годом увеличивается. Образовались протяженные направления с электрической тягой. При этом многие участки обращения локомотивов оказались расположенными в пределах двух и более железных дорог, что стало затруднять эффективное управление локомотивным парком [2, 3].

В связи с увеличением доли экспортных грузов и ряда других факторов образовались крупные грузопотоки с дальностью следования 4 тыс. км и более [3, 4]. В результате формируется значительное число поездов, следующих без переработки на большие расстояния, с которыми локомотивы могут следовать без отцепки от составов на протяженных полигонах [4].

Учитывая повышенную концентрацию перевозок на грузонапряженных направлениях, сегодня особенно необходимо увеличение массы грузовых поездов. Единое управление локомотивным парком на крупных полигонах сети способствует успешному решению этой задачи [5, 6].

Существующий порядок работы тягового подвижного состава в грузовом движении на участках железных дорог Восточного полигона

На железных дорогах, входящих в состав Восточного полигона, определены основные тяговые направления эксплуатации локомотивов в грузовом движении, на которых выполняется технологический подвод локомотивов под грузовые поезда. Выбор таких направлений обеспечивает безотцепочное проследование до завершения, отмеченного в технологии стыка тягового плеча или пункта назначения поезда [7, 8].

Варианты работы тяговых плеч.

1. Мариинск – Карымская – Забайкальск.

Обслуживается электровозами серий: 1,5ВЛ80, ВЛ80, ВЛ85, 2ЭС5К, 3ЭС5К.

На станцию Мариинск, пункт смены рода тока, грузовые поезда четного направления подводятся тяговым подвижным составом Северо-Западного полигона, далее под поезда выдаются электровозы переменного тока приписки эксплуатационных локомотивных депо Восточного полигона (рис. 1).

Грузовые поезда назначением на станции Красноярской, Восточно-Сибирской и Забайкальской железных дорог до станций Карымская или Забайкальск обслуживаются электровозами серии ВЛ80, 1,5ВЛ80, ВЛ85, 2ЭС5К, 3ЭС5К с установленными весовыми нормами и остаточным пробегом между проведением технического обслуживания в объеме ТО-2 (техническое обслуживание).

По станции Карымская под четное направление

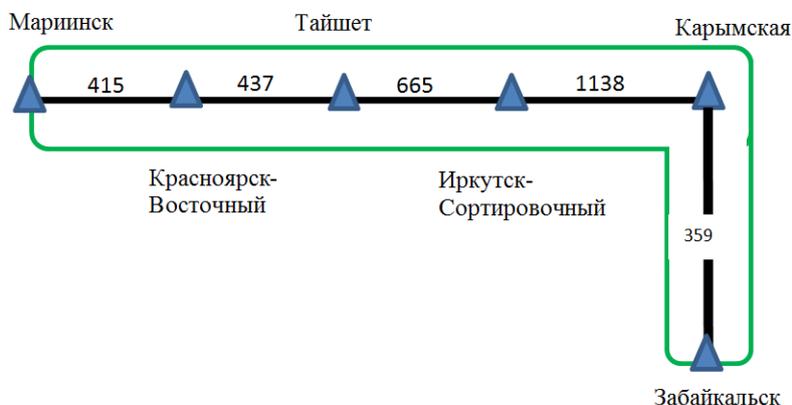


Рис. 1. Участок тягового плеча Мариинск – Забайкальск
Fig. 1. A section of the Mariinsk–Zabaikal'sk locomotive run

грузовых поездов назначением на станцию Забайкальск подвязываются электровозы приписки к эксплуатационным депо Восточно-Сибирской и Красноярской железной дороги серий ВЛ85, 1,5ВЛ80, ВЛ80, 2ЭС5К, 3ЭС5К. После проведения ТО-2 электровозы следуют с поездами до пункта Забайкальск и с оборота подвязывают под нечетные поезда назначением на Тайшет, Мариинск. По станции Карымская нечетные поезда пропускаются без отцепки машины от поезда, если остаточный пробег между проведением технического обслуживания в объеме ТО-2 в зависимости от назначения поезда соответствует установленным нормам. Транзитные поезда для станции Карымская назначением станции Забайкальск пропускаются безостановочно по станции Карымская с использованием участка работы Чита – Оловянная локомотивных бригад эксплуатационного локомотивного депо Чита. При этом проведение ТО-2 электровозам выполняется на пункте технического обслуживания локомотивов (ПТОЛ) станции Борзя. По станции Карымская нечетные поезда пропускаются без отцепки локомотива от поезда [9, 10].

2. Мариинск – Карымская.

По станции Мариинск под четные грузовые поезда, направлением на станцию Карымская, подвязываются электровозы серии ВЛ80, 1,5ВЛ80, ВЛ85,

2ЭС5К, 3ЭС5К после проведения ТО-2 на пункты технического осмотра станции Мариинск или отправляются с оборота с остаточным пробегом в соответствии с нормами. По станции Тайшет ТО-2 проводится локомотивам, прибывающим на станцию с поездами в расформирование.

По станции Карымская локомотивы отцепляются от поездов для выполнения ТО-2, после его проведения подвязываются под нечетные поезда (рис. 2).

По итогам работы за 2020 г. выполнены к плану следующие эксплуатационные показатели:

- объем работы (101,2 %);
- среднесуточная производительность локомотива (100,6 %);
- среднесуточная производительность локомотива рабочего парка в грузовом движении (101,0 %);
- среднесуточный пробег локомотива (101,5 %);
- доля грузовых отправок в груженых вагонах с соблюдением срока доставки (105,8 %).

Не выполнены к плану следующие показатели:

- участковая скорость ДО-10ВЦ (97,4 %);
- средний вес поезда (98,1 %);
- техническая скорость (99,8 %) [12].

Сравнение эксплуатационных показателей приведены в таблице ниже.



Рис. 2. Участок тягового плеча Мариинск – Карымская
Fig. 2. A section of the Mariinsk–Karymskaya locomotive run

Эксплуатационные показатели работы Operational performance indicators

Показатель	Единица измерения	Объект исследования						
		12 мес., 2019 г.	12 мес. 2020 г.		К плану		К отчету	
			План	Отчет	+, –	%	+, –	%
Объем работы	млрд ткм брутто	377,994	380,387	382,672	2,286	100,6	4,679	101,2
Среднесуточная производительность локомотива	тыс. ткм брутто/лок	1 628	1 630	1 637	7	100,4	9	100,6
Среднесуточная производительность локомотива рабочего парка в грузовом движении	тыс. ткм брутто	2 125	2 111	2 147	36	101,7	22	101,0
Участковая скорость ДО-10ВЦ	км/ч	42	42	41	–1	98,1	–1	97,4
Средний вес поезда	т	3 937	3 897	3 861	–36	99,1	–76	98,1
Среднесуточный пробег локомотива	км	721	–	732	732	–	11	101,5
Техническая скорость	км/ч	46	46	46	0	99,0	0	99,8
Доля грузовых отправок в груженых вагонах с соблюдением установленного срока доставки	%	85,5	–	90,5	–	–	5	105,8

Удлиненные плечи обслуживания тягового подвижного состава на Восточном полигоне

В настоящее время широкое распространение получили контейнерные и рефрижераторные поезда, следующие по твердым ниткам графика на протяженных полигонах. Постоянно растет и число отправительских и технических маршрутов, следующих на большие расстояния по согласованным между железными дорогами ниткам графика для грузовых поездов. Тяговое обслуживание таких поездов требует увеличения зон управления тяговыми ресурсами [13].

В свою очередь это вызывает необходимость первоочередного внедрения полигонной технологии управления тяговыми ресурсами с расширением границ управления локомотивами и локомотивными бригадами.

Одним из барьерных мест в продвижении поездопотока на Восточном полигоне является станция Карымская.

1. Хабаровск II – Иркутск-Сортировочный.

Обслуживается электровозами серии ЗЭС5к. Локомотивы после проведения ТО-2 на ПТОЛ станции Хабаровск II подвязываются под нечетные поезда назначением на станцию Иркутск-Сортировочный и следуют до станции назначения без отцепки от поезда. На станции Иркутск-Сортировочный локомотив отцепляется от поезда для проведения ТО-2. После проведения ТО-2 данные локомотивы подвязываются под поезда своего формирования назначением на станцию Хабаровск II. Локомотивы следуют без отцепки от поезда до станции Хабаровск II, где отцепляются от поезда для проведения ТО-2 (рис. 4) [14].

Для данных поездов определяется требование безостановочного проследования станции Карымская на участке Чита – Чернышевск, Чернышевск – Чита локомотивными бригадами эксплуатационных депо Чита, Чернышевск, Карымская (после отдыха по станциям Чита, Чернышевск).

2. Уруша – Междуреченск – Уруша.

Обслуживается локомотивами серии ЗЭС5к. По

станции Уруша под нечетные грузовые поезда назначением на станцию Междуреченск, Мереть, Кийзак, Тырган, после проведения ТО-2 подвязываются электровозы серии ЗЭС5к. По станции Карымская проследование данных нечетных поездов производится без отцепки локомотива от поезда.

По станции Нижнеудинск под данные нечетные поезда приоритетно подвязываются локомотивные бригады приписки Саянская, находящиеся на отдыхе в данном пункте оборота, а также локомотивные бригады эксплуатационного локомотивного депо (ТЧЭ) Нижнеудинск, имеющие заключение на участке Нижнеудинск – Саянская, которые проследуют станцию Тайшет безостановочно. При подвязке локомотивных бригад, не имеющих заключение на данном участке, станцию Тайшет данные поезда в нечетном направлении проследуют без отцепки локомотива от поезда с минимальным временем стоянки для смены локомотивных бригад. После прибытия на станцию Междуреченск локомотивы отцепляются от нечетных поездов для проведения ТО-2.

По станции Междуреченск электровозы серии ЗЭС5к после проведения ТО-2 подвязываются под четные грузовые поезда массой 6 300 т назначением Хабаровск II [15, 16].

По станции Саянская под данные четные поезда приоритетно подвязываются локомотивные бригады приписки ТЧЭ Нижнеудинск, ТЧЭ Тайшет, находящиеся на отдыхе в данном пункте оборота, а также локомотивные бригады эксплуатационного локомотивного оборотного депо (ТЧЭ) Саянская, имеющие приписку на участке Саянская – Нижнеудинск, которые проследуют станцию Тайшет безостановочно. При отсутствии локомотивных бригад, имеющих приписку на данном участке, станцию Тайшет данные поезда в четном направлении проследуют без отцепки локомотива от поезда с минимальным временем стоянки для смены локомотивных бригад (рис. 4).

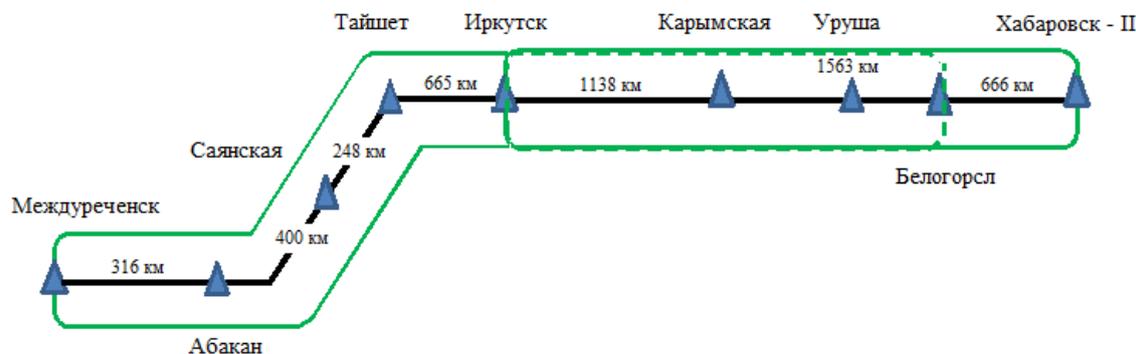


Рис. 4. Участок тягового плеча Междуреченск – Хабаровск II

Fig. 4. A section of the Mezhdurechensk–Khabarovsk II locomotive run

Организация пропуска контейнерных поездов на участке Мариинск – Находка – Хабаровск II

Контейнерные поезда обслуживаются электровозами: серии 2ЭС5к, 3ЭС5к с увеличенными временными параметрами периодичности проведения ТО-2 (рис. 5).

На станции Мариинск под четные контейнерные поезда назначением на станцию Находка подвязываются локомотивы после проведения им ТО-2 на пункте технического осмотра Мариинск. Данный осмотр требуется в соответствии с выполненным пробегом. На станции Находка все машины отцепляются от поездов и направляются на станцию Хабаровск II для проведения регламентного ТО-2 [17].

По станции Хабаровск II локомотивы после проведения ТО-2 подвязываются под четные поезда до станции Находка, где с оборота подвязываются под нечетные контейнерные поезда назначением на станцию Мариинск.

Организация пропуска поездов массой 7 100 т на участке Мариинск – Находка – Смоляниново

Обслуживается электровозами серии 3ЭС5к с поосным регулированием и независимым возбуждением тяговых двигателей, с увеличенными временными параметрами периодичности проведения ТО-2 240 ч (рис. 6).

По станции Мариинск под поезда массой 7 100 т назначением на станцию Находка подвязываются электровозы после проведения им ТО-2 на пункте технического осмотра Мариинск. На станции Смоляниново все тяговые единицы отцепляются от поездов

для проведения ТО-2, после чего подвязываются под нечетные контейнерные или транзитные поезда назначением на станцию Мариинск и далее [18].

Возможные варианты обслуживания электровозов серии 2ЭС5к, 3ЭС5к приписки Забайкальской и Дальневосточной дирекций тяги с увеличенными временными параметрами периодичности проведения ТО-2 (240 ч):

– Карымская (с ТО-2) – Иркутск (с оборота) – Находка (с оборота) – Смоляниново (на ТО-2) (протяженность 5 611 км);

– Карымская (с ТО-2) – Иркутск (с оборота) – Находка (с оборота) – Хабаровск (на ТО-2) (протяженность 6 381 км);

– Смоляниново (с ТО-2) – Находка (с оборота) – Иркутск (с оборота) – Карымская (на ТО-2) (протяженность 5 611 км);

– Карымская (с ТО-2) – Находка (с оборота) – Карымская (на ТО-2) (протяженность 6 266 км);

– Карымская (с ТО-2) – Хабаровск (с оборота) – Иркутск (на ТО-2) (протяженность 5 590 км);

– Иркутск (с ТО-2) – Хабаровск (с оборота) – Карымская (на ТО-2) (протяженность 5 590 км).

В настоящее время для увеличения пропускной способности станции ежедневно до 100 пар поездов внедрены технологии сквозного пропуска поездов по станции без размена локомотивов и смены локомотивных бригад на тяговых плечах Хабаровск – Иркутск, Уруша – Челутай.

Эксплуатация на восточном полигоне локомотивов 3ЭС5К с поосным распределением силы тяги с повышенным пробегом ТО-2 дает возможность вво-



Рис. 5. Участок тягового плеча Мариинск – Хабаровск II
Fig. 5. A section of the Mariinsk–Khabarovsk II locomotive run



Рис. 6. Участок тягового плеча Мариинск – Смоляниново
Fig. 6. A section of the Mariinsk–Smolyaninovo locomotive run

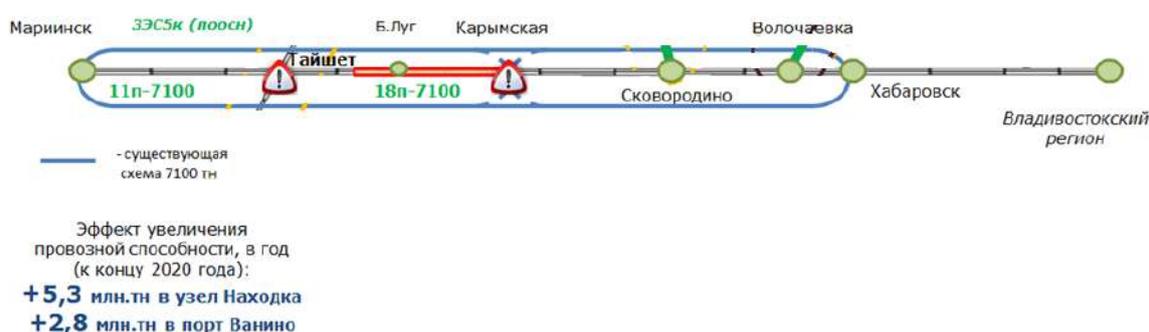


Рис. 7. Схема удлинения на участке Мариинск – Владивосток
Fig. 7. A lengthening schematic at the Mariinsk–Vladivostok section

да дополнительной технологии – пропуска 10 поездов массой 7 100 т на участке от Мариинска до Хабаровска. С увеличением парка данных локомотивов количество поездов будет расти. В целях дальнейшего развития сквозных технологий возникла необходимость задействовать ПТОЛ Могзон для проведения 6 локомотивам в сутки ТО-2 и обеспечения проследования поездов станции Карымская без смены локомотива (рис. 7).

Заключение

Мероприятием по повышению эффективности эксплуатационной работы на полигоне является оптимизация количества технического обслуживания поездов в пути следования.

В настоящее время грузовые поезда, следующие на Дальний Восток, после обработки по станции Инская через 791 км обрабатываются по станции Красноярск-Восточный, далее техническое обслуживание производится по станциям Карымская. Для того чтобы разгрузить станции Красноярск-Восточный, Карымская и вместе с этим сократить количество станций технического обслуживания в

пределах полигона, предлагается изменить схему технического обслуживания четных поездов, установив гарантийный участок Инская – Улан-Удэ протяженностью 2 311 км.

Использование локомотивов серии 3ЭС5К позволило увеличить количество грузовых поездов массой 7 100 т на участке Мариинск – Хабаровск. В настоящее время реализуется работа с грузоотправителями по формированию отправительских маршрутов с таких станций, как Челутай и Суховская. Это позволит обеспечить прием одиннадцати поездов по станции Мариинск, пяти поездов со станции Челутай и двух «маршрутов» со станции Суховская. Таким образом, пропуск «сквозных» маршрутов массой 7 100 т. по станции Карымская увеличится до 18 поездов в сутки.

Исходя из рассмотренных вариантов по увеличению тяговых плеч работы локомотивов, а также с целью выполнения показателей по увеличению весовых норм поездов, считаем, что данные предложения возможно реализовать на участках сети железных дорог Восточного полигона.

Список литературы

1. Осминин А.Т. Увеличение пропускных и провозных способностей за счет повышения эффективности перевозочного процесса и транспортного обслуживания / А.Т. Осминин // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО РЖД. 2018. № 2. С. 14–31.
2. Власенский А.А. Восточный полигон: реализуя пилотный проект // Железнодорожный транспорт. 2017. № 11. С. 11–16.
3. Власенский А.А. Региональный центр управления перевозками: структура и задачи // Железнодорожный транспорт. 2016. № 6. С. 45–48.
4. Стратегия развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030 года. Программа развития тяжеловесного движения. Утверждена Распоряжением Правительства РФ от 17 июня 2008 г. № 877-р.
5. Технология управления тяговыми ресурсами на Восточном полигоне, утверждённая распоряжением ОАО «РЖД» № 2014р от 3 октября 2017 г.
6. Зобнин В.Л. Технологический процесс работы центра управления перевозками восточного полигона (ЦУП ВП) / В.Л. Зобнин, А.Т. Осминин, Е.А. Сотников, М.А. Осминин // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2017. Т. 76. № 3. С. 146–152.
7. Хоменко А.П. Экспертный взгляд на развитие Восточного полигона / А.П. Хоменко, В.А. Начигин, В.В. Кривоногова // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2017. Т. 1. С. 39–40.
8. Единый технологический процесс работы Восточного полигона, утверждённый распоряжением ОАО «РЖД» № 3089/р от 30 декабря 2019 г.
9. Единый технологический процесс Восточно-Сибирской железной дороги филиала ОАО «РЖД»: распоряжением первого заместителя начальника Восточно-Сибирской железной дороги № ВСЖД-433р от 2 мая 2017 г.

10. Худоногов А.М. Зональные особенности распределения эксплуатационной надежности предельно нагруженного оборудования электровозов / А.М. Худоногов, Е.Ю. Дульский, П.Ю. Иванов // Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта: материалы третьей международной научно-практической конференции, Омск, 06 декабря 2018 года. Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2018. С. 311–318.

11. Суханов Г.И. Оценка эксплуатационной работы станции в условиях оптимизации тяговых плеч локомотивов / Г.И. Суханов, А.В. Супруновский, Н.В. Давыдова // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2019. Т. 1. С. 93–103.

12. Валинский О.С. Восточному полигону – особое внимание! / О.С. Валинский // Локомотив. 2020. № 3(759). С. 2–4.

13. Гусаченко Н.В. Восточная подмена не удалась: пассажиры не помогли грузам / Н.В. Гусаченко // РЖД-Партнер. 2021. № 3-4. С. 28–31.

14. Светлакова Е.Н. Организация пропуска тяжеловесных поездов на полигоне Забайкальской железной дороги / Е.Н. Светлакова // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2017. Т. 1. С. 205–210.

15. Дульский Е.Ю. Зональная система повышения надежности электрических машин тягового подвижного состава / Е.Ю. Дульский, П.Ю. Иванов, Е.М. Лыткина. Москва: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2018. 483 с.

16. Русин Д.Л. Организация полигонной системы управления тяговым подвижным составом / Д.Л. Русин // Инновационный транспорт. 2019. № 4(34). С. 57–63. DOI 10.20291/2311-164X-2019-4-57-63.

17. Самуйлов В.М. Транспортная стратегия развития Восточного полигона / В.М. Самуйлов, В.Б. Солохов // Инновационный транспорт. 2021. № 1(39). С. 16–19. DOI 10.20291/2311-164X-2021-1-16-19.

18. Фрольцов В.Д. Планирование тяговых ресурсов на Восточном полигоне / В.Д. Фрольцов, А.Б. Шабунин, В.Г. Матюхин // Локомотив. 2019. № 3(747). С. 6–10.

References

1. Os'minin A.T. Uvelichenie propusknykh i provoznykh sposobnostei za schet povysheniya effektivnosti perevozhnogo protsessa i transportnogo obsluzhivaniya [Increase of throughput and carrying capacity by increasing the efficiency of the transportation process and transport services]. *Byulleten' Ob"edinennogo uchenogo soveta OAO RZhD* [The Bulletin of the Joint Scientific Council of OAO Russian Railways], 2018. No. 2. Pp. 14–31.

2. Vlasenskii A.A. Vostochnyi poligon: realizuya pilotnyi proekt [The Eastern polygon: realizing a pilot project]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2017. No. 11. Pp. 11–16.

3. Vlasenskii A.A. Regional'nyi tsentr upravleniya perevozkami: struktura i zadachi [Regional transport management center: structure and tasks]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2016. No. 6. Pp. 45–48.

4. Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v RF do 2030 goda. Programma razvitiya tyazhelovesnogo dvizheniya. Utverzhdena Rasporyazheniem Pravitel'stva RF ot 17 iyunya 2008 g. No. 877-r. [Strategy for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030. Heavy traffic development program. Approved by the Order of the Government of the Russian Federation of June 17, 2008 No. 877-r].

5. Tekhnologiya upravleniya tyagovymi resursami na Vostochnom poligone, utverzhennaya rasporyazheniem OAO «RZhD» № 2014r ot 3 oktyabrya 2017 g. [The technology of managing traction resources at the Eastern polygon approved by the order of OAO Russian Railways No. 2014r October 3, 2017].

6. Zobnin V.L., Os'minin A.T., Sotnikov E.A., Os'minin M.A. Tekhnologicheskii protsess raboty tsentra upravleniya perevozkami vostochnogo poligona (TsUP VP) [Technological process of work of the transport control center of the Eastern polygon (EP ECC)]. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [The Bulletin of the Scientific research institute of railway transport], 2017. Vol. 76. No. 3. Pp. 146–152.

7. Khomenko A.P., Nachigin V.A., Krivorotova V.V. Ekspertnyi vzglyad na razvitie Vostochnogo poligona [An expert view on the development of the Eastern polygon]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region], 2017. Vol. 1. Pp. 39–40.

8. Edinyi tekhnologicheskii protsess raboty Vostochnogo poligona, utverzhennyy rasporyazheniem OAO «RZhD» № 3089/r ot 30 dekabrya 2019 g. [The unified technological process of the operation of the Eastern polygon, approved by the order of OAO Russian Railways No. 3089 / r dated December 30, 2019].

9. Edinyi tekhnologicheskii protsess Vostochno-Sibirskoi zheleznoi dorogi filiala OAO «RZhD»: rasporyazheniem pervogo zamestitya nachal'nika Vostochno-Sibirskoi zheleznoi dorogi № VSZhD-433r ot 2 maya 2017 g. [The unified technological process of the East Siberian railway of the branch of Russian Railways: by the order of the First Deputy Head of the East Siberian Railway No. VSZhD-433r dated May 2, 2017].

10. Khudonogov A.M., Dul'skii E.Yu., Ivanov P.Yu. Zonal'nye osobennosti raspredeleniya ekspluatatsionnoi nadezhnosti predel'no nagruzhennogo oborudovaniya elektrovozov [Zonal features of the distribution of operational reliability of extremely loaded equipment of electric locomotives]. *Razrabotka i ekspluatatsiya elektrotekhnicheskikh kompleksov i sistem energetiki i nazemnogo transporta: materialy tret'ei mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Omsk, 06 dekabrya 2018 goda*. [Development and operation of electrical complexes and systems of energy and ground transport: Proceedings of the third international scientific and practical conference, Omsk, December 06, 2018]. Omsk: Omsk State Transport University Publ., 2018. Pp. 311–318.

11. Sukhanov G.I., Suprunovskii A.V., Davydova N.V. Otsenka ekspluatatsionnoi raboty stantsii v usloviyakh optimizatsii tyagovykh plekh lokomotivov [Assessment of the operational work of the station in the conditions of optimization of traction arms of locomotives]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region], 2019. Vol. 1. Pp. 93–103.

12. Valinskii O.S. Vostochnomu poligonu – osoboe vnimanie! [Special attention to the Eastern polygon!] *Lokomotiv [Locomotive]*, 2020. No. 3 (759). Pp. 2–4.
13. Gusachenko N.V. Vostochnaya podmena ne udalas': passazhiry ne pomogli gruzam [Eastern substitution failed: passengers did not help the cargo]. *RZHD-Partnyor [The RZD Partner]*, 2021. No. 3-4. Pp. 28–31.
14. Svetlakov E.N. Organizatsiya propuska tyazhelovesnykh poezdov na poligone Zabaikal'skoi zheleznoi dorogi [Organization of the handling of heavy trains at the polygon of the Trans-Baikal railway]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona [Transport infrastructure of the Siberian region]*, 2017. Vol. 1. Pp. 205–210.
15. Dul'skii E.Yu., Ivanov P.Yu., Lytkina E.M. Zonal'naya sistema povysheniya nadezhnosti elektricheskikh mashin tyagovogo podvizhnogo sostava [Zonal system of increasing the reliability of electric machines of traction rolling stock]. Moscow: The Training and Methodological Center for Education in Railway Transport Publ., 2018. 483 p.
16. Rusin D.L. Organizatsiya poligonnoi sistemy upravleniya tyagovym podvizhnym sostavom [Organization of a polygon control system for traction rolling stock]. *Innovatsionnyi transport [Innovative transport]*, 2019. No. 4 (34). Pp. 57–63. DOI 10.20291 / 2311-164X-2019-4-57-63.
17. Samuilov V.M., Solokhov V.B. Transportnaya strategiya razvitiya Vostochnogo poligona [Transport strategy for the development of the Eastern polygon]. *Innovatsionnyi transport [Innovative transport]*, 2021. No. 1 (39). Pp. 16–19. DOI 10.20291 / 2311-164X-2021-1-16-19/
18. Frol'tsov V.D., Shabunin A.B., Matyukhin V.G. Planirovanie tyagovykh resursov na Vostochnom poligone [Planning of traction resources at the Eastern polygon]. *Lokomotiv [Locomotive]*, 2019. No. 3 (747). Pp. 6–10.

Информация об авторах

Власенский Артем Андреевич – первый заместитель начальника Центра управления перевозками на Восточном полигоне, г. Иркутск, e-mail: vlasensky@gmail.com

Суханов Георгий Иванович – канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: sukhانov_gi@irgups.ru

Супруновский Антон Викторович – старший преподаватель кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: as.irgups@gmail.com

Белозерова Ирина Георгиевна – старший преподаватель кафедры управления эксплуатационной работой, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, e-mail: belozerova.khv@mail.ru

Information about the authors

Artyom A. Vlasenskii – First Deputy Head of Transportation control center at the Eastern polygon, Irkutsk, e-mail: vlasensky@gmail.com

Georgii I. Sukhanov – Ph.D. of Engineering Science, Associate Professor, Professor of the Subdepartment of Management of Operational Work, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: sukhанov_gi@irgups.ru

Anton V. Suprunovskii – Senior Lecturer of the Subdepartment of Management of Operational Work, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: as.irgups@gmail.com

Irina G. Belozerova – Senior Lecturer of the Subdepartment of Management of Operational Work, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, e-mail: belozerova.khv@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.2(70).161-169

УДК 656.2

Оценка грузовой матрицы корреспонденций с учетом данных товарно-транспортных накладных и интенсивности движения

О.А. Лебедева¹, В.Е. Гозбенко^{1,2}✉

¹Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, Российская Федерация

²Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ vgozbenko@yandex.ru

Резюме

В статье обозначена проблема оценки грузовой матрицы корреспонденций с учетом данных товарно-транспортных накладных и интенсивности движения. Большинство методов оценки матриц корреспонденций основано на сравнении расстояний между восстановленной и исходной матрицей с учетом ограничений потока. В современной практике транспортного моделирования при оценке матрицы корреспонденций грузового движения чаще всего используется два вида информации. Это данные товарно-транспортных накладных и интенсивности транспортных потоков. Матрица, полученная на основе товарно-транспортных накладных, отражает только структуру движения грузов. Из-за ошибок, имеющихся в информации, матрица может отличаться от реального варианта транспортировки товаров. Цель исследования – оценить реальную матрицу корреспонденций, учитывая данные товарно-транспортных накладных (в виде матрицы движения товаров в обследуемой зоне) как исходную (априорную) матрицу, а также данные подсчета интенсивности движения (в соответствии с ограничениями производительности). Согласно имеющейся информации о товарно-транспортных накладных и подсчетах интенсивности транспортных потоков рассмотрен вариант оценки реальной матрицы корреспонденций грузового движения с применением стохастических моделей и с учетом схем выбора маршрута. Проведен анализ возможных ошибок в источниках информации – товарно-транспортной накладной и данных интенсивности движения – с оценкой каждого варианта. Для нахождения оптимальной оценки матрицы возможно использование откалиброванной модели максимизации энтропии с составной целевой функцией.

Таким образом, с использованием геоинформационной системы, калиброванных моделей распределения, а также функции энтропии становится доступна оценка матрицы корреспонденций на основе данных товарно-транспортных накладных.

Ключевые слова

матрица корреспонденций, улично-дорожная сеть, транспортный поток, моделирование

Для цитирования

Лебедева О. А. Оценка грузовой матрицы корреспонденций с учетом данных товарно-транспортных накладных и интенсивности движения / О. А. Лебедева, В. Е. Гозбенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 2 (70). – С. 161–170. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).161-170

Информация о статье

поступила в редакцию: 02.02.2021, поступила после рецензирования: 05.05.2021, принята к публикации: 15.05.2021

Estimation of the freight traffic mobility plan taking into account consignment notes and traffic intensity data

O.A. Lebedeva¹, V.E. Gozbenko^{1,2}✉

¹Angarsk State Technical University, Angarsk, the Russian Federation

²Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ vgozbenko@yandex.ru

Abstract

The article outlines the problem of estimation of freight traffic mobility plan, taking into account the data of consignment notes and traffic intensity. Most of the methods of estimating freight traffic mobility plans are based on comparing the distances between the reconstructed and the original mobility plan, taking into account the flow restrictions. In modern practice of transport modeling, two types of information are most often used when assessing the freight traffic mobility plan. These are the data of consignment notes and the intensity of traffic flows. The mobility plan obtained from the data of consignment notes reflects only the structure of the movement of goods. Due to errors in the information, the mobility plan may differ from the real version of the transportation of goods. The purpose of the study is to estimate the real mobility plan; taking into account the data of consignment notes (as a mobility plan of the movement of goods in the surveyed area) as the original (a priori) mobility plan, as well as the data for calculating the traffic intensity (in accordance with the performance constraints). According to the available information on consignment notes and calculations of the intensity of traffic flows, a variant of assessing the real freight traffic mobility plan is considered using stochastic models and taking into account route selection schemes. Possible errors in information sources – consignment note and traffic intensity data – are analyzed with estimation of each option. To find the optimal mobility plan estimate, a calibrated entropy maximization model with a composite objective function can be used. Thus, using a geographic information system, calibrated distribution models, as well as the entropy function, an estimate of the mobility plan based on the data of consignment notes becomes available.

Keywords

mobility plans, street and road network, traffic flow, modeling

For citation

Lebedeva O. A., Gozbenko V. E. Otsenka gruzovoi matritsy korrespondentsiy s uchuyotom dannykh tovarno-transportnykh nakladnykh i intensivnosti dvizheniya [Estimation of the freight traffic mobility plan taking into account consignment notes and traffic intensity data]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 2 (70), pp. 161–170. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).161-170

Article info

Received: 02.02.2021, Revised: 05.05.2021, Accepted: 15.05.2021

Введение

Матрица корреспонденций играет важную роль в анализе транспортного процесса. Она включает сведения о количестве рейсов или объемах перевозок между зонами, т. е. фактически показывает структуру спроса в исследуемой зоне. Стандартные методы сбора информации состоят из придорожного интервьюирования, являются дорогостоящими, тру-

доемкими и требуют больших временных затрат [1–7]. Эта задача приобретает актуальность в связи с изменениями в системе землепользования и численности населения, что сокращает точность собранных данных. Возникает необходимость разработки доступных методов оценки реальных и прогнозируемых матриц корреспонденций. Подсчет транспортных потоков позволяет получить информацию о

сумме всех пар корреспонденций, которые можно рассматривать как результат объединения матрицы поездок и схемы выбора маршрута. Этот источник данных очень привлекателен, поскольку подсчет транспортных потоков автоматизирован.

Важным этапом оценки спроса на перевозки является определение схемы выбора маршрута и пути проезда. Переменная P_{ij}^a используется для оценки доли ездки из зоны i в зону j (T_{ij}) проходящих через путь a . Таким образом, поток V_a является суммой всех поездок между зонами одного звена. Математически это можно выразить следующим образом [8-11]:

$$v_a = \sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a, P_{ij}^a = [0, 1].$$

Переменная P_{ij}^a может быть получена с использованием различных методов. Количество рейсов или объемы груза, которые были перемещены между зонами, должны быть преобразованы в количество транспортных средств V_a . На практике количество наблюдаемых транспортных потоков меньше количества неизвестных T_{ij} . Следовательно, невозможно найти однозначное решение задачи матричной оценки. Как правило, будет несколько матриц, которые при загрузке в сеть будут воспроизводить (удовлетворять) наблюдаемые транспортные потоки. Таким образом, можно восстановить наиболее «вероятную» или «лучшую» матрицу корреспонденций транспортных потоков. Практически все модели оценки матрицы корреспонденций используют априорную информацию. Предварительная информация может быть выражена в виде «целевой» или «начальной» матрицы корреспонденций и (или) количества ездки (количества грузов), привлеченных / произведенных в различных зонах. В этом случае исходная матрица может быть получена путем выборочного обследования или обновлением устаревшей матрицы. Это исследование было сосредоточено на оценке реальной матрицы в случае системы грузовых перевозок.

Математическая постановка задачи

Большинство методов оценки матриц корреспонденций основаны на сравнении расстояний между восстановленной и исходной матрицей с учетом ограничений потока. Следовательно, задача нахождения матрицы g при условии, что исходная матрица \hat{g} сформулирована, задается как минимизирующая функция $F_1(g, \hat{g})$. Статистически наблюдаемый набор данных подсчета транспортного потока является оцененным «реальным транспортным потоком». Следовательно, необходим алгоритм восстановления

матрицы, который воспроизводит «минимальные» различия между оцененными (v) и наблюдаемыми потоками \hat{v} , что может быть выражено как критерий $F_2(v, \hat{v})$, минимизирующийся с учетом установленных ограничений. Оптимизация в общем виде может быть выражена как

$$\begin{aligned} \min F(g, v) &= \gamma_1 F_1(g, \hat{g}) + \gamma_2 F_2(v, \hat{v}), \\ v &= \text{assign}(g), \\ v, g &\geq 0, \end{aligned}$$

где \hat{g} – начальная (целевая) матрица; \hat{v} – наблюдаемое количество транспортных потоков; F_1 и F_2 – меры расстояния [12]. Назначение g транспортной сети обозначается $\text{assign}(g)$, что приводит к разделению потоков g_{ij} по k -доступным маршрутам с потоками h_{ijk} .

Если целевая матрица корреспонденций является точной, то γ_1 должен быть больше, чем γ_2 , что приведет к g , близкому к \hat{g} . Тогда допустимы большие отклонения между v и \hat{v} . С другой стороны, наблюдаемые транспортные потоки должны быть надежны по сравнению с информацией в \hat{g} , а величина γ_2 должна быть больше γ_1 . Таким образом, значения весов (γ_i), связаны с концепцией модели. Следовательно, точность и надежность восстановленной матрицы корреспонденций зависит от модели распределения транспортных потоков по сравнению с реальной схемой выбора маршрута в исследуемой области [12–15].

Моделирование и существующие подходы

Существует множество подходов к оценке или обновлению матриц корреспонденций на основе подсчета транспортных потоков [13–20]. Равновесный подход производит оценку матрицы корреспонденций, которая удовлетворяет условиям назначения равновесия, а также согласуется с наблюдаемыми потоками. Такая модель подходит для оценки матрицы корреспонденций в густонаселенной городской местности. Подходы, основанные на моделировании транспортных потоков, включая модель «максимизация энтропии» и комбинированные модели планирования работы транспортной сети, оценивают наиболее вероятную матрицу на основе подсчета транспортных потоков в условиях пропорционального распределения. Оценка согласуется с ограничениями, имеющими задачу максимизации энтропии. Модель не требует данных ни о транспортных потоках в сети, ни исходную матрицу. Модифицированные модели для повышения точности

используют начальную матрицу. Если для восстановления используется только гравитационная модель или подобные алгоритмы, то такой подход может дать неточную оценку. В этой методике априорную матрицу принимают как единичную ($\widehat{g}_{ij} = 1$).

Для восстановления и оценки матриц применяются модели дискретного выбора. Эти модели основаны на вероятностном распределении функции максимума ряда случайных величин [21-23]. Вероятность того, что пользователь n выберет вариант i в наборе C_n , определяется выражением

$$P(i|C_n) = \frac{e^{\mu V_{in}}}{\sum_{j \in C_n} e^{\mu V_{jn}}}.$$

Свойство полиномиальных логит-моделей является ограничением для некоторых практических приложений. Создание набора при моделировании выбора маршрута может быть детерминированным или стохастическим. Существует множество подходов, включая алгоритм Дейкстры для определения пути с наибольшей полезностью, алгоритм k -кратчайших путей, методы Диала и Баррелла [24, 25] для поиска оптимальных путей, стохастическая модель на основе теории Маркова [26].

Методы максимизации энтропии активно использовались в качестве инструментов при разработке моделей в городском пространстве при планировании перевозочного процесса в 1970 г. Максимизация энтропии используется как нелинейная целевая функция для оценки наиболее вероятной матрицы, согласующейся с наблюдаемыми транспортными потоками (как линейные ограничения). Исходная задача (без априорной матрицы) записывается как [15]

$$\max S(T_{ij}) = -\sum_{ij} (T_{ij} \ln T_{ij} - T_{ij}).$$

При условии, что

$$\sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a - \widehat{V}_a = 0$$

для каждого подсчитанного a , и

$$T_{ij} \geq 0.$$

В общем виде задача с использованием методов с множителями Лагранжа λ_a записывается как

$$L = -\sum_{ij} (T_{ij} \ln T_{ij} - T_{ij}) - \sum_a \lambda_a (\sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a - \widehat{V}_a) = 0,$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial T_{ij}} &= -\ln T_{ij} - \sum_a \lambda_a P_{ij}^a = 0 \\ \Rightarrow T_{ij} &= \exp\left(-\sum_a \lambda_a P_{ij}^a\right). \end{aligned}$$

Наличие матрицы, восстановленной на основе другого метода, может быть использовано как t -априорная (начальная) матрица, тогда новая целевая функция будет иметь вид

$$\max S_1\left(\frac{T_{ij}}{t_{ij}}\right) = -\sum_{ij} \left(T_{ij} \ln \frac{T_{ij}}{t_{ij}} - T_{ij} + t_{ij}\right).$$

Целевая функция является выпуклой, и член t_{ij} как константа используется для достижения большей точности. Используя эту методологию и замену переменных, решение может быть представлено в виде

$$T_{ij} = t_{ij} \exp\left(-\sum_a \lambda_a P_{ij}^a\right).$$

Одной из особенностей модели оценки матрицы максимальной энтропии является ее мультипликативный характер, т. е. если значение в предыдущей матрице равно нулю, оно останется нулевым и в новом решении. Один из вариантов решения этой задачи для разреженных матриц состоит в заполнении пустых ячеек небольшими значениями (0,5 поездки). Ограничения с помощью мультипропорционального алгоритма решения будут гарантировать, что некоторые значения вырастут до одной или нескольких поездок, в то время как другие вернутся к нулевому значению. Данный алгоритм из-за относительной эффективности и простоты программирования широко внедрен в практику. Однако в модели есть некоторые ограничения. Основное состоит в том, что подсчет транспортных потоков рассматривается как безошибочные наблюдения нестохастических переменных. Фактически модель предполагает полную достоверность подсчетов транспортных потоков и использует предыдущую матрицу только для компенсации матрицы оценки грузовых перевозок с применением дополнительной информации. Однако на практике могут быть ошибки в исходных данных и временных колебаниях интенсивности. Одним из вариантов решений является использование максимизации энтропии с многокритериальной функцией.

Источниками данных для оценки количества поездок между каждой парой корреспонденций является информация, касающаяся устаревшей матрицы, количества поездок (транспортных средств), схемы выбора маршрута. Надежность входных данных

может варьироваться. В процессе оценки матрицы корреспонденций пропорциональные значения обычно считаются фиксированными (без ошибок). Существующие ошибки можно интерпретировать как неопределенности в исходной матрице транспортных потоков [13]. Таким образом, необходимо учитывать два класса информации: исходную матрицу (t), вектор подсчета транспортных потоков \widehat{v} , а также оценки величины ошибок во входных данных. В исходной модели максимизации энтропии предполагается, что значения \widehat{v} фиксированы, а решение задачи оценки матрицы точно удовлетворяет уравнению $v_a = \sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a$. Можно предпо-

ложить неопределенность в показателе \widehat{v} , но большинство моделей не допускают решений с отклонением от заданных значений.

Оценку матриц транспортных потоков можно рассматривать как многокритериальную задачу с условием удовлетворения двух условий t и \widehat{v} . Значения t и \widehat{v} соответствуют разным весам двух членов целевой функции, $F(t, T)$ и $F(v, \widehat{v})$.

Многоцелевое программирование с использованием весовых коэффициентов – старый и эффективный метод. Математически многокритериальную задачу можно записать следующим образом:

$$\max Z(x) = [Z_1(x), Z_2(x), \dots, Z_p(x)], \\ x \in F_d$$

Таким образом, можно искать оптимальное решение

$$\max Z(x) = \sum_{k=1}^p W_k Z_k(x) \\ x \in F_d,$$

где W_k не может быть ни нулевым, ни отрицательным. Весовые коэффициенты считаются масштабными параметрами для каждой целевой функции. Задача оценки матрицы с использованием подсчета транспортных потоков может быть сформулирована как модель программирования [13]

$$\min \begin{cases} \sum_{ij} \left(T_{ij} \ln g \frac{T_{ij}}{t_{ij}} - T_{ij} + t_{ij} \right), \\ \sum_{ij} \left(v_a \ln \frac{v_a}{\widehat{v}_a} - v_a + \widehat{v}_a \right), \end{cases}$$

$$\sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a - v_a = 0, \quad a = 1, 2, \dots, M, \\ T_{ij} \geq 0.$$

Веса конфликтующих показателей (двух классов информации t и \widehat{v}) могут быть выражены путем введения одного весового коэффициента. Обозначая весовые коэффициенты γ_1 и γ_2 , модель с одной целью может быть сформулирована как

$$\min \gamma_1 \sum_{ij} \left(T_{ij} \ln \frac{T_{ij}}{t_{ij}} - T_{ij} + t_{ij} \right) + \\ + \gamma_2 \sum_a \left(v_a \ln \frac{v_a}{\widehat{v}_a} - v_a + \widehat{v}_a \right).$$

Коэффициенты можно масштабировать так, чтобы $\gamma_1 + \gamma_2 = 1$. В этом случае γ_1 , и γ_2 должны быть предварительно определены. Решение называется оптимальным, если не существует другого, в котором цель будет достигнута более эффективным методом с учетом снижения эффективности других параметров [27]. Используя метод Лагранжа, оптимальное решение может быть выражено как

$$T_{ij} = t_{ij} \exp \left(1 - \frac{1}{\gamma_1} \sum_a \lambda_a P_{ij}^a \right), \\ v_a = \widehat{v}_a \exp \left(\frac{\lambda_a}{\gamma_2} \right).$$

При условии наличия во входных данных дезагрегированной информации взвешенная модель максимизации энтропии может быть сформулирована как

$$\min \sum_{ij} a_{ij} \left(T_{ij} \ln \frac{T_{ij}}{t_{ij}} - T_{ij} + t_{ij} \right) + \\ + \sum_a \beta_a \left(v_a \ln \frac{v_a}{\widehat{v}_a} - v_a + \widehat{v}_a \right) \left(\frac{\lambda_a}{\gamma_2} \right),$$

где a_{ij} – весовой коэффициент, соответствующий целевому значению в паре ij матрицы корреспонденций, а β_a – весовой коэффициент наблюдения транспортных потоков. Фактически предполагается, что веса определены как инверсия некоторой меры неопределенности. Спецификация весов определена в соответствии с опытом транспортного планирования и оценкой имеющихся данных. Если нет неопределенности в значении, мера неопределенности

равна нулю, а соответствующий весовой коэффициент стремится к бесконечности. Это означает, что $T_{ij} = t_{ij}$ или $V_a = \widehat{V}_a$.

Калибровка модели максимизации энтропии с композитной целевой функцией

В современной практике транспортного моделирования при оценке матрицы корреспонденций грузового движения чаще всего используется два вида информации. Это данные товарно-транспортных накладных (ТТН) и данные интенсивности транспортных потоков. Матрица, полученная из данных ТТН, отражает только структуру движения грузов. Из-за ошибок, имеющихся в информации, матрица может отличаться от реального движения товаров. Цель исследования – оценить реальную матрицу корреспонденций, учитывая данные ТТН (в виде матрицы движения товаров в обследуемой зоне) как исходную (априорную) матрицу, а также данные подсчета интенсивности движения (в соответствии с ограничениями производительности).

Информация, взятая из ТТН, является одной из наиболее ценных. Она фактически представляет структуру спроса на грузовые перевозки. Опираясь на нее, можно выделить две группы неточностей:

– ошибки, которые могут появляться в процессе сбора и сохранения информации в соответствующих базах данных;

– ошибки, из-за несоответствия информации ТТН с реальными данными о транспортировке товара.

Причина второй ошибки – неполучение водителями транспортных средств ТТН.

В обследовании интенсивности движения транспортного потока выделяют два вида ошибок:

– человеческий фактор и систематические ошибки (выбор обследуемых остановочных пунктов, установка счетчиков, инструктажи имеют важное влияние на количество ошибок данного типа);

– неэффективный промежуток времени для исследования движения.

Для оценки среднегодового суточного потока интенсивности движения транспортных средств необходимо проводить учет в течение всего года и (или) в обычные будние (непраздничные) дни.

Когда ошибки существуют относительно каждого источника информации возможно использование энтропийного метода многоцелевой функции. В этом методе при калибровке моделей имеют большее значение агрегированные λ_1 и λ_2 или дезагрегированные весовые коэффициенты a_{ij} и β_a . Однако использование последних практически невозможно из-за сложностей, вызванных дезагрегированной информацией. Для калибровки многоцелевой функции энтропии используются агрегированные весовые коэффициенты.

В этой связи в условиях недостатка информации

и сложности определения весовых коэффициентов использование экспертной оценки может оказаться полезным.

В исследовании рассмотрена иерархическая система оценки исходной и восстановленной матрицы движения грузов. Два критерия:

– «систематические ошибки» (человеческий фактор, ошибки при разработке методологии обследования и ошибки во время сбора и сохранения данных);

– «охват ошибок» (ошибки из-за отсутствия ТТН, неправильного выбора временного интервала для сбора данных и небольшой выборки данных).

Рассмотрим экспертную систему ранжирования, применяемую при проведении опросов (табл. 1).

Таблица 1. Экспертная система ранжирования
Table 1. Expert ranking system

Экспертная оценка	Балл
С допустимой погрешностью и точностью 99 %	20
С допустимой погрешностью и точностью 90 %	15
С высокой погрешностью и точностью 50 %	10
Высокий уровень ошибок	5
Очень высокий уровень ошибок	0

Традиционно профессиональные эксперты в области менеджмента и транспортного планирования используют шкалу от 0 до 20 для интервьюирования.

Результаты показывают, что рассмотренные подходы отличаются, но для комплексного учета они должны быть объединены в четыре усредненных числа. Следовательно, в каждом условии предлагается применять среднее геометрическое полученных оценок, получаемое следующим образом:

$$W_{ij} = (W_{ij}^1 \times W_{ij}^2 \times \dots \times W_{ij}^n)^{\frac{1}{n}},$$

где W_{ij} – вес i с учетом критерия j , а W_{ij}^n – вес, относящийся к каждому отдельному n показателю. Среднее геометрическое значение исследуемых показателей включает учет интенсивности транспортных потоков и данные спроса на грузовые перевозки ТТН относительно «систематических ошибок» и «ошибок покрытия», рассчитанных согласно экспертной оценке.

Критерии попарно сравниваются между собой в матрице относительно источников ошибок (табл. 2).

Таблица 2. Парное сравнение относительно ошибок в источниках данных
Table 2. Pairwise comparison regarding errors in data sources

	Систематическая ошибка	Ошибка покрытия
Систематическая ошибка	1	α
Ошибка покрытия	$1/\alpha$	1

Для вычисления ошибок после определения среднего геометрического из элементов предыдущей матрицы полученные показатели нормализуются. Нормализация – это вес каждого из источников информации относительно двух видов ошибок (табл. 3).

Таблица 3. Нахождение среднего геометрического и нормализации «веса» ошибки
Table 3. Finding the geometric mean and normalization of the “weight” of the error

Критерии	Среднее геометрическое	Нормализованные веса
Систематическая ошибка	$(a * 1)^{1/2} = \sqrt{a}$	$\frac{a}{1+a}$
Ошибка покрытия	$\left(a * \frac{1}{a}\right)^{1/2} = \frac{1}{\sqrt{a}}$	$\frac{1}{1+a}$
Общее	$\sqrt{a} + \frac{1}{\sqrt{a}}$	1

«Веса» для ГТН и информации об интенсивности движения приблизительно равны 0,5, тогда коэффициенты λ_1 и λ_2 можно принять равными этому значению, т. е. по экспертным оценкам степень достоверности каждого из источников информации одинакова и равна 50 %. Таким образом, модель, основанная на методе максимизации энтропии со сложной целевой функцией, калибруется следующим образом:

$$\min 0,5 \sum_{ij} \left(T_{ij} \ln g \frac{T_{ij}}{t_{ij}} - T_{ij} + t_{ij} \right) + 0,5 \sum_a \left(v_a \ln \frac{v_a}{\hat{v}_a} - v_a + \hat{v}_a \right),$$

где T_{ij} – маршрут между пунктом отправления i и пунктом назначения j ; t_{ij} – рейс между пунктом отправления i и пунктом назначения j в исходной матрице; V_a – расчетный объем интенсивности транспортного потока по дуге a ; v_a – наблюдаемый объем транспортного потока по дуге a ; P_{ij}^a – доля использования дуги a в транспортном процессе между пунктом отправления i и пунктом назначения j .

Из-за равенства весов, целевая функция может быть упрощена:

$$\min \sum_{ij} \left(T_{ij} \ln \frac{T_{ij}}{t_{ij}} - T_{ij} + t_{ij} \right) +$$

$$+ \sum_a \left(v_a \ln \frac{v_a}{\hat{v}_a} - v_a + \hat{v}_a \right).$$

Методология оценки матриц грузового движения

При наличии исходной информации оценка реальной матрицы корреспонденций спроса на грузовые перевозки осуществляется с применением следующей методологии:

1. Подготовка информации из исходной матрицы. Преобразование годового объема перевозок груза в количество грузового транспорта:

$$N = \frac{W}{P_{avg} \sum_{i=1}^n p_i v_i},$$

$$N = \frac{1,3 \times W}{\sum_{i=1}^n p_i W_i (1 - p_{ei})},$$

где N – общее количество грузового подвижного состава всех типов, которые перевозят груз W ; W – объем ежегодно перевозимого груза между парой пунктов отправления и назначения в кг; P_{avg} – средняя плотность перевезенного груза; p_i – средний процент грузового подвижного состава типа i , который отправляется в сети из n пунктов; v_i – средняя грузоподъемность грузовых автомобилей i -го типа; W_i – средний вес загруженных автомобилей типа i в кг (сумма среднего веса подвижного состава типа i и среднего веса груза); p_{ei} – средний процент не задействованных автомобилей типа i [28].

2. Подготовка информации об улично-дорожной сети и интенсивности дорожного движения (необходимо использовать геоинформационную среду). База данных и графические данные доступны в режиме реального времени что является важным для аналитических инструментов.

3. Оценка доли «дуги» a в грузовом транспортном потоке. Транспортная сеть междугородних автомобильных дорог обычно не перегружена, а значения P_{ij}^a в модели оценки можно измерить экстенсивно и независимо от процесса оценки матрицы. Откалиброванные модели назначения можно рассматривать как основу для этого расчета. Далее необходимо определить кратчайший путь между каждой парой пунктов.

4. Восстановление матрицы корреспонденций с использованием информации о ГТН, интенсивности транспортных потоков по дугам (сегментам) сети и экспертной оценке. Также необходимо рассчитать

долю каждого маршрута и долю каждой дуги (в случае транспортировки грузов). Следовательно, для решения поставленной задачи возможно использование откалиброванной модели, основанной на методе нелинейного программирования максимизации энтропии с составной целевой функцией.

Заключение

Согласно имеющейся информации о ТТН и подсчетах интенсивности транспортных потоков рассмотрен вариант обновления существующей матрицы для грузового движения с применением стоха-

стических моделей и учетом схем выбора маршрута.

Проведен анализ возможных ошибок в источниках информации – ТТН и данных интенсивности движения с оценкой каждого варианта. Для нахождения оптимальной оценки матрицы откалибрована модель максимизации энтропии с составной целевой функцией. Таким образом, с использованием геоинформационной системы, калиброванных моделей распределения, а также функции энтропии возможно применение методологии оценки матрицы корреспонденций на основе данных ТТН.

Список литературы

1. Лебедева О.А., Крипак М.Н. Моделирование грузовых перевозок в транспортной сети // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2016. № 10. С. 182–184.
2. Лебедева О.А., Антонов Д.В. Моделирование грузовых матриц корреспонденций гравитационным и энтропийным методами // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 5 (100). С. 118–122.
3. Лебедева О.А., Крипак М.Н. Развитие городских грузовых систем с учетом концепции городского планирования: сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. 2016. Т. 1. № 1. С. 244–247.
4. Федотова А.С., Лебедева О.А. Степень использования пропускной способности автомобильных дорог: сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. 2015. Т. 1. № 1. С. 270–274.
5. Полтавская Ю.О. Применение геоинформационных систем для обеспечения устойчивого развития транспортной системы города // Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине: сборник научных трудов VI Международной научной конференции / под ред. О.Г. Берестневой, В.В. Спицына, А.И. Труфанов, Т.А. Гладковой. 2019. С. 164–167.
6. Полтавская Ю.О. Оптимизация транспортной сети на основе минимума общих затрат на доставку грузов // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2019. № 13. С. 178–183.
7. Шаров М.И., Михайлов А.Ю., Дученкова А.В. Пример оценки транспортной доступности с использованием программного продукта РТВ «VISUM» // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2013. № 1(4). С. 133–138.
8. Лебедева О.А. Анализ проектирования транспортных зон на основе моделирования сети // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2019. № 13. С. 172–177.
9. Гозбенко В.Е., Крипак М.Н., Иванков А.Н. Совершенствование транспортно-экспедиционного обслуживания грузопользователей. Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2011. 176 с.
10. Lebedeva O.A., Kripak M.N., Gozbenko V.E. Increasing effectiveness of the transportation network through by using the automation of a Voronoi diagram. *Transportation Research Procedia*. 2018. Vol. 36. 427–433.
11. Afandizadeh S., Yadi S.M. *Hamedani Iranian Journal of Science & Technology*, 2006. Vol. 30. No. B1.
12. Abrahamsson T. Estimation of origin-destination matrices using traffic count. *international institute for applied systems, Austria*. 1998.
13. Hensher D.A., Button K. J. *Handbook of transportation modelling*. Pergamon. 2000.
14. Moore J.E., Kim G. Evaluating system ATMS technology via rapid estimation of network flows. *Final Report, University of Southern California*. 1997.
15. Ortuzar J.D., Willumsen L.G. *Modelling transport*. Third edition, John Wiley & Sons. 2001.
16. Train K. *Discrete choice methods with simulation*. Cambridge University Press. 2002.
17. Kleinbaum D.G., Klein M. *Logistic regression*. Second edition, Springer. 2002.
18. Ben-Akiva M., Bierlaire M. *Discrete choice methods and their applications to short term travel decisions*. *Handbook of Transportation Science*, Chapter. 1999.
19. Papacostas C.S., Prevedouro P.D. *Transportation engineering and planning*. Second edition, Prentice-Hall. 2001.
20. Philips D.T., Garcia-Diaz A. *Fundamentals of network analysis*, Prentice-Hall. 1981.
21. Кузьмин О.В., Старков Б.А. Бинарные матрицы с арифметикой треугольника паскаля и символные последовательности. *Известия Иркутского государственного университета. Серия: Математика*. 2016. Т. 18. С. 38–47.
22. Кузьмин О.В. построение обобщенных А- и В-полиномов в пространстве отображений. В сборнике: *Методы дискретного анализа в теории графов и сложности*. Новосибирск, 1992. С. 66–76.
23. Кузьмин О.В., Леонова О.В. Полиномы Тушара и их приложения. *Дискретная математика*. 2000. Т. 12. № 3. С. 60–71.
24. Burrell J.E. Multiple route assignment: a comparison of two methods. *International Symposium of Traffic Equilibrium Methods*, Montreal. 1974.
25. Dial R.V. A probabilistic multipath assignment model which obviates path enumeration. *Transportation Research* 9. 1975. Pp. 123–128.
26. Maher M. SAM – a stochastic assignment model, *mathematics in transportation planning and control*. Oxford University Press, 1991. Pp. 121–132.

27. Brenninger-Gothe M., Jurnsten K.O. Estimation of origin-destination matrices from traffic count using multi-objective programming formulation. *Transportation Research. Part. B*, 23B(4). 1989. Pp. 257–269.
28. Krishnan V., Hancock K.L. Highway freight flow assignment in Massachusetts using geographic information system. *Transportation Research Record*, 1998. No. 1625.

References

1. Lebedeva O.A., Kripak M.N. Modelirovanie gruzovykh perevozok v transportnoi seti [Freight traffic modeling in the transport network]. *Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Angarsk State Technical University]*, 2016. No. 10. Pp. 182–184.
2. Lebedeva O.A., Antonov D.V. Modelirovanie gruzovykh matrits korrespondentsii gravitatsionnym i entropiinyim metodami [Modeling cargo correspondence matrices by gravitational and entropy methods]. *Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Angarsk State Technical University]*, 2015. No. 5 (100). Pp. 118–122.
3. Lebedeva O.A., Kripak M.N. Razvitie gorodskikh gruzovykh sistem s uchetom kontseptsii gorodskogo planirovaniya [Development of urban cargo systems taking into account the concept of urban planning]. *Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Collection of scientific papers of Angarsk State Technical University]*, 2016. Vol. 1. No. 1. Pp. 244–247.
4. Fedotova A.S., Lebedeva O.A. Stepen' ispol'zovaniya propusknoi sposobnosti avtomobil'nykh dorog [The degree of utilization of the throughput capacity of motor highways]. *Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Collection of scientific works of Angarsk State Technical University]*, 2015. Vol. 1. No. 1. Pp. 270–274.
5. Poltavskaya Yu.O. Primenenie geoinformatsionnykh sistem dlya obespecheniya ustoichivogo razvitiya transportnoi sistemy goroda [Application of geographic information systems to ensure sustainable development of the city's transport system]. *Informatsionnye tekhnologii v nauke, upravlenii, sotsial'noi sfere i meditsine: sbornik nauchnykh trudov VI Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii*. Pod red. O.G. Berestnevoi, V.V. Spitsyna, A.I. Trufanov, T.A. Gladkovoii [Information technologies in science, management, social sphere and medicine Collection of scientific papers of the VI International scientific conference. In Berestnev O.G., Spitsyn V.V., Trufanov A.I., Gladkov T.A. (eds)], 2019. Pp. 164–167.
6. Poltavskaya Yu.O. Optimizatsiya transportnoi seti na osnove minimuma obshchikh zatrat na dostavku gruzov [Optimization of the transport network based on the minimum total costs for the delivery of goods]. *Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Angarsk State Technical University]*, 2019. No. 13. Pp. 178–183.
7. Sharov M.I., Mikhailov A.Yu., Duchenkova A.V. Primer otsenki transportnoi dostupnosti s ispol'zovaniem programmnogo produkta PTV «VISUM» [An example of assessing transport accessibility using the software product PTV “VISUM”]. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' [Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate]*, 2013. No. 1 (4). Pp. 133–138.
8. Lebedeva O.A. Analiz proektirovaniya transportnykh zon na osnove modelirovaniya seti [Analysis of the design of transport zones based on network modeling]. *Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Angarsk State Technical University]*, 2019. No. 13. Pp. 172–177.
9. Gozbenko V.E., Kripak M.N., Ivankov A.N. Sovershenstvovanie transportno-ekspeditsionnogo obsluzhivaniya gruzovladel'tsev [Improvement of freight forwarding services for cargo owners]. *Irkutsk: IrGUPS Publ.*, 2011. 176 p.
10. Lebedeva O.A., Kripak M.N., Gozbenko V.E. Increasing effectiveness of the transportation network through by using the automation of a Voronoi diagram. *Transportation Research Procedia*. 2018. Vol. 36. 427–433.
11. Afandizadeh S., Yadi S.M. *Hamedani Iranian Journal of Science & Technology*, 2006. Vol. 30. No. B1.
12. Abrahamsson T. Estimation of origin-destination matrices using traffic count. *International institute for applied systems, Austria*. 1998.
13. Hensher D.A., Button K. J. *Handbook of transportation modelling*. Pergamon. 2000.
14. Moore J.E., Kim G. Evaluating system ATMIS technology via rapid estimation of network flows. *Final Report, University of Southern California*. 1997.
15. Ortuzar J.D., Willumsen L.G. *Modelling transport*. Third edition, John Wily & Sons. 2001.
16. Train K. *Discrete choice methods with simulation*. Cambridge University Press. 2002.
17. Kleinbaum D.G., Klein M. *Logistic regression*. Second edition, Springer. 2002.
18. Ben-Akiva M., Bierlaire M. Discrete choice methods and their applications to short term travel decisions. *Handbook of Transportation Science*, Chapter. 1999.
19. Papacostas C.S., Prevedouro P.D. *Transportation engineering and planning*. Second edition, Prentice-Hall. 2001.
20. Philips D.T., Garcia-Diaz A. *Fundamentals of network analysis*, Prentice-Hall. 1981.
21. Kuzmin O. V., Starkov B. A. Binary matrices with Pascal's triangle arithmetic and symbolic sequences. *News of the Irkutsk State University. Series: Mathematics*. 2016. Vol. 18. pp. 38–47.
22. Kuzmin O. V. Construction of generalized A-and B-polynomials in the mapping space. In the collection: *Methods of discrete analysis in graph theory and complexity*. Novosibirsk, 1992. pp. 66-76.
23. Kuzmin O. V., Leonova O. V. Tushar polynomials and their applications. *Discrete mathematics*. 2000. Vol. 12. No. 3. pp. 60-71.
24. Burrell J.E. Multiple route assignment: a comparison of two methods. *International Symposium of Traffic Equilibrium Methods*, Montreal. 1974.
25. Dial R.B. A probabilistic multipath assignment model which obviates path enumeration. *Transportation Research* 9. 1975. Pp. 123–128.

26. Maher M. SAM – a stochastic assignment model, mathematics in transportation planning and control. Oxford University Press, 1991. Pp. 121–132.

27. Brenninger-Gothe M., Jurnsten K.O. Estimation of origin-destination matrices from traffic count using multi-objective programming formulation. Transportation Research. Part. B, 23B(4). 1989. Pp. 257–269.

28. Krishnan V., Hancock K.L. Highway freight flow assignment in Massachusetts using geographic information system. Transportation Research Record, 1998. No. 1625.

Информация об авторах

Лебедева Ольга Анатольевна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры управления на автомобильном транспорте, Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, e-mail: kravhome@mail.ru.

Гозбенко Валерий Ерофеевич – д-р техн. наук, профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, e-mail: vgozbenko@yandex.ru

Information about the authors

Ol'ga A. Lebedeva – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor at the Subdepartment of Management of Automobile Transport, Angarsk State Technical University, Angarsk, e-mail: kravhome@mail.ru.

Valerii E. Gozbenko – Doctor of Engineering Science, Professor, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Angarsk State Technical University, Angarsk, e-mail: vgozbenko@yandex.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.2(70).170-180

УДК 629.4.025

Техническое решение повышения уровня надежности фазорасщепителей электровозов переменного тока

Н. П. Асташков, В. А. Оленцевич✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ olencevich_va@mail.ru

Резюме

Эффективная работа по реализации планов увеличения пропускной и провозной способностей транспортной инфраструктуры Восточного полигона в полной мере обеспечивается локомотивным комплексом. Повышение тягово-энергетических, скоростных характеристик и экономичности локомотивного парка ОАО «Российские железные дороги» возможно за счет обеспечения устойчивой работы элементов подвижного состава. Актуальность представленной работы доказывает производство и испытание современных локомотивов нового поколения с асинхронным тяговым приводом. Основным ориентиром конструкторов и разработчиков являются решения, которые позволят обеспечить высокие тягово-энергетические показатели электровоза. Учет специфических условий эксплуатации и факторов, оказывающих непосредственное влияние на режимы работы, долговечность и надежность, позволили обосновать структуру и разработать алгоритм работы предложенной системы управления. Руководствуясь отчетами и статистическими данными локомотивных депо Восточного полигона о надежности работы электрооборудования, находящихся в эксплуатации электровозов следует, что используемые для защиты вспомогательных машин аппараты имеют недостатки, обусловленные наличием большого количества случайных факторов, предопределяющих их срабатывание. Технической предпосылкой разработки предложенной системы с адаптацией к условиям эксплуатации является реализация последовательного пуска электродвигателей нагрузки на пониженной частоте вращения. Отказ от использования различных систем автоматического регулирования производительностью вентиляторов электровозов обусловлен низкими энергетическими показателями преобразователей в режимах управления. Фазорасщепитель, обладая несомненными достоинствами, в свою очередь, не позволяет реализовать «мягкий» пуск электродвигателей нагрузки. В настоящее время существуют множество устройств плавного пуска, преимущества применения которых очевидны благодаря широкому спектру функциональных возможностей. Сопоставление данных устройств с предложенной в рамках статьи системой доказывает ее целесообразность как с технической, так и финансово-экономической позиции.

Ключевые слова

безопасность перевозочного процесса, надежность электроподвижного состава, условия эксплуатации электрооборудования, фазорасщепитель, полупроводниковый преобразователь частоты, мотор-вентилятор, система управления, алгоритм работы

Для цитирования

Асташков Н. П. Техническое решение повышения уровня надежности фазорасщепителей электровозов переменного тока / Н. П. Асташков, В. А. Оленцевич // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 2 (70). – С. 170–180. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).170-180

Информация о статье

поступила в редакцию: 17.03.2021, поступила после рецензирования: 06.04.2021, принята к публикации: 05.05.2021

Technical solution to increase the reliability level of phase separators of AC electric locomotives

N. P. Astashkov, V. A. Olentsevich✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ olentsevich_va@mail.ru

Abstract

Effective work on the implementation of plans on increasing the throughput and carrying capacity of the transport infrastructure of the Eastern polygon is fully provided by the locomotive complex. It is possible to increase the traction and energy, speed characteristics and efficiency of the locomotive fleet of OAO "Russian Railways" by ensuring the stable operation of the rolling stock elements. The relevance of the presented work is proven by the production and testing of modern new-generation locomotives with an asynchronous traction drive. The main reference point of designers and developers are solutions that will ensure high traction and energy performance of an electric locomotive. Taking into account the specific operating conditions and factors that directly affect the operating modes, durability and reliability, made it possible to justify the structure and develop an algorithm of the proposed control system. In line with the reports and statistical data of the locomotive depots of the Eastern polygon on the reliability of the operation of electrical equipment in operation of electric locomotives, it can be concluded that the devices used to protect auxiliary machines have disadvantages due to the presence of a large number of accidental factors that determine their operation. The technical prerequisite for the development of the proposed system with adaptation to operating conditions is the implementation of sequential start-up of load electric motors at a reduced speed. The refusal to use various automatic control systems of the performance of electric locomotive valves is conditioned by the low energy indicators of the converters in control modes. Though the phase separator has undoubted advantages, in turn, it does not allow implementing the "soft" start-up of the load electric motors. Currently there are many soft-start-up devices, the advantages of which are obvious due to a wide range of functionality. The comparison of these devices with the system proposed in the framework of the article proves its feasibility both from a technical and financial and economic point of view.

Keywords

safety of the transportation process, reliability of electric rolling stock, operating conditions of electrical equipment, phase splitter, semiconductor frequency converter, motor blower, control system, operation algorithm

For citation

Astashkov N. P., Olentsevich V. A. Tekhnicheskoe reshenie povysheniya urovnya nadyozhnosti fazorasshchepitelei elektrovozov peremennogo toka [Technical solution to increase the reliability level of phase separators of AC electric locomotives]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 2 (70), pp. 170–180. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).170-180

Article info

Received: 17.03.2021, Revised: 06.04.2021, Accepted: 15.05.2021

Введение

Одной из наиболее сложных транспортных систем современной экономики страны является железнодорожный транспорт, поскольку именно он является связующим звеном общей экономической системы Российской Федерации. Сбалансированная работа промышленных производств, своевременная доставка жизненно важных грузов в наиболее удаленные регионы, оптимальное функционирование экономических направлений в регионах и в стране в целом, невозможно без оптимизации деятельности железнодорожной отрасли. Именно для реализации данных направлений в ОАО «Российские железные дороги» создан и успешно функционирует полигон опережающего развития, реализующий в своей деятельности самые передовые технологии и технические средства, применяющий новые административные и управленческие подходы. В рамках Восточного полигона предусмотрено комплексное развитие направлений, направленных на увеличение

эффективности перевозочного процесса, снижение финансовых потерь, облегчение процедур документооборота и коммуникации между работниками, обеспечение качественной аналитики и надёжной поддержки принятия решений: «Разработка и реализация проекта «Цифровая железная дорога», «Создание передовых условий труда», «Локомотивный комплекс», «Инфраструктурный комплекс», «Транспортно-логистическое обслуживание», «Комплексное обслуживание пассажиров», «Развитие социокультурных аспектов и мотивации», «Участие органов государственной власти в реализации программы».

Значение основного показателя работы Восточного полигона - пропускной способности в течение ближайших пяти лет должно увеличиться до 180 млн тонн, а это относительно уровня 2020 года около четверти. Если рассматривать перевозку угольных маршрутов, то плановый прирост должен составить 30%. Плановый объем перевозки отрасли на

восточном направлении из районов Кузбасса к 2024 году составит 68 млн тонн грузов в год, при этом на сегодняшний день данное значение составляет 53 млн тонн, прогнозное ежегодное увеличение 5 млн тонн. Согласно плану развития, на первоначальном этапе модернизации Восточного полигона должно быть сооружено свыше 650 км путевого комплекса, до 2024 года (второй этап) – более 1,3 тыс. км. И первый, и второй этапы включают масштабную реконструкцию инфраструктуры железнодорожных станций, реализацию проектов модернизации систем тягового электроснабжения [1-5]. Эффективная работа по реализации планов увеличения пропускной и провозной способностей транспортной инфраструктуры Восточного полигона в полной мере обеспечивается локомотивным комплексом.

Актуальность представленной работы доказывает производство и испытание современных локомотивов нового поколения с асинхронным тяговым приводом. Основным ориентиром конструкторов и разработчиков являются решения, которые позволят обеспечить высокие тягово-энергетические показатели электровоза.

Анализ состояния локомотивного парка свидетельствует о его значительном износе, требующем обновления. В силу ряда объективных и субъективных причин оздоровление парка осуществляется крайне низкими темпами. Для решения поставленной задачи представляется целесообразной реализация нескольких направлений. Первое – поддержка государства с использованием различных инструментов, одним из которых является субсидирование процентных ставок на приобретение локомотивов. Второе – снижение стоимости локомотивов. Проводимые научные исследования доказывают, что на сегодняшний день одним из направлений, не требующих значительных инвестиций, является повышение уровня надёжности и безопасности существующего парка за счет его модернизации [6].

Основные причины отклонения напряжения в системе вспомогательных машин

С целью выявления наиболее значимых причин нарушения уровня безопасности функционирования железнодорожного транспорта, оптимизации технологических процессов по направлениям деятельности, повышения конкурентоспособности отрасли на рынке современных транспортных услуг по данным состояния безопасности на Восточном полигоне в 2018-2020 гг выполнено построение диаграммы Исайки. На основе статистических данных работы полигона опережающего развития выявлены наиболее значимые причины нарушения уровня безопасности, проанализирована степень их влияния:

1 – низкое качество и нарушение технологии проведения всех категорий ремонта подвижного состава;

2 – низкий уровень качества осмотра подвижного состава;

3 – физический и моральный износ основных фондов;

4 – отсутствие и низкое качество запасных частей и необходимых материалов;

5 – несоответствие численности работников заданному объему работы;

6 – увеличение гарантийных плеч;

7 – недостаточное техническое и организационное оснащение пунктов технического и коммерческого осмотра приборами обнаружения неисправностей;

8 – нарушение действующей технологии роспуска и торможения отцепов на сортировочных горках;

9 – несоблюдение требований инструкций и нормативной документации;

10 – проезд запрещающих сигналов светофоров;

11 – обрыв автосцепок;

12 – сход и столкновение при производстве маневровой работы;

13 – падение на железнодорожный путь деталей подвижного состава и груза;

14 – задержка более одного часа поездов всех категорий по причине неисправности локомотива;

15 – отказ в работе технических средств и оборудования;

16 – неудовлетворительное содержание железнодорожного пути;

17 – отступления от норм содержания железнодорожного пути;

18 – выбросы железнодорожного пути по причине природно-климатических условий местности;

19 – неогражденные мест проведения путевых работ сигналами остановки;

20 – изломы рельсов и неукрытие остряка стрелочного перевода;

21 – уширение рельсовой колеи;

22 – техническое состояние элементов кузова грузовых вагонов;

23 – состояние настила пола платформ грузовых вагонов;

24 – отсутствие или неисправность средств крепления груза в вагонах и контейнерах;

25 – несоблюдение грузоотправителями нормативных требований погрузки и крепления грузов, предусмотренных Техническими условиями размещения и крепления груза;

26 – наличие остатков ранее перевозимых грузов в вагоне;

27 – несогласованность действий сторонних организаций и транспортных компаний;

28 – низкая трудовая и технологическая дисциплина работников транспортных компаний, недостаточный профессиональный уровень персонала;

29 – несовершенство технических средств и технологий предупреждения случаев нарушения безопасности перевозочного процесса;

30 – кража основных фондов;

31 – неудовлетворительные знания и несоблюдение нормативной документации работниками транспортных компаний;

32 – упущения в организации профилактической работы;

33 – нарушение установленного режима труда и отдыха работников транспортных компаний;

34 – загрузка грузовых вагонов сверх установленных норм и нормативов;

35 – отсутствие должного контроля со стороны работников железнодорожного транспорта при приеме груза к перевозке.

Основываясь на выявленных факторах, построена диаграмма Исикава, рис. 1.

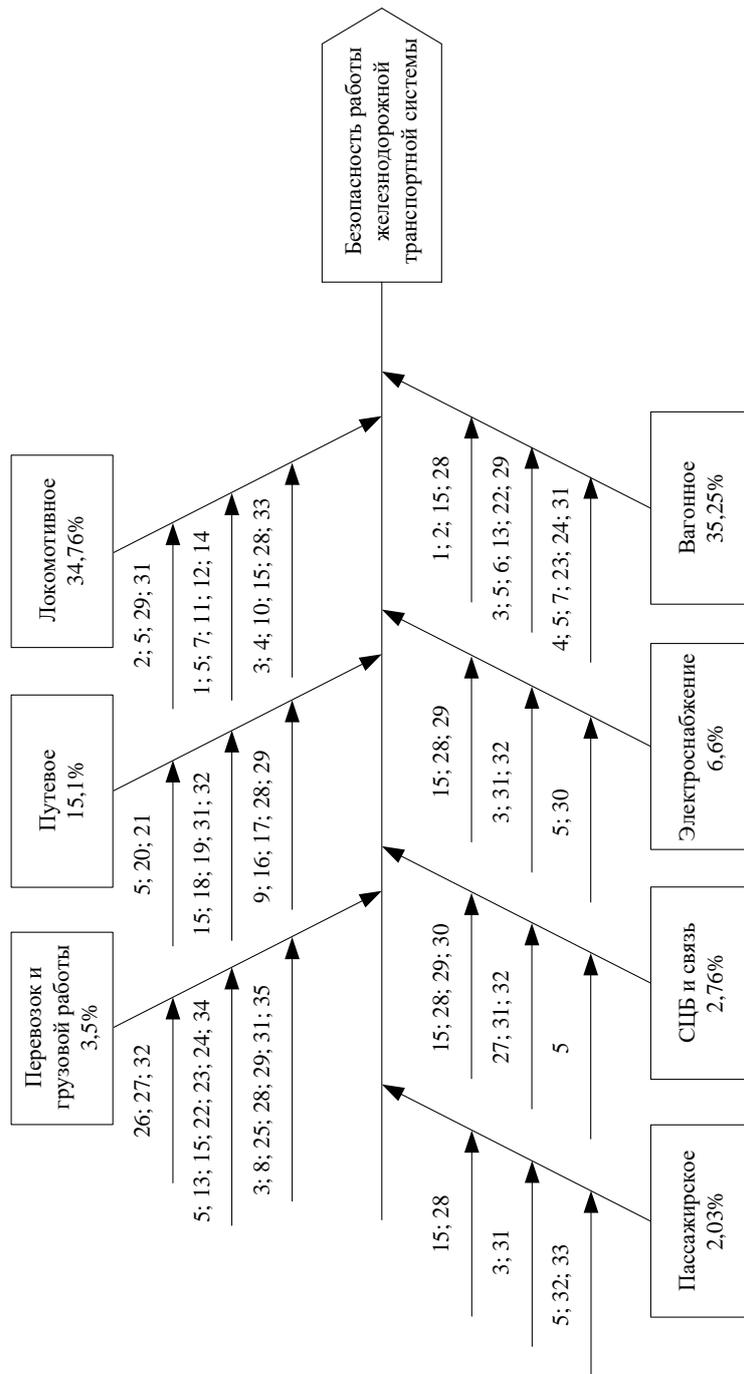


Рис. 1. Факторы, оказывающие непосредственное влияние на уровень безопасности работы на Восточном полигоне
 Fig.1. Factors that have a direct impact on the work reliability level at the Eastern polygon

Как показывает анализ уровня безопасности на Восточном полигоне в 2018-2020 гг причиной нарушения практически каждого случая является влияние человеческого фактора. В связи с этим, рассматривая первоочередные задачи в области обеспечения высокого уровня безопасности организации перевозочного процесса, необходимо обратить внимание на степень подготовленности, дисциплинированности и организованности работников транспортных компаний. Подводя итоги анализа уровня безопасности, можно сказать, что основными факторами большинства случаев наступления риска по всем направлениям деятельности Восточного полигона являются: низкая степень трудовой дисциплины и недостаточный профессиональная подготовка работников транспортных компаний; высокий уровень физического и морального износа подвижного состава. Ошибочные действия локомотивной бригады, либо пренебрежение регламентированным порядком и требованиями выполнения конкретного технологического процесса предопределяют определенное количество отказов [7-10].

На основании объемных и качественных показателей работы, функционирующих в границах Восточного региона локомотивных депо авторами выполнен анализ уровня надежности тягового электрооборудования электровозов переменного тока. Результаты позволили авторам утверждать, что наибольший процент отказов технических средств подвижного состава приходится на вспомогательные машины. Более 60% от суммарной величины неисправностей приходится на повреждение электрической части электродвигателей. Необходимо также отметить, что устранение именно данных неисправностей является наиболее трудоемкой процедурой, обладает высоким уровнем денежных затрат ресурсов заменяемых узлов при их неремонтопригодности. Проведенный анализ характеров повреждений вспомогательных машин свидетельствует, что имеющиеся неисправности электрической части возникают вследствие неудовлетворительных показателей качества используемой электроэнергии [11-13].

Такие неисправности как обрыв фазы, выплавление обмотки ротора, пробой изоляции, низкое сопротивление изоляции обмотки статора и выгорание обмоток электродвигателя подразумевают разработку кардинально новых методов повышения надежности электродвигателя.

Зачастую данный вопрос рассматривается только в части локомотива как объекта перевозок в отрыве от комплекса задач, решаемых в перевозочном процессе. Управление локомотивными парками, организация взаимодействия с ремонтным комплексом сервисных компаний, осуществляющих техническое обслуживание и ремонт тягового подвижного состава, организация движения поездов в период летних путевых работ с учетом существующего и планиру-

емого на перспективу графика движения поездов позволили обосновать предложенное техническое решение [1, 11].

Опыт эксплуатации электроподвижного состава позволил выделить следующие группы факторов, воздействие которых отражается на надежности фазорасщепителей электровозов переменного тока:

- конструктивные, обусловленные использованием элементов и узлов с низкой надежностью;
- применяемых схемных решений, недостатки которых не учтены при реализации используемых технических устройств;
- использование в практической сфере комплектующих деталей, которые не в полной мере соответствуют параметрам эксплуатации;
- производственные технологические решения, обусловленные нарушением установленной процедуры ремонта;
- отсутствие или недостаточный контроль уровня качества проведения монтажа или изготовления технических средств;
- несоблюдением технологических требований и регламентов в формате депо-ремонта;
- монтажные, обусловленные несоблюдением требований технологии монтажа;
- эксплуатационные, обусловленные режимом работы нагрузки фазорасщепителя;
- отклонением величины действующего значения напряжения во вторичной обмотке тягового трансформатора электровоза;
- реализация пуска электродвигателей нагрузки прямым способом;
- климатическими факторами.

Влияние климатических факторов в значительной мере влияет на степень надежности функционирования электрической части фазорасщепителей, поскольку именно запыленность и повышенная влажность окружающей среды оказывают непосредственное негативное влияние на диэлектрические свойства изоляции. Исключение влажности возможно за счет использования электрокалориферных установок, однако, данное техническое решение усложнит конструкцию электровоза. Кроме того, воздействие температуры окружающего воздуха, особенно в летний период времени, в совокупности с эксплуатационными факторами может привести к превышению предельно допустимой температуры изоляции рассматриваемой электрической машины, согласно ее классу.

Особое внимание необходимо уделить эксплуатационным факторам, учет которых предопределяет возможность модернизации системы и повышения ее надежности. К таким факторам относятся:

- качество электроэнергии на обмотках электрических машин;
- несимметрия напряжений;

– несинусоидальность напряжения во вторичной обмотке трансформатора.

Величина и продолжительность отклонения напряжения непосредственно определяют ресурс электродвигателей и их эффективность.

Отклонение напряжения на токоприёмнике электровоза переменного тока, а также элементах электрической цепи при прохождении тока нагрузки является определяющим фактором, оказывающим воздействие на отклонение напряжения в цепи трёхфазного тока вспомогательных машин электровозов.

Отклонение уровня напряжения в системе напряжений вспомогательных машин имеет ряд причин:

- снижение электродвижущей силы вспомогательной обмотки трансформатора из-за активного и реактивного сопротивлений первичной обмотки при нагрузке обмоток трансформатора, питающих выпрямительно-инверторный преобразователь;

- отклонение напряжения в контурах первичной и вспомогательной обмоток трансформатора от тока двигателей вспомогательных машин и симметрирующих конденсаторов;

- изменение гармонических составляющих несинусоидального переменного напряжения на токоприемнике в ходе управления тяговым и скоростным режимом электровоза;

- зависимость действующего значения напряжения прямой последовательности в трехфазной системе напряжений от действующего однофазного напряжения на вспомогательной обмотке тягового трансформатора вследствие погрешности работы симметрирующих устройств [14, 15].

Повышение уровня надежности фазорасщепителей электровозов переменного тока

Длительное отклонение напряжения от номинального значения на обмотках статора трехфазных асинхронных двигателей предопределяет повышение тока, что приводит к росту температуры активных частей электрической машины, ухудшению энергетических показателей и сокращению срока службы.

При разработке систем вспомогательного привода для электровозов переменного тока рассматривались варианты применения автоматической стабилизации симметрии трехфазной системы. В рамках представленной статьи рассмотрены технические решения устройств стабилизации напряжения питания вспомогательных машин, использование которых позволит оптимизировать режимы работы приводных электродвигателей. Однако, практическое использование данных устройств в системе привода вспомогательных машин не только усложнит конструкцию, но и вызовет сложности ее размещения в секции локомотива [16].

В этой связи на всех отечественных электровозах питание вспомогательных машин осуществляется без стабилизации и симметрии напряжений [17]. В то же время для обеспечения надежности самих приводных электродвигателей при работе во всем диапазоне изменения питающего напряжения их номинальная мощность завышена до 50 %, чем обусловлены повышенные габаритные размеры и масса вспомогательных машин. Этот недостаток в определенной степени компенсируется простотой схемотехнического исполнения.

Первым этапом разработки системы явилось рассмотрение паспортных данных вспомогательных машин для оценки параметров переходных процессов пуска и обоснования предложенного алгоритма управления [18]. В рамках исследования рассмотрен электровоз серии ВЛ80Р.

Особое внимание уделено определенным эксплуатационным режимам. Пример, при проследовании нейтральной вставки контактной сети участка железнодорожной линии локомотивная бригада, согласно установленной технологии работы, обязана произвести отключение вспомогательных машин в соответствии со следующим алгоритмом действия:

- отключение мотор-вентиляторов МВ;
- отключение мотор-компрессора МК;
- отключение фазорасщепителей;
- отключение главного выключателя ГВ.

По окончании проследования нейтральной вставки данного участка железнодорожной линии необходимо произвести включение указанных вспомогательных машин в последовательности, обратной выключению.

При этом необходимо учитывать, что подключение нагрузки должно производиться последовательно, что позволяет в свою очередь минимизировать величину пусковых токов и обеспечить необходимые технические характеристики работы подвижного состава. Не допускается одновременное включение всех вспомогательных машин, питаемых через фазорасщепитель. Между включениями каждого двигателя должна соблюдаться выдержка времени, необходимая для перехода двигателя на устойчивую ветвь механической характеристики. Пренебрежение регламентированным временем между включением вспомогательных машин локомотивными бригадами предопределяет целочисленное количество отказов электрической части рассматриваемых электрических машин. Предложенное в рамках статьи техническое решение позволит исключить человеческий фактор, обеспечивая регламентируемую последовательность и время между включением электродвигателей нагрузки.

Реализация предложенного технического решения возможна с учетом использования полупроводникового преобразователя частоты, использование

которого позволит реализовать «мягкий» пуск мотор-вентиляторов на пониженной частоте [19, 20].

Контур, осуществляющий контроль величины напряжения во вторичной обмотке собственных нужд тягового трансформатора, предупредит включение предложенной системы управления. Следует отметить, что параллельная работа фазорасщепителя и предложенного полупроводникового преобразователя частоты не только позволяет решать поставленные в рамках статьи задачи, но и осуществляет резервирование штатной схемы, рис. 2.

Поднятие электровоза либо проследование им нейтральной вставки контактной сети, системой управления необходимо обеспечить первоочередной запуск мотор-компрессора и масляного насоса с последующим поочередным пуском мотор-вентиляторов на пониженной частоте вращения, по истечению которого происходит переход в штатную схему. Включение при этом производится от штатной схемы с фазорасщепителем с использованием предложенного преобразователя.

Реализация последовательного пуска на пониженной частоте вращения реализована за счет использования контакторов КМ1-КМ4. Таймерами микропроцессорной системы управления предлагаемая схема будет переведена в штатный режим по истечению запрограммированного времени.

С целью рекомендации данной системы для практического применения в структуре ОАО «РЖД» и ее дочерних компаниях, необходимо произвести технический расчет его потребной мощности, а также обосновать процедуру выбора преобразователя частоты.

Началом работы предложенной системы является запуск фазорасщепителя и мотор-компрессора от штатной схемы электровоза ВЛ80Р. В данный момент времени контакторы КМ1-КМ4 переключены и разрывают цепь штатной схемы на предложенное схемотехническое решение. Уставка микроконтроллера учитывает параметры переходного процесса запуска мотор-компрессора, истечение которой определяется замыкание контакта КМ5 с целью пуска

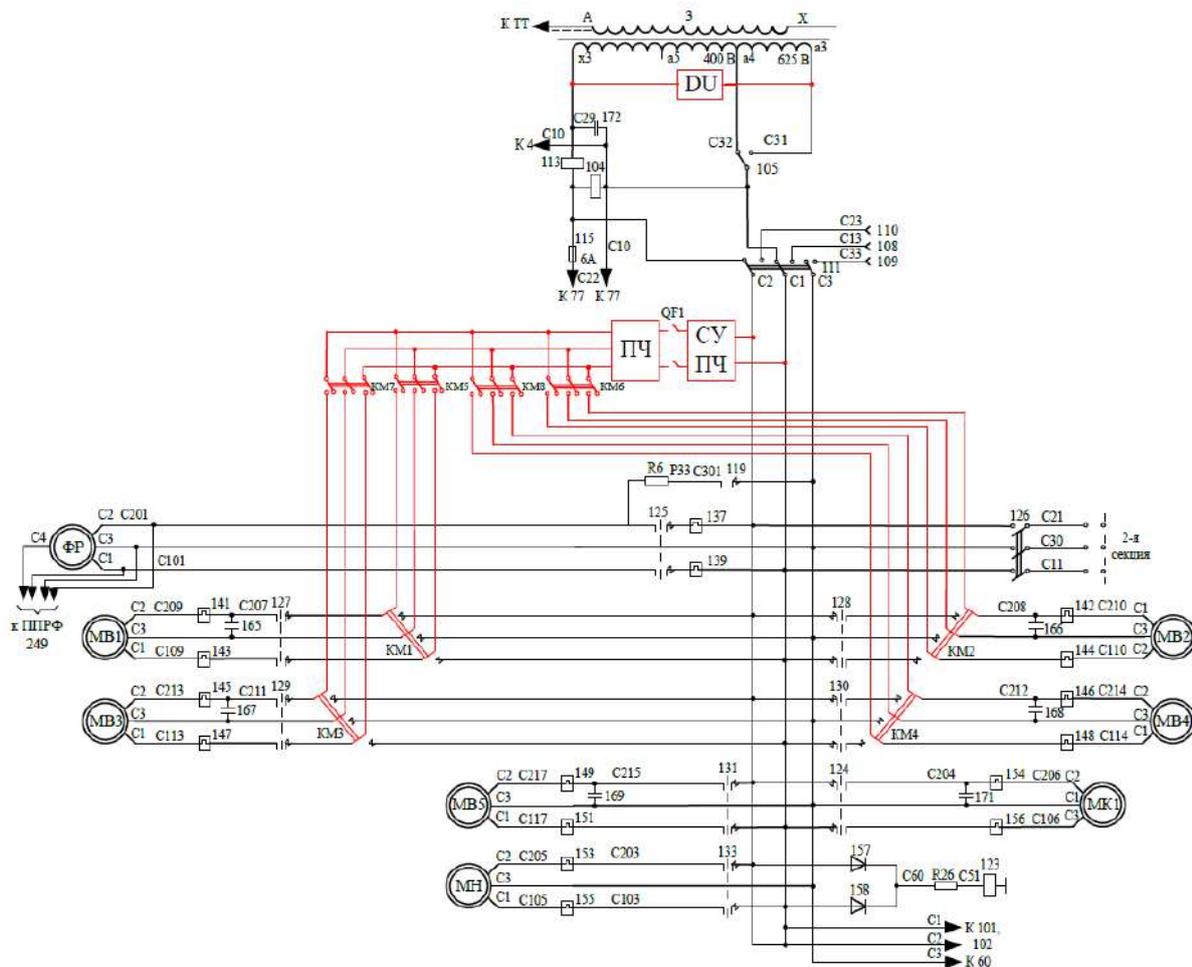


Рис. 2. Предлагаемая схема работы вспомогательных машин электровоза серии ВЛ80Р с учетом конструктивных особенностей

Fig. 2. The proposed scheme of operation of auxiliary machines of the VL80R series electric locomotive, taking into account design features

МВ1 на пониженной частоте вращения от предложенного полупроводникового преобразователя.

Анализ технических характеристик асинхронного электродвигателя predeterminedил время, по истечении которого контакт КМ6 замыкается. Аналогичный процесс происходит и при включении оставшихся мотор-вентиляторов. Реализация предложенного алгоритма управления за счет устранения пусковых токов машин нагрузки позволит повысить надежность электрической части фазорасщепителей, рис. 3.

После пуска последнего мотор-вентилятора с учетом времени переходного процесса контакторы

КМ1-КМ4 переключают машины охлаждения на штатную схему электровоза, а контактор QF1 отключает питание предложенной в рамках статьи системы.

Современными тенденциями на подвижном составе являются улучшение показателей надежности, минимизация энергопотребления с сохранением надежности оборудования, что принесет несомненную экономическую выгоду и простоту эксплуатации электроподвижного состава.

Предложена схема питания вспомогательных машин на пониженной частоте путем установки в силовую схему электровозов серии ВЛ80Р полупро-

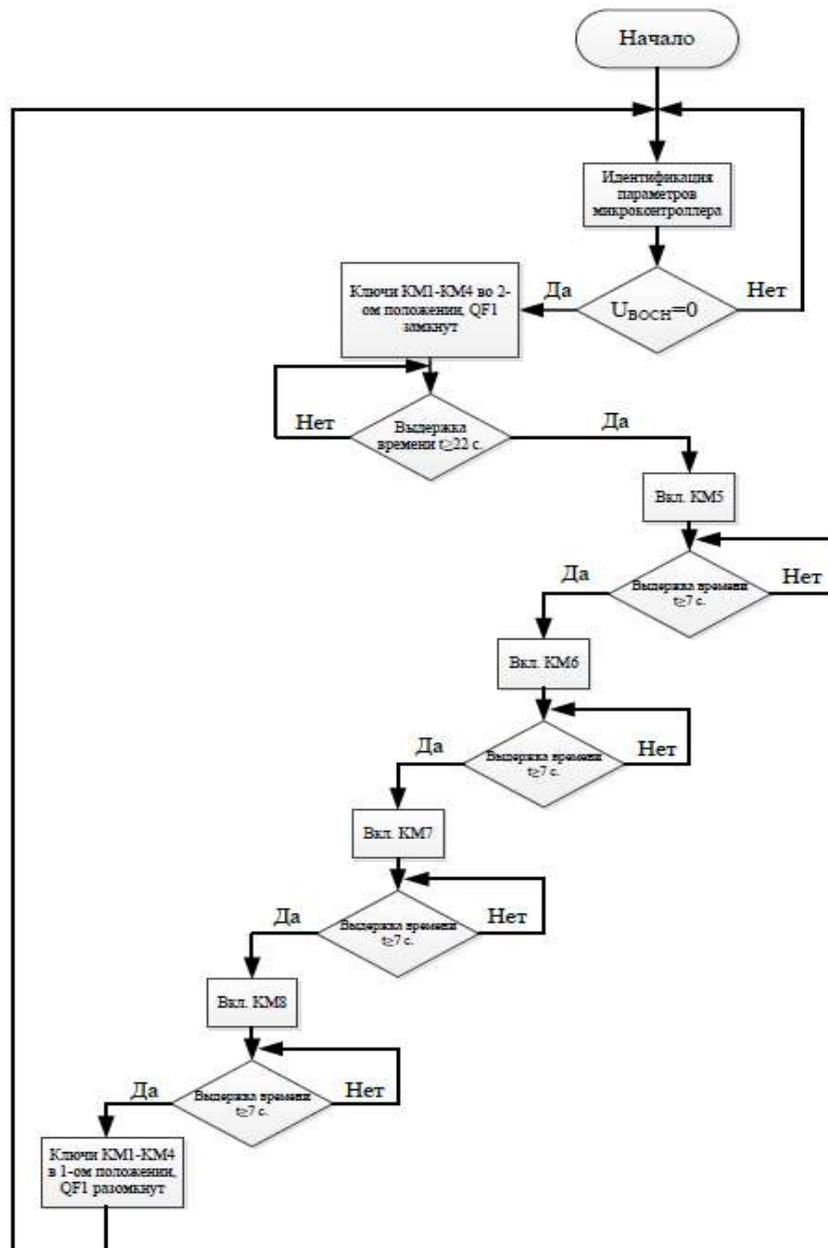


Рис. 3. Алгоритм работы предложенной системы управления вспомогательными машинами электровоза
Fig. 3. The algorithm of the proposed control system for auxiliary machines of an electric locomotive

водникового преобразователя частоты для его параллельной работы с фазорасщепителем. Проведенный экономический расчет показал, что срок окупаемости предложенной системы управления вспомогательными машинами электровоза составляет 1,26 года.

Выводы

Представленная авторами в статье система управления вспомогательными машинами электровозов переменного тока в первую очередь направлена на исключение или минимизацию влияния величины пусковых токов на энергосистему подвижного состава в целом. Особенностью является то, что практическое использование предложенной системы окажет минимальные воздействия на геометрические параметры кузова электровоза.

Практическое применение данной системы управления вспомогательными машинами электровозов переменного тока на Восточном полигоне

позволит в значительной степени снизить число отказов фазорасщепителей, связанных с выплавлением и выгоранием его основных элементов и технических узлов.

Представленный алгоритм реализует последовательный пуск мотор-вентиляторов электровоза с учетом времени переходного процесса данного режима каждого электродвигателя. Как только механическая характеристика переходит на установившуюся ветвь осуществляется пуск следующего электродвигателя нагрузки, что позволяет сделать объективный вывод об отсутствии пусковых токов рассматриваемых машин.

Предлагаемая система управления преобразователем частоты является безопасной для жизнедеятельности работников, ее обслуживающих и ремонтирующих, и экологичной для окружающей среды.

Список литературы

1. ОАО «Российские железные дороги»: офиц. портал. URL: <http://www.rzd.ru>
2. Для увеличения пропускной способности БАМа и Транссиба потребуется практически удвоить потребление электрической мощности // Инфраструктура, 28.01.21. e-mail: info@gudok.ru
3. Muzyko T. Osobennosti pokazatelei otsenki kachestva transportnykh uslug [Features of indicators for assessing the quality of transport services] [Electronic media]. URL: <https://popravu.club/transport/prava-passazhirov-i-perevozchikov/kachestvo-transportnyh-uslug.html>.
4. Гозбенко В.Е., Иванков А.Н., Колесник М.Н., Пашкова А.С. Методы прогнозирования и оптимизации транспортной сети с учетом мощности пассажира и грузопотоков. Депонированная рукопись № 330-В2008. 17.04.2008.
5. M V Konstantinova, A A Olentsevich, V Yu Konyukhov, E A Guseva and V A Olentsevich Automation of failure forecasting on the subsystems of the railway transport complex in order to optimize the transportation process as a whole IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2020, 1064 (2021) 012020
6. Olentsevich V A, Belogolov Yu I, Kramynina G N 2019 Set of organizational, technical and reconstructive measures aimed at improvement of section performance indicators based on the study of systemic relations and regularities of functioning of railway transport system // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 832 (2020) 012038
7. Pogodin V.K., Belogolov Yu.I., Gozbenko V.E., Kargapol'tsev S.K., Olentsevich V.A., Gladkih A.M. CALCULATION OF SEALING PRESSURES OF SHUT-OFF VALVES В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2020, MEACS 2020. 2021. С. 012035.
8. Иванкова Л.Н. Основные факторы, влияющие на ритмичность работы грузовых специализированных станций // В сборнике: Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта. Межвузовский сборник научных трудов. Москва, 2020. С. 10-17.
9. Иванкова Л.Н., Иванков А.Н., Куныгина Л.В. Совершенствование схем и технологии работы решающих технических и грузовых станций Восточного полигона // В сборнике: Современные подходы к управлению на транспорте и в логистике. Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. 2016. С. 52-56.
10. Громышова С.С., Зуева Л.Д., Савельева Т.А., Гозбенко В.Е. Анализ отказов технических средств контроля и управления в сложноструктурированной транспортной системе // В сборнике: НАУКА СЕГОДНЯ: ВЫЗОВЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ И ВОЗМОЖНОСТИ. материалы международной научно-практической конференции. Вологда, 2020. С. 8-9.
11. Файзрахманова Е.В., Игнатъева Е.И., Оленцевич А.А. Безбарьерная транспортная среда как средство повышения эффективности грузовых перевозок // В сборнике: Повышение управленческого, экономического, социального и инновационно-технического потенциала предприятий, отраслей и народно-хозяйственных комплексов. сборник статей XI Международной научно-практической конференции. Пенза, 2020. С. 210-213.
12. Бурянина Н.С., Королук Ю.Ф., Корякина М.Л., Малеева Е.И., Лесных Е.В., Суслов К.В. Линии электропередачи с увеличенной пропускной способностью // Грозненский естественнонаучный бюллетень. 2019. Т. 4. № 3 (17). С. 83-90.
13. Воропай Н.И., Суслов К.В. Задачи обоснования развития активных систем электроснабжения // Промышленная энергетика. 2018. № 1. С. 2-6.
14. Минуллин Р.Г., Волченко К.М., Абдуллазянов Э.Ю., Касимов В.А., Филимонова Т.К. Предельные возможности локационного мониторинга состояния проводов линий электропередачи // В сборнике: Кибернетика энергетических систем. Сборник материалов XI сессии научного семинара по тематике "Диагностика энергооборудования". 2018. С. 164-168.

15. Правила устройства системы тягового электроснабжения железных дорог Российской Федерации ЦЭ-462. – М.: Транспорт, 2007. – 450 с.
16. Akhmetshin A.R., Suslov K.V., Astashkov N.P., Olentsevich V.A., Shtayger M.G., Karlina A.I. Development of the performance control algorithm of the blower motors of electric locomotives for various operating modes В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference: Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2020). 2021. С. 012001.
17. Алексеева Т.Л., Рябченко Н.Л., Астраханцев Л.А. Электроэнергетическая система железной дороги и электрическая тяга поездов. Состояние и перспективы развития // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2018. Т. 2. С. 234-239.
18. Асташков Н.П., Оленцевич А.А. Изменение технологии работы транспортно-технологической системы железнодорожного транспорта за счет использования нового типа подвижного состава // В сборнике: Наука сегодня: задачи и пути их решения. материалы международной научно-практической конференции. 2019. С. 16-17.
19. Асташков Н.П., Тихомиров В.А., Асташков С.П. Функциональная схема системы автоматического управления мотор-вентиляторами электровоза на выбеге и остановках на промежуточных станциях // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2016. Т. 2. С. 354-357.
20. Ryabchenok N., Alekseeva T., Astrakhancev L., Astashkov N., Tikhomirov V. ENERGY-SAVING DRIVING OF HEAVY TRAINS // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Т. 982. С. 491-508.
21. Grigoriev N.P., Klykov M.S., Trofimovich P.N., Tikhomirov V.A. Reduction of electrical energy losses of power transformers of 25 Kv traction substations // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region, SibTrans 2019. 2020. С. 012060.

References

1. ОАО «Российские железные дороги»: ofits. portal [ОАО "Russian Railways": the official portal] [Electronic media]. URL: <http://www.rzd.ru>.
2. Dlya uvelicheniya propusknnoi sposobnosti BAMa i Transsiba potrebuetsia prakticheski udvoit' potreblenie elektricheskoi moshchnosti [To increase the capacity of the BAM and the Transsib, it will be necessary to almost double the consumption of electric power]. GUDOK.RU. Transportnyi portal [GUDOK.RU. The transportation portal]. URL: <https://gudok.ru/news/?ID=1551229>. Accessed: January 28, 2021.
3. Muzyko T. Osobennosti pokazatelei otsenki kachestva transportnykh uslug [Features of indicators for assessing the quality of transport services] [Electronic media]. URL: <https://popravu.club/transport/prava-passazhirov-i-perevozchikov/kachestvo-transportnyh-uslug.html>.
4. Gozbenko V. E., Ivanov A. N., Kolesnik M. N., Pashkova A. S. Metody prognozirovaniya i optimizatsii transportnoi seti s uchyotom moshchnosti passazhiro- i gruzopotokov. Deponirovannaya rukopis' No. 330-V2008. 17.04.2008 [Methods of forecasting and optimization of the transport network taking into account the capacity of passenger and cargo flows. Deposited manuscript No. 330 - V2008. 17.04.2008].
5. Konstantinova M.V., Olentsevich A. A., Konyukhov V. Yu., Guseva E. A. and Olentsevich V. A. Automation of failure forecasting on subsystems of the railway transport complex in order to optimize the transportation process as a whole. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2020, 1064 (2021) 012020
6. Olentsevich V. A., Belogolov Yu. I., Kramynina G. N. A set of organizational, technical and reconstructive measures aimed at improving the performance indicators of the work of sections based on the study of system connections and patterns of functioning of the railway transport system. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 832 (2020) 012038
7. Pogodin V. K., Belogolov Yu. I., Gozbenko V. E., Kargapoltsev S. K., Olentsevich V. A., Gladkikh A.M. Calculation of the sealing pressure of shut-off valves. In the collection: IOP conference series: Materials Science and Technology. International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2020, MEAC 2020. 2021. p. 012035.
8. Ivankova L. N. Osnovnye faktory, vliyayushchie na ritmichnost' raboty gruzovykh spetsializirovannykh stantsii [The main factors affecting the rhythm of the work of specialized cargo stations]. V sbornike: Sovremennye problemy sovershenstvovaniya raboty zheleznodorozhnogo transporta. Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov [In the collection: Modern problems of improving the work of railway transport. Interuniversity collection of scientific papers]. Moscow, 2020. pp. 10-17.
9. Ivankova L. N., Ivankov A. N., Kunygina L. V. Sovershenstvovanie skhem i tekhnologii raboty reshayushchikh tekhnicheskikh i gruzovykh stantsii Vostochnogo poligona [Improvement of schemes and technologies of operation of crucial technical and cargo stations of the Eastern polygon]. V sbornike: Sovremennye podkhody k upravleniyu na transporte i v logistike. Sbornik materialov Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [In the collection: Modern approaches to management in transport and logistics. Collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference, 2016. pp. 52-56.
10. Gromyshova S. S., Zueva L. D., Savel'eva T. A., Gozbenko V. E. Analiz otkazov tekhnicheskikh sredstv kontrolya i upravleniya v slozhnostrukturirovannoi transportnoi sisteme. [Analysis of failures of technical means of control and management in a complex structured transport system]. V sbornike: Nauka segodnya: vyzovy, perspektivy i vozmozhnosti. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [In the collection: NAUKA SEGODNYA: CHALLENGES, PROSPECTS AND OPPORTUNITIES. Materials of the international scientific and practical conference]. Vologda, 2020. pp. 8-9.
11. Faizrahmanova E. V., Ignat'eva E. I., Olentsevich A. A. Bezbar'ernaya transportnaya sreda kak sredstvo povysheniya effektivnosti gruzovykh perevozok [Barrier-free transport environment as a means of increasing the efficiency of cargo transportation]. V sbornike: Povyshenie upravlencheskogo, ekonomicheskogo, sotsial'nogo i innovatsionno-tekhnicheskogo potentsiala predpriyatii, otraslei i narodno-khozyaistvennykh kompleksov. sbornik statei XI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [In the collection: Improving the managerial, economic, social and innovative-technical potential of enterprises,

industries and national economic complexes. collection of articles of the XI Scientific and Practical International Conference]. Penza, 2020. pp. 210-213.

12. Buryanina N. S., Korolyuk Yu. F., Koryakina M. L., Maleeva E. I. et al. Linii elektroperedachi s uvelichennoi propusknoi sposobnost'yu [Electric power transmission lines with increased throughput capacity]. Groznenskiy estestvennonauchnyi byulleten' [Grozny Natural Science Bulletin], 2019. Vol. 4. No. 3 (17). pp. 83-90.

13. Voropai N. I., Suslov K. V. Zadachi obosnovaniya razvitiya aktivnykh sistem elektrosnabzheniya [Problems of substantiation of the development of active power supply systems]. Promyshlennaya energetika [Industrial power engineering], 2018. No. 1. pp. 2-6.

14. Minullin R. G., Volchenko K. M., Abdullazyanov E. Yu., Kasimov V. A., Filimonova T. K. Predel'nye vozmozhnosti lokatsionnogo monitoringa sostoyaniya provodov linii elektroperedachi [Limiting possibilities of location monitoring of the state of wires of power transmission lines]. V sbornike: Kibernetika energeticheskikh sistem. Sbornik materialov KhL sessii nauchnogo seminaru po tematike "Diagnostika energooborudovaniya" [In the collection: Cybernetics of energy systems. Collection of materials of the XL session of the scientific seminar on the topic "Diagnostics of energy consumption"], 2018. pp. 164-168.

15. Pravila ustroystva sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznykh dorog Rossiiskoi Federatsii TsE-462 [Rules for the device of the traction power supply system of the railways of the Russian Federation CE-462]. Moscow: Transport Publ., 2007. 450 p.

16. Akhmetshin A. R., Suslov K. V., Astashkov N. P., Olentsevich V. A. et al. Development of an algorithm for controlling the performance of electric locomotive fan motors for various operating modes. In the collection: IOP Conference series: Materials Science and Engineering. International Conference: Topical issues of Mechanical Engineering (AIME 2020). 2021. p. 012001.

17. Alekseeva T. L., Ryabchenok N. L., Astrakhansev L. A. Elektroenergeticheskaya sistema zheleznoi dorogi i elektricheskaya tyaga poezdov. Sostoyanie i perspektivy razvitiya [Electric power system of the railway and electric traction of trains. State and prospects of development]. Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona [Transport infrastructure of the Siberian region], 2018. Vol. 2. Pp. 234-239.

18. Astashkov N. P., Olentsevich A. A. Izmenenie tekhnologii raboty transportno-tekhnologicheskoi sistemy zheleznodorozhnogo transporta za schet ispol'zovaniya novogo tipa podvizhnogo sostava [Changing the technology of the transport and technological system of railway transport through the use of a new type of rolling stock]. V sbornike: Nauka segodnya: zadachi i puti ikh resheniya. materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [In the collection: Science today: tasks and ways to solve them. Materials of the international scientific and practical conference], 2019. Pp. 16-17.

19. Astashkov N. P., Tikhomirov V. A., Astashkov S. P. Funktsional'naya skhema sistemy avtomaticheskogo upravleniya motor-ventilyatorami elektrovoza na vybege i ostanovkakh na promezhutochnykh stantsiyakh [Functional scheme of the system of automatic control of electric locomotive motor fans at slowing-down and stops at intermediate stations]. [Transport infrastructure of the Siberian region], 2016. Vol. 2. pp. 354-357.

20. Ryabchenok N., Alekseeva T., Astrakhansev L., Astashkov N., Tikhomirov V. Energy-saving driving of heavy-load trains. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2020. Vol. 982. pp. 491-508.

21. Grigoriev N. P., Klykov M. S., Trofimovich P. N., Tikhomirov V. A. Reduction of electric energy losses of power transformers of 25 kV traction substations. In the collection: IOP Conference Series: Materials Science and Technology. International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region, SibTrans 2019. 2020. p. 012060.

Информация об авторах

Асташков Николай Павлович – к. т. н., доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: astashkovnp@yandex.ru

Оленевич Виктория Александровна – к. т. н., доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: olencevich_va@mail.ru

Information about the authors

Nikolai P. Astashkov – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, the Subdepartment of Operational Work Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: astashkovnp@yandex.ru

Viktoriya A. Olentsevich – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, the Subdepartment of Operational Work Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: olencevich_va@mail.ru

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

INFORMATION TECHNOLOGY

Экспертная система оценки угроз безопасности информации: обоснование необходимости разработки, метод и сложности при реализации

Д. С. Милько ✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ dmitry.s.milko@gmail.com

Резюме

Оценка угроз безопасности информации необходима для разработки соответствующей модели угроз. Также результаты оценки угроз применяются для выбора и обоснования требуемых мер при построении системы защиты информации. В работе описана значимость проведения оценки угроз безопасности информации при разработке системы защиты информации объекта информатизации. Сравнение нового методического документа по оценке угроз безопасности информации, утвержденного Федеральной службой по техническому и экспортному контролю России в феврале 2021 г. с действовавшим ранее методическим документом показало увеличение трудоемкости процесса оценки актуальности угроз. В связи с этим в статье обоснована необходимость автоматизации процесса оценки угроз безопасности информации. Выделены факторы, которые влияют на увеличение трудоемкости процесса. Наглядно продемонстрирована динамика роста количества угроз безопасности информации в Банке данных угроз Федеральной службы по техническому и экспортному контролю России за время существования этого информационного ресурса. Указано юридическое обоснование возможности автоматизации процесса оценки угроз безопасности информации. В качестве метода автоматизации процесса оценки угроз безопасности выбран метод экспертных систем. Приведены преимущества и недостатки этого метода применительно к указанной задаче. Процесс оценки угроз безопасности информации выделен в формальное представление в виде логического выражения. На основе логического выражения и этапов проведения оценки угроз сформирована схема алгоритма работы экспертной системы. Описано функциональное назначение компонентов схемы. Определены вопросы для дальнейшей проработки при реализации программного комплекса автоматизации оценки угроз безопасности информации методом экспертной системы.

Ключевые слова

угрозы безопасности информации, модель угроз, метод экспертных систем, методический документ, программный комплекс, экспертная система

Для цитирования

Милько Д.С. Экспертная система оценки угроз безопасности информации: обоснование необходимости разработки, метод и сложности при реализации // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 2 (70). – С. 182–189. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).182-189

Информация о статье

поступила в редакцию: 04.05.2021, поступила после рецензирования: 21.05.2021, принята к публикации: 03.06.2021

Threat modeling expert system: reasons for development, method and implementation troubles

D. S. Milko ✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ dmitry.s.milko@gmail.com

Abstract

The assessment of information security threats is necessary to develop a threat model. Also, the results of the assessment are needed to choose information protection measures. This paper describes the importance of assessing information security threats in the process of developing an information security system. A comparison of the new methodological document of the FSTEC of Russia (February 2021) with the previously valid methodological document showed an increase in the complexity of threat analysis. In this regard, the paper identifies the need to automate the process of assessing information security threats. It describes the factors that lead to an increase in the complexity of the procedure. The dynamics of the growth of the number of information security threats in the Threat Database of the FSTEC of Russia during its existence is brought into sharp focus. The legal justification of the possibility of automating the analysis of information security threats is indicated. The method of expert systems is selected and justified as a method of automating the process of assessing security threats. The paper provides advantages and disadvantages of the method of expert systems in relation to this problem. The process of assessing information security threats is separated into a formal representation as a logical formula. Based on the logical formula and threat assessment stages, a diagram of the algorithm is formed. The functional purpose of the diagram components is described. The issues for further study in the

implementation of the software package of automating the assessment of information security threats by the expert system method are identified.

Keywords

information security threats, threat model, method of expert systems, methodological document, software package, expert system

For citation

Milko D. S. Ekspertnaya sistema otsenki ugroz bezopasnosti informatsii: obosnovanie neobhodimosti razrabotki, metod i slozhnosti pri realizatsii [Threat modelling expert system: reasons for development, method and implementation troubles]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 2 (70), pp. 182–189. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).182-189

Article Info

Received: 04.05.2021, Revised: 21.05.2021, Accepted: 03.06.2021

Введение

Разработка модели угроз безопасности информации является одним из обязательных этапов предпроектного обследования при построении систем защиты информации любого уровня сложности [1]. Разработка частной модели угроз безопасности информации проводится путем оценки актуальности угроз конкретного объекта информатизации. Оценка угроз безопасности информации, выполненная с учетом всех особенностей объекта, позволяет построить адекватную и эффективную систему защиты информации без избыточной траты активов организации (в том числе финансовых, людских и прочих [2]) на основе частной модели угроз [3], т. е. частная модель угроз безопасности информации позволяет построить систему защиты информации с выполнением критерия оптимальности (баланса) между защищенностью информации и затратами на реализацию системы защиты информации.

Особенностью оценки угроз безопасности информации является практическая направленность. В современных условиях кадровой необеспеченности задачу разработки моделей угроз безопасности информации приходится решать большому количеству сотрудников, занимающихся защитой информации – от уровня экспертов на крупных предприятиях до уровня техников и системных администраторов в небольших организациях. Существует большое количество организаций, сотрудники которых не являются специалистами в области информационной безопасности, но на них возложены обязанности по защите информации.

Для экспертов высокого уровня подготовленности задача оценки угроз решается, хотя и не является тривиальной. Однако, с другой стороны, решение данной задачи для объектов информатизации со сложной архитектурой и нетипичными особенностями условий функционирования может быть очень трудоемкой и потребовать дополнительных ресурсов, в том числе информационных путем привлечения сторонних экспертов.

Для специалистов, не обладающих достаточной квалификацией, эта задача может быть не решается в

принципе. С учетом этого организации привлекают для оценки угроз сторонних экспертов на договорной основе [4, 5], что приводит к увеличению затрат финансовых активов организации на обеспечение информационной безопасности [2]. Кроме этого, сторонние эксперты также могут столкнуться со сложностями работы с незнакомым объектом информатизации. В частности, эксперты сторонней организации могут не получить достаточного объема сведений об особенностях условий функционирования объекта информатизации. В таком случае оценка угроз безопасности будет проведена не оптимально, баланс между защищенностью информации и затратами на реализацию системы защиты будет нарушен.

Оценка угроз безопасности информации и разработка модели угроз проводится в соответствии с методическими документами, разработанными и утвержденными Федеральной службой по техническому и экспортному контролю Российской Федерации (ФСТЭК России) [6] и Федеральной службой безопасности Российской Федерации [7] в пределах их компетенций. Трудоемкость оценки угроз безопасности информации выросла с введением ФСТЭК России в действие нового методического документа [8].

Перечисленные предпосылки стали поводом для рассмотрения возможности автоматизации процесса оценки угроз безопасности информации путем разработки программного комплекса.

В настоящей работе перечислены ключевые особенности нового методического документа, которые являются аргументами при обосновании необходимости автоматизации процесса оценки угроз безопасности информации; содержатся юридические основания для разработки такого программного комплекса; описан метод, в соответствии с которым будет разрабатываться программный комплекс; содержится формализованное представление процесса оценки угроз безопасности информации в виде логического выражения и высокоуровневой схемы работы программного комплекса; перечислены за-

дачи, требующие исследования и проработки, для реализации указанного программного комплекса.

Описание особенностей нового методического документа

В начале февраля 2021 г. ФСТЭК России был утвержден методический документ «Методика оценки угроз безопасности информации» [8]. Ключевое отличие нового методического документа от действовавшего ранее заключается в оценке сценариев реализации угроз безопасности информации, которая ранее не проводилась. Ранее существовавший в методических документах подход был основан на вероятностной математической модели и позволял произвести оценку актуальности угроз безопасности информации экспертным методом исходя, в большей степени, из субъективной составляющей [9]. Подход к оценке угроз безопасности в новом методическом документе основан на экспертной оценке возможных сценариев реализации угроз и в меньшей степени зависит от субъективной составляющей.

Предполагается, что эксперт должен провести анализ 10 тактик реализации угроз, которые включают в себя совокупность из 145 техник. Для определения возможных сценариев реализации угроз все тактики и техники должны быть сопоставлены со всеми 222 угрозами безопасности информации, которые содержатся на текущий момент в Банке данных угроз (БДУ) безопасности информации, ведение которого осуществляется ФСТЭК России [10]. Актуальной считается угроза безопасности информации, для которой имеется хотя бы один сценарий для ее реализации.

Следует отметить, что количество угроз в БДУ ФСТЭК России регулярно увеличивается. Далее представлены данные о количестве угроз в БДУ ФСТЭК России, полученные с использованием онлайн-сервиса Internet Archive Wayback Machine (рис. 1) [11].

Таким образом, при перемножении количества техник и количества угроз в БДУ ФСТЭК России, получается внушительное число – 32 190 сценариев реализации угроз. При оценке угроз подлежат рассмотрению все варианты сценариев [9]. Дополнительно к БДУ ФСТЭК России необходимо учитывать отраслевые (ведомственные, корпоративные) модели угроз безопасности информации при их наличии [9].

Конечно, стоит отметить, что часть угроз безопасности информации должны быть исключены из рассмотрения еще до проработки сценариев реализации угроз. Причина исключения состоит в том, что в процессе оценки угроз учитываются структурно-функциональные характеристики объекта информатизации, а далее с учетом указанных характеристик часть угроз признается не актуальными по причине отсутствия той или иной информационной технологии на объекте информатизации [6, 7]. Например, далеко не каждый объект информатизации использует технологии больших данных, суперкомпьютеры, машинное обучение, беспроводные технологии и т. д. В случае, если какая-либо из технологий не используется на объекте информатизации, то все угрозы, связанные с данной технологией, исключаются.

Однако даже в случае исключения некоторого

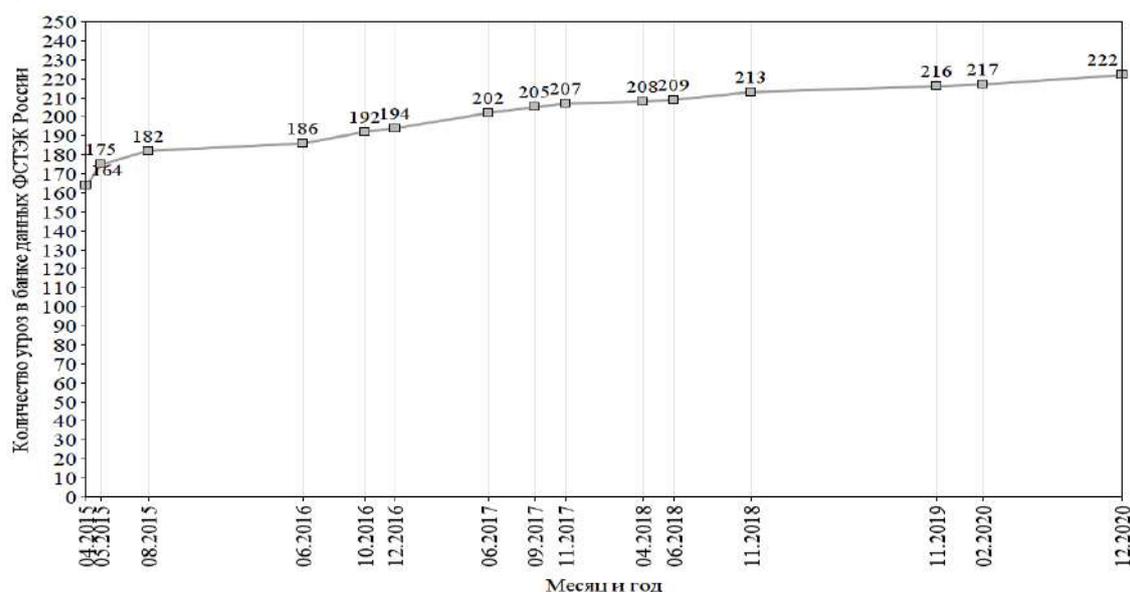


Рис. 1. График количества угроз безопасности информации в базе данных угроз Федеральной службы по техническому и экспортному надзору России за время его существования

Fig. 1. Graph of the number of information security threats in the Federal Service's threat database for technical and export supervision of Russia during its existence

количества угроз из рассмотрения, порядок числа рассматриваемых сценариев остается неизменным. Более того, в настоящий момент практически все объекты информатизации в России постоянно модернизируются [12]. В них регулярно внедряются новые информационные технологии, происходит их усложнение. Помимо этого, становится известно о новых угрозах безопасности информации и уязвимостях информационных технологий [13]. По этим причинам новый методический документ предусматривает периодическую повторную оценку угроз безопасности информации при эксплуатации объекта информатизации с целью постоянной доработки модели угроз и, как следствие, доработки системы защиты информации [9], т. е. даже в самом тривиальном случае, когда в организации имеется всего один объект информатизации, задача оценки угроз становится регулярной и требует периодических трудозатрат со стороны сотрудника, ответственного за обеспечение информационной безопасности. При увеличении количества объектов информатизации на предприятии время, затраченное сотрудником на проведение оценки угроз, будет увеличиваться. В предельном случае выделенные сотрудники должны постоянно работать только над оценкой угроз безопасности информации и доработкой модели.

В дополнение к занятости сотрудников-экспертов в области информационной безопасности следует отметить, что в методическом документе отмечена рекомендация о создании экспертной группы методом Дельфы [14] в интересах снижения субъективных факторов. В состав экспертной группы рекомендуется включать экспертов различной специализации – от специалистов в области информационных технологий до специалистов экономических (финансовых) подразделений [9]. Таким образом, для выполнения указанной рекомендации периодически должны быть задействованы уже несколько сотрудников организации, работающих над оценкой угроз безопасности информации и доработкой модели.

Охват типов объектов информатизации для нового методического документа также увеличился. Методика обязательна к применению для определения угроз безопасности информации в следующих системах:

- государственные (муниципальные) информационные системы;
- информационные системы персональных данных;
- значимые объекты критической информационной инфраструктуры Российской Федерации;
- информационные системы управления производством, используемые организациями оборонно-промышленного комплекса;
- автоматизированные системы управления производственными и технологическими процессами на

критически важных объектах, потенциально опасных объектах, объектах, представляющих повышенную опасность для жизни и здоровья людей и для окружающей природной среды [9].

Таким образом, методический документ должен применяться на большинстве объектов информатизации на всех предприятиях на территории Российской Федерации.

Резюмируя особенности нового методического документа, далее будут перечислены факторы, определяющие увеличение трудоемкости оценки угроз безопасности информации в соответствии с новым методическим документом без использования средств автоматизации:

- большое число сочетаний угроз безопасности информации и сценариев их реализации;
- необходимость регулярного проведения повторной оценки угроз безопасности информации;
- привлечение экспертной группы для проведения оценки;
- большое количество объектов информатизации, для которых необходимо руководствоваться указанными методическими рекомендациями при проведении оценки.

Кроме этого, актуальной остается проблема недостаточного количества квалифицированных специалистов по защите информации на предприятиях, способных проводить оценку угроз безопасности информации для всех типов объектов информатизации [15]. Особенно остро эта проблема проявляется в регионах, удаленных от центральной части страны.

По совокупности указанных факторов можно сделать вывод о необходимости автоматизации оценки угроз безопасности информации с целью снижения издержек на ее проведение путем разработки соответствующего программного комплекса.

Правовые основания для автоматизации оценки угроз безопасности информации

Для обоснования возможности разработки программного комплекса автоматизации оценки угроз безопасности информации в методическом документе ФСТЭК России предусмотрены два тезиса: «при оценке угроз безопасности информации могут использоваться программные средства, позволяющие автоматизировать данную деятельность», «ведение модели угроз безопасности информации и поддержание ее в актуальном состоянии может осуществляться в электронном виде» [9].

Представленные тезисы позволяют сделать вывод о том, что для оценки угроз безопасности информации и разработки модели может быть официально использовано программное средство. Указанное программное средство позволит автоматизировать процесс оценки угроз безопасности информации и использовать в работе электронный вариант

модели угроз безопасности информации. Иные требования ФСТЭК России к программным средствам такого вида в настоящий момент отсутствуют.

Обоснование выбранного метода автоматизации оценки угроз безопасности информации

Для автоматизации процесса оценки угроз безопасности был выбран метод разработки экспертных систем. Для такого решения имеется ряд причин, которые связаны с преимуществами и недостатками указанного метода.

Во-первых, преимуществом экспертных систем является логический вывод. В результате работы экспертной системы на основании определенных фактов формируется логичное, оправданное заключение [16]. При реализации метода экспертных систем программный комплекс на основании известных фактов об угрозах безопасности информации формирует логически построенный вывод об актуальности угроз. В отличие от методов машинного обучения экспертная система способна объяснить свои рассуждения, которые привели к определенному заключению. Специалист по защите информации при необходимости должен уметь обосновать принятое решение по оценке угроз безопасности уполномоченным контролирующим органам. Экспертная система оценки угроз безопасности способна оказывать при этом существенную помощь [17, 18].

Во-вторых, экспертная система способна жестко повторять принятое решение независимо от внешних воздействий, т. е. по одним и тем же входным данным программный комплекс даст один и тот же отклик на выходе [16]. Экспертная система не подвержена субъективным факторам при принятии одинаковых решений через определенный период времени.

В-третьих, при использовании экспертных систем снижаются издержки, связанные с предоставлением экспертных знаний [16]. Экспертные знания в таком программном комплексе содержатся в базе знаний. При этом уровень квалификации пользователя экспертной системы может быть ниже уровня квалификации эксперта, который сформировал базу. Иными словами, при использовании программного комплекса для оценки угроз безопасности информации не обязательно привлечение высококвалифицированного специалиста.

В-четвертых, экспертная система позволяет использовать экспертные знания из многих источников [16]. С помощью программного комплекса могут быть собраны знания многих экспертов, которые не всегда могут быть привлечены к работе над оценкой угроз. Тем самым программный комплекс позволит снизить издержки, связанные с многократным привлечением членов экспертной группы без снижения объективности результатов оценки.

В-пятых, один из недостатков экспертных систем – узкая специализация. Одна экспертная система может быть использована только в одной определенной предметной области [16]. В данном случае предметная область определена однозначно как область информационной безопасности. По этой причине указанный недостаток экспертных систем не является препятствием для разработки программного комплекса выбранным методом.

Таким образом, с учетом анализа недостатков и преимуществ метода экспертных систем, можно сделать вывод о том, что именно экспертная система является подходящим вариантом для разработки программного комплекса оценки угроз безопасности информации.

Формализованное представление процесса оценки угроз безопасности информации

Для преобразования принципов, составляющих основу методического документа, в алгоритм работы экспертной системы необходимо формализовать представленный подход к оценке угроз безопасности информации в виде некоторой модели.

Условие актуальности угрозы безопасности информации, приведенное в методическом документе, можно представить в логическом виде:

$$A_i = [Y_i \wedge O_i \wedge H_i \wedge C_i], \quad (1)$$

где i – индекс, соответствующий одной из 222 угроз безопасности информации в БДУ ФСТЭК России; A_i – актуальность i -й угрозы; Y_i – негативные последствия, связанные с ущербом от i -й угрозы; O_i – объект воздействия i -й угрозы; H_i – нарушитель (источник i -й угрозы); C_i – способ реализации i -й угрозы.

В соответствии с (1), угроза безопасности информации возможна (актуальна), если реализация угрозы может привести к негативным последствиям, имеются объект, на который осуществляется воздействие, способы реализации угрозы и нарушитель (источник угрозы).

При этом у всех перечисленных в (1) сущностей имеется ряд свойств, которые необходимо учитывать при разработке экспертной системы. Указанные свойства описаны далее с указанием этапов оценки угроз безопасности информации.

На предварительном этапе пользователь должен провести инвентаризацию на объекте информатизации с целью получения входных данных для ввода в программный комплекс.

На первом этапе для определения возможных негативных последствий (Y) программный комплекс должен задать пользователю ряд вопросов об объекте информатизации через интерфейс. Ответ на указанные вопросы позволит экспертной системе определить актуальные виды риска (ущерба) от У1 до У3.

На втором этапе пользователь через интерфейс программного комплекса должен сообщить сведения

о возможных объектах воздействия (O), актуальных для объекта информатизации. Экспертная система должна сопоставить эти сведения с характеристиками угроз безопасности информации.

На третьем этапе экспертная система должна задать пользователю вопросы об объекте информатизации, касающиеся актуальных видов нарушителей (источников угрозы, H). Для выполнения третьего этапа экспертная система должна для каждого из видов нарушителей:

- установить соответствие с категорией нарушителя (внешний или внутренний);
- определить возможные цели реализации угрозы с учетом информации об объекте информатизации и субъективной оценки пользователя;
- установить соответствие целей реализации угрозы с видами ущерба, выбранными на первом этапе (от $U1$ до $U3$), и негативными последствиями.

В результате третьего этапа работы экспертной системы будут получены актуальные уровни возможностей нарушителей (от $H1$ до $H4$) и результаты оценки целей реализации угроз безопасности информации.

На четвертом этапе экспертная система должна сопоставить результаты работы первых трех этапов со всеми угрозами безопасности из БДУ ФСТЭК России.

Формализованное представление алгоритма работы экспертной системы по оценке угроз безопас-

ности информации в соответствии с актуальным методическим документом ФСТЭК России [9] представлена в виде схемы (рис. 2).

На каждом этапе работы программного комплекса будут исключены те угрозы из БДУ ФСТЭК России, которые не могут быть реализованы на объекте информатизации по следующим причинам:

- реализация угрозы не приведет к негативным последствиям (ущербу) для организации;
- отсутствуют возможные объекты воздействия для реализации угрозы;
- отсутствуют нарушители безопасности информации, заинтересованные в реализации угрозы;
- отсутствуют возможные сценарии реализации угрозы безопасности информации;

Сведения, указанные в блоках белого цвета на схеме алгоритма работы экспертной системы, должны быть представлены в частной модели угроз безопасности информации.

Заключение

Разрабатываемый программный комплекс оценки угроз безопасности информации позволит снизить издержки организаций на проведение оценки угроз безопасности информации в соответствии с методическим документом ФСТЭК России [9].

Реализация представленного алгоритма в настоящий момент невозможна по причине ряда существующих сложностей, требующих проработки:

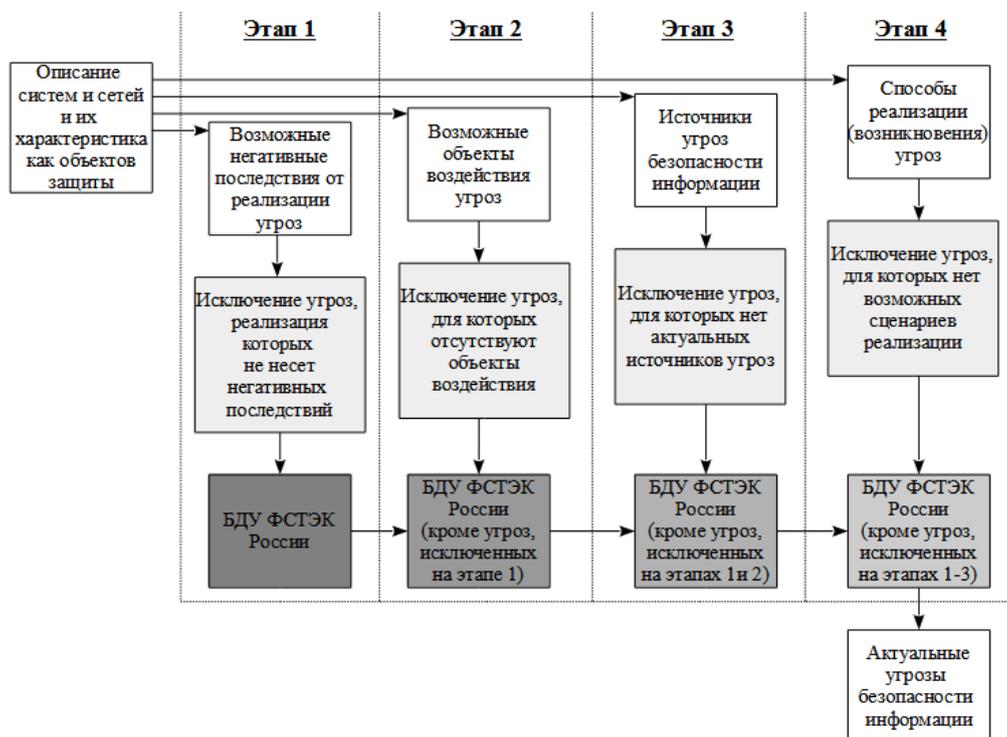


Рис. 2. Схема алгоритма работы экспертной системы оценки угроз безопасности информации
Fig. 2. Scheme of the algorithm of the expert system of the assessment of information security threats

– представленные в методическом документе возможные негативные последствия не охватывают всего множества предполагаемых негативных последствий от реализации угроз безопасности информации и требуют проработки;

– объекты воздействия, перечисленные в методическом документе, не в полной мере совпадают с объектами воздействия, указанными в описаниях угроз безопасности информации БДУ ФСТЭК России;

– представленный в методическом документе пример оценки целей реализации угроз безопасности информации необходимо дополнить другими видами объектов информатизации, кроме государственных информационных систем;

– существующий порядок представления потенциала (актуальных возможностей) нарушителей не позволяет однозначно сопоставить четыре уровня возможностей нарушителя в методическом документе [9] и три уровня потенциала нарушителей в БДУ ФСТЭК России.

Список литературы

1. Конев А.А. Подход к построению модели угроз защищаемой информации // Доклады ТУСУР. 2012. № 1-2 (25). С. 34–39.
2. ГОСТ Р 53114-2008. Защита информации. Обеспечение информационной безопасности в организации. Основные термины и определения. Дата введения 01.10.2009.
3. Анищенко В.В., Криштофик А.М. Комплексная оценка угроз безопасности // Материалы конференции «Обеспечение безопасности информации в информационных системах», Минск, 11 ноября 2004 г. Минск, Академия управления, 2004, С. 33–36.
4. Приказ ФСТЭК России от 11.02.2013 № 17 «Об утверждении Требований о защите информации, не составляющей государственную тайну, содержащейся в государственных информационных системах».
5. Приказ ФСТЭК России от 18.02.2013 № 21 «Об утверждении Состав и содержания организационных и технических мер по обеспечению безопасности персональных данных при обработке в информационных системах персональных данных».
6. Указ Президента РФ от 16.08.2004 № 1085 «Вопросы Федеральной службы по техническому и экспортному контролю».
7. Указ Президента РФ от 11.08.2003 № 960 «Вопросы Федеральной службы безопасности Российской Федерации».
8. Методический документ ФСТЭК России от 05.02.2021 «Методика оценки угроз безопасности информации».
9. Методический документ ФСТЭК России от 14.02.2008 «Методика определения актуальности угроз безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных».
10. Банк данных угроз ФСТЭК России [Электронный ресурс]. URL: <https://bdu.fstec.ru/threat> (дата обращения 10.03.2021).
11. Internet Archive Wayback Machine [Электронный ресурс]. URL: <https://archive.org/web/> (дата обращения 10.03.2021).
12. Цифровая экономика. Динамика и перспективы развития ИТ-отрасли. Экспресс-информация ИСИЭЗ НИУ ВШЭ [Электронный ресурс]. URL: <https://issek.hse.ru/mirror/pubs/share/371960649.pdf> (дата обращения 10.03.2021).
13. Муханова А., Ревнивых А.В., Федотов А.М. Классификация угроз и уязвимостей информационной безопасности в корпоративных системах // Вестник Новосиб. гос. ун-та. Серия: Информационные технологии. 2013. Т. 11, вып. № 2. С. 55–72.
14. Миков Д.А. Анализ методов и средств, используемых на различных этапах оценки рисков информационной безопасности // Вопросы кибербезопасности. 2014. № 4 (7). С. 49–54.
15. Малюк А.А. Кадровое обеспечение информационной безопасности // Государственная служба. 2011. № 5. С. 75–79.
16. Джарратано Д., Райли Г. Экспертные системы: принципы разработки и программирование. Изд. 4-е, Вильямс, 2006.
17. Данеев А.В., Жигалов Н.Ю., Шварц-Зиндер С.Н. Использование систем интеллектуальной поддержки принятия решений при проведении диагностических пожарно-технических экспертиз: монография. Иркутск: ФГОУ ВПО ВСИ МВД России, 2009. 144 с.
18. Данеев А.В., Воробьев А.А., Куменко А.Е., Лебедев Д.М., Мاستин А.Б. Методика формирования комплекса средств управления сложной организационно-технической системой. Вестник Бурятского государственного университета. 2010. № 9. С. 263–268.

References

1. Konev A.A. Podkhod k postroeniuyu modeli ugroz zashchishchaemoi informatsii [An approach to the creation of a protected information model]. *Doklady TUSUR [TUSUR reports]*, 2012. No. 1-2 (25). Pp. 34–39.
2. GOST R 53114-2008. Zashchita informatsii. Obespechenie informatsionnoi bezopasnosti v organizatsii. Osnovnyye terminy i opredeleniya. Data vvedeniya 01.10.2009. [GOST R 53114-2008. Information security. Ensuring information security in the organization. Basic terms and definitions. Valid from October 01, 2009].
3. Anishchenko V.V., Krishtofik A.M. Kompleksnaya otsenka ugroz bezopasnosti [Comprehensive security threat assessment]. *Materialy konferentsii «Obespecheniye bezopasnosti informatsii v informatsionnykh sistemakh»*. Minsk, 11 noyabrya 2004 g. [Materials of the conference “Ensuring information security in information systems”, Minsk, November 11, 2004]. Minsk, Akademiya upravleniya Publ., 2004. Pp.33–36.
4. Prikaz FSTEC Rossii ot 11.02.2013 No. 17 «Ob utverzhenii Trebovaniy o zashchite informatsii, ne sostavlyayushchei gosudarstvennuyu tainu, sodержashcheysya v gosudarstvennykh informatsionnykh sistemakh». [Order of the FSTEC of Russia

No. 17 dated February 11, 2013 «On the approval of the Requirements for the protection of information that does not constitute a state secret contained in state information systems»].

5. Prikaz FSTEK Rossii ot 18.02.2013 No. 21 «Ob utverzhdenii Sostava i sodержaniya organizatsionnykh i tekhnicheskikh mer po obespecheniyu bezopasnosti personal'nykh dannykh pri obrabotke v informatsionnykh sistemakh personal'nykh dannykh» [Order of the FSTEK of Russia No. 21 dated February 18, 2013 «On the approval of the Composition and content of organizational and technical measures to ensure the security of personal data during their processing in personal data information systems»].

6. Ukaz Prezidenta RF ot 16.08.2004 No. 1085 «Voprosy Federal'noi sluzhby po tekhnicheskomu i eksportnomu kontrol'yu». [The Decree of the President of the Russian Federation No. 1085 dated August 16, 2004 «Issues of the Federal Service for Technical and Export Control»].

7. Ukaz Prezidenta RF ot 11.08.2003 No. 960 «Voprosy Federal'noi sluzhby bezopasnosti Rossiiskoi Federatsii». [The Decree of the President of the Russian Federation of 11.08.2003 No. 960 «Questions of the Federal Security Service of the Russian Federation»].

8. Metodicheskii dokument FSTEK Rossii ot 05.02.2021 «Metodika otsenki ugroz bezopasnosti informatsii» [The methodological document of the FSTEK of Russia dated February 05, 2021 «Methodology for assessing information security threats»].

9. Metodicheskii dokument FSTEK Rossii ot 14.02.2008 «Metodika opredeleniya aktual'nosti ugroz bezopasnosti personal'nykh dannykh pri ikh obrabotke v informatsionnykh sistemakh personal'nykh dannykh» [The methodological document of the FSTEK of Russia dated February 14, 2008 «Methodology for determining the relevance of threats to the security of personal data during their processing in personal data information systems»].

10. Bank Danykh Ugroz FSTEK Rossii [Threat Data Bank of the FSTEK of Russia] [Electronic media]. URL: <https://bdu.fstec.ru/threat> (Accessed: March 10, 2021).

11. Internet Archive Wayback Machine [Electronic media]. URL: <https://archive.org/web/> (Accessed: March 10, 2021).

12. Tsifrovaya ekonomika. Dinamika i perspektivy razvitiya IT-otrasli. Express-informatsiya ISIEZ NIU VSE [Digital economy. Dynamics and prospects of the IT industry development. Express information of the HSE ISSEK] [Electronic media]. URL: <https://issek.hse.ru/mirror/pubs/share/371960649.pdf> (Accessed: March 10, 2021).

13. Mukhanova A., Revnivykh A.V., Fedotov A.M. Klassifikatsiya ugroz i uyazvimostei informatsionnoi bezopasnosti v korporativnykh sistemakh [Classification of threats and vulnerabilities of information security in corporate systems]. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Informatsionniye tekhnologii* [The bulletin of Novosibirsk State University. Series: Information Technologies], 2013. Vol. 11. No. 2. Pp. 55–72.

14. Mikov D.A. Analiz metodov i sredstv, ispol'zuemykh na razlichnykh etapakh otsenki riskov informatsionnoi bezopasnosti [Analysis of methods and tools used at various stages of information security risk assessment]. *Voprosy kiberbezopasnosti* [Cybersecurity issues], 2014. No. 4 (7). Pp. 49–54.

15. Malyuk A.A. Kadrovoe obespechenie informatsionnoi bezopasnosti [Personnel support of information security]. *Gosudarstvennaya sluzhba* [Public service], 2011. No. 5. Pp. 75–79.

16. Giarratano J., Riley G. Expert systems: principles and programming. Fourth edition. Course Technology, 2004. 288 p. (Russ. ed.: Dzharratano D., Raili G. Ekspertnye sistemy: printsipy razrabotki i programmirovaniya. Izd. 4-e, Vil'yams Publ., 2006.)

17. Daneev A.V., Zhigalov N.Yu., Shvartz-Zinder S.N. Ispolzovanie sistem intellektualnoi podderzhki prinyatiya reshenii pri provedenii diagnosticheskikh pozharno-tekhnicheskikh ekspertiz: monografiya [The use of intellectual decision support systems in conducting diagnostic fire and technical examinations: a monograph]. Irkutsk: The East Siberian Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia Publ., 2009. 144 p.

18. Daneev A.V., Vorob'ev A. A., Kumenko A. E., Lebedev D. M., Mastin A. B. Metodika formirovaniya kompleksa sredstv upravleniya slozhnoi organizatsionno-tekhnicheskoi sistemoi [Methods of forming a complex of management tools for a complex organizational and technical system]. *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta* [The bulletin of Buryat State University], 2010. No. 9. Pp. 263–268.

Информация об авторах

Милько Дмитрий Сергеевич – аспирант кафедры информационных систем и защиты информации, Иркутский государственный университет путей сообщений, г. Иркутск, e-mail: dmitry.s.milko@gmail.com

Information about the authors

Dmitrii S. Mil'ko – Ph.D. student at the Subdepartment of Information Systems and Information Security, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: dmitry.s.milko@gmail.com

DOI 10.26731/1813-9108.2021.2(70).189-199

УДК 73.31.75 + 73.01.77 + 625.096

Системный анализ травматизма с участием детей на российских автомобильных дорогах

В. С. Асламова¹, **А. А. Минко¹**, **А. А. Асламов²**, **Е. А. Асламова³**

¹ *Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация*

² *Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, Российская Федерация*

³ *Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация*

✉ aslamovav@yandex.ru

Резюме

В статье выявлены значимые факторы и причины дорожно-транспортных происшествий (в том числе и с участием детей) на автомобильных дорогах России с применением онтологии предметной области обеспечения безопасности дорожного движения и системного анализа статистических данных Госавтоинспекции за 2019 и 2020 г. С использованием пакета Statgraphics Plus при обработке данных статистики с 2015 по 2020 г. получены регрессионные модели численности общих дорожно-транспортных происшествий, происшествий со смертельным исходом, детского смертельного травматизма в возрасте до 16 и 18 лет и суммарной численности травмированных (раненых и погибших) в дорожно-транспортных происшествиях с участием подростков в возрасте до 16 и до 18 лет на автодорогах общего пользования. Найденные модели удовлетворяют 96,4–98,8 % статистических данных, что позволяет их использовать для прогнозирования показателей травматизма. Выполнен сравнительный анализ показателей травматизма за 2019 и 2020 г. и получены градации причин возникновения дорожно-транспортных происшествий. Основные их причины – столкновение транспортных средств (42,51 %), наезд транспортного средства на пешехода (26,74 %) и на препятствие (5,78 %). Выявлено существенное снижение всех показателей травматизма в 2020 г. по сравнению с 2019 г., что, видимо, обусловлено особенностью этого года: существенными ограничениями для перемещений при пандемии, снижением интенсивности потоков автотранспорта, частичной интенсификацией профилактической работы, техническими и организационными мерами обеспечения безопасности движения.

Ключевые слова

безопасность дорожного движения, онтология предметной области, причины дорожно-транспортных происшествий, подростковый травматизм, коэффициент детерминации, регрессионная модель

Для цитирования

Асламова В. С. Системный анализ травматизма с участием детей на российских автомобильных дорогах / В. С. Асламова, А. А. Минко, А. А. Асламов, Е. А. Асламова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 2 (70). – С. 189–199. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).189-199

Информация о статье

поступила в редакцию: 27.02.2021, поступила после рецензирования: 23.03.2021, принята к публикации: 27.03.2021

System analysis of child injuries on the motor roads of Russia

V.S. Aslamova¹✉, A.A. Minko¹, A.A. Aslamov², E.A. Aslamova³

¹ Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

² Angarsk State Technical University, Angarsk, the Russian Federation

³ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, the Russian Federation

✉ aslamovav@yandex.ru

Abstract

This article identifies significant factors and causes of road traffic accidents (including those involving children) on the motor roads of Russia using the ontology of the subject area of providing road traffic safety and system analysis of the statistical data of the State Traffic Inspectorate for 2020 and 2019. When processing statistical data from 2015 to 2020, regression models of the number of general road traffic accidents, road traffic accidents with fatal outcomes, fatal injuries of children under the age of 16 and 18 years and the total number of injured (injuries and fatalities) in road traffic accidents with the participation of adolescents under 16 and under 18 years of age on public motor roads were obtained using Statgraphics Plus. The found models satisfy 96,4–98,8 % of statistical data, which allows them to be used in predicting injury rates. A comparative analysis of injury rates for 2019 and 2020 was carried out and gradations of the causes of road accidents were obtained. The main causes of road accidents were: collision of vehicles (42,51 %), vehicle hitting a pedestrian (26,74 %) and an obstacle (5,78 %). A significant decrease in all injury rates in 2020 compared to 2019 was revealed. This is apparently caused by the peculiarity of this year: significant restrictions for movement during the pandemic, a decrease in the intensity of traffic flows, partial intensification of preventive work, technical and organizational measures to ensure traffic safety.

Keywords

road traffic safety, subject area ontology, causes of road traffic accidents, adolescent injuries, coefficient of determination, regression model

For citation

Aslamova V. S., Minko A. A., Aslamov A. A., Aslamova E. A. Sistemnyi analiz travmatizma s uchastiem detei na rossiiskikh avtomobilnykh dorogakh [System analysis of child injuries on the motor roads of Russia]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 2 (70), pp. 189–199. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).189–199

Article info

Received: 27.02.2021, Revised: 23.03.2021, Accepted: 27.03.2021

Введение

Специфика развития автомобильного транспорта России обусловлена не только высоким уровнем автомобилизации и аварийности, но и наращиванием рынка транспортных услуг, нормативной неопределенностью, а также субъективизмом и формализмом в работе контрольно-надзорной деятельности и организации работ по обеспечению безопасности дорожного движения (ОБДД) [1, 2].

В структуре техногенных чрезвычайных ситуаций (ТЧС) на дорожно-транспортные происшествия (ДТП) приходится львиная доля. Так, в 2019 г. в России произошло 202 ТЧС, из которых ДТП составили 58,91 % (119 случаев) с материальным ущербом 39,18 млн руб. [3]. Причем тяжесть последствий ДТП на автодорогах России (12–14 погибших на 100 пострадавших) превышает в 10 раз показатели Великобритании и Германии (1,2–1,4) [2].

Ситуация с подростковым ДТП остается достаточно сложной: рост числа погибших подростков отмечается практически в 28 субъектах РФ [4]. Неблагополучно в России и с ДТП с участием подростков в возрасте до 14 лет: численность ДТП, приходящаяся на 10 тыс. ед. автотранспорта, превышает в 30 раз аналогичный показатель Италии, в 20 раз показатели Германии и Франции, в 10 раз показатель Великобритании [5].

Цель работы заключается в выявлении значимых факторов и причин ДТП на основе онтологии предметной области ОБДД, системного анализа статистических данных Госавтоинспекции [8] за 2019 и 2020 г., а также разработке моделей прогноза показателей ДТП с помощью регрессионного анализа.

Онтология предметной области обеспечения безопасности дорожного движения

Система автодорожного движения крайне сложна и чрезвычайно опасна для здоровья человека. К

элементам системы относятся автодороги, транспортные средства (ТС), участники дорожного движения, а также их социальная, физическая и экономическая среда [6]. Актуальность применения системного подхода к анализу ДТП способствует рассмотрению организации безопасности дорожного движения (БДД) как системы, которая состоит из совокупности корреляционных элементов, обеспечивающих достижение цели при имеющихся ресурсах и связях с внешней средой [7]. Такой подход позволяет диагностировать причины ДТП, установить их взаимосвязи и взаимовлияние с предлагаемыми решениями по ОБДД, ранжировать методы ОБДД, выявить влияние внешней среды на БДД.

Онтология представляет собой формализованное описание знаний, которое в дальнейшем может быть обработано компьютером. Онтологии используются для категоризации, структуризации и интеграции знаний, поиска информации, в научных исследованиях, в системном анализе предметной области, в системах обучения, для создания баз знаний и т. п. [9, 10].

Для описания онтологии предметной области ОБДД в виде концептуальной карты (семантической сети) использована независимая платформа Star Tools [10]. Сама разработка онтологии предполагает системный анализ связей (отношений) между отдельными понятиями (концептами) предметной области [9, 10], выделение концептов, которые могут быть использованы для решения задач ОБДД.

В разработанной онтологии (рис. 1) используются следующие виды связи:

- атрибутивная связь «характеризуется», т. е. иметь значение или свойство [11];
- каузативная связь «влияет» – устанавливает соответствие между причиной и следствием;
- связь «включает» – означает принадлежность элемента классу;
- функциональная связь, которая задана глаго-

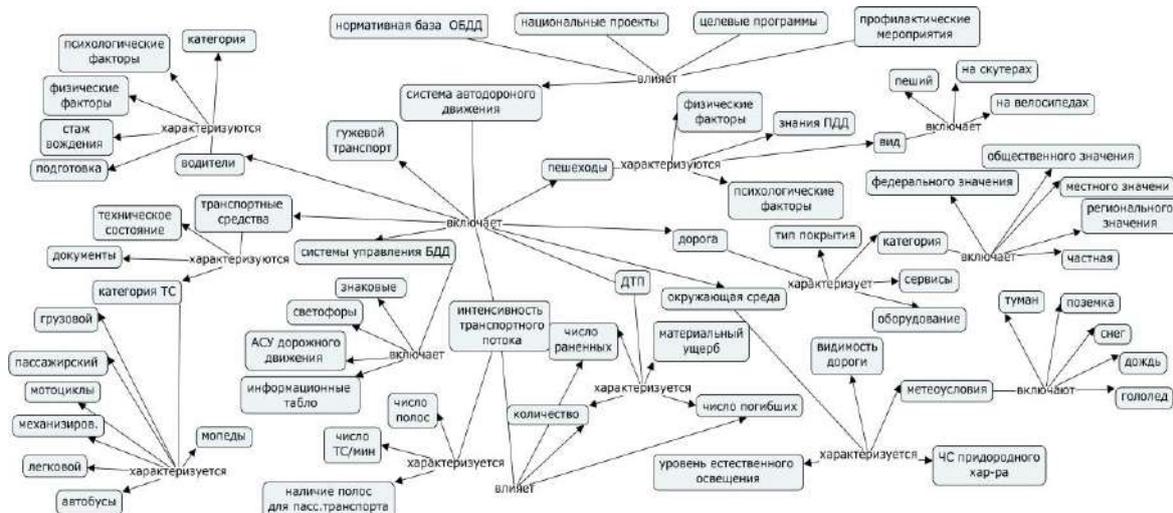


Рис. 1. Онтология предметной области организации безопасного дорожного движения

Fig. 1. Ontology of the subject area of the organization of safe road traffic

лом действия «формируют».

На численность и последствия ДТП влияют также водители, пешеходы, дорога, окружающая среда, национальные проекты, целевые программы, нормативные документы и профилактические мероприятия. К автоматизированной системе управления (АСУ) дорожным движением относятся радары и различные интернет-сервисы: маршрутизаторы, «Яндекс-пробки», навигационные системы. Так в [12] для ОБДД и повышения безопасности перевозок пассажиров предлагается внедрять на автопредприятия навигационную систему M2M-CityBus, которая будет следить за соблюдением водителем ТС скоростных режимов, визуализировать и отслеживать на мнемосхеме маршрут движения, контролировать время вождения, выполнение интервалов движения и его графика, позволять оперативно реагировать на ДТП.

Следует отметить невысокое качество автодорог в России, которое служит причиной почти каждого пятого ДТП [13]. Так, в 2019 г. в рейтинге оценки качества автодорог, составленном World Economic Forum (Всемирный экономический форум) Россия занимает 99-е место из 141 рассмотренных стран с показателем 3,5 points [14].

Корреляционный анализ факторов, влияющих на ДТП, выявил, что самое большое влияние на реализацию ДТП оказывает интенсивность автодорожного движения (коэффициент корреляции $r = -0,69$) [15].

Регрессионные модели показателей дорожно-транспортных происшествий в 2020 г.

Статистические данные [8] за 2015–2020 гг. обрабатывались в среде Statgraphics Plus. Вид модели регрессии определялся по максимальному значению коэффициента детерминации (R^2 , %), который указывает, какой процент данных статистики аппроксимируется найденной моделью. Оценка тесноты связи между зависимой и независимой переменными выполнялась по скорректированному коэффициенту детерминации (R^2_c , %). Для оценки точности модели использовали среднеквадратическую σ и абсолютную Δ ошибки. По критерию Дарбина – Уотсона (DW) устанавливали отсутствие автокорреляции в данных. За базовый был принят 2015 г.

Далее представлена динамика общей численности ДТП (d , тыс.) на автодорогах в рассматриваемом периоде времени (рис. 2), описываемая моделью регрессии (1):

$$d = 180,7 - 4,3(g - 2015) - 4 \cdot 10^{-9}(g - 2015)^{14}, \quad (1)$$

где g – номер текущего года.

Точки (см. рис. 1) – наблюдаемые данные, линия – уравнение регрессии. Критерии адекватности регрессии (1) указаны (табл. 1).

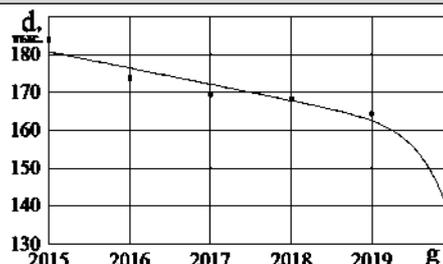


Рис. 2. Динамика общей численности дорожно-транспортных происшествий за 2015–2019 гг.

Fig. 2. Dynamics of the total number of road traffic accidents for 2015–2019

Видно, что численность ДТП уменьшается, но все еще остается достаточно большой (рис. 2).

Тенденция резкого снижения численности ДТП зафиксирована при обработке статистических данных уже за 9 мес. 2020 г. [16].

Динамика смертности в ДТП (d_c , тыс.) описывается регрессией (2) и дана на (рис. 3):

$$d_c = 22,9 - 2,4(g - 2014)^{0,8} + 0,2(g - 2014)^{1,3}. \quad (2)$$



Рис. 3. Динамика смертности в дорожно-транспортных происшествиях за 2015–2019 гг.

Fig. 3. Dynamics of mortality in road traffic accidents for 2015–2019

Значения критериев адекватности модели (2) достаточно высоки (табл. 1). Из (рис. 3) видно, что численность смертности в ДТП неуклонно уменьшается.

Суммарное количество травмированных (погибших и раненых) (S , тыс. чел.) в ДТП (рис. 4) аппроксимировано моделью (3):

$$S = 250,2 - 5,9(g - 2015) - 6 \cdot 10^{-9}(g - 2015)^{14}. \quad (3)$$

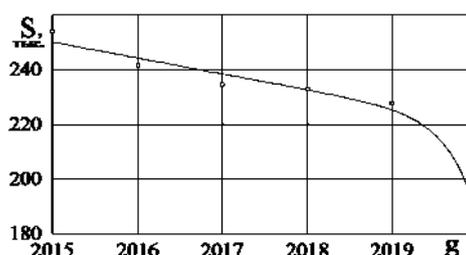


Рис. 4. Динамика травмированных в дорожно-транспортных происшествиях за 2015–2019 гг.

Fig. 4. Dynamics of the injured in road traffic accidents for 2015–2019

О достоверности модели (3) можно судить по значениям критериев (табл. 1).

Из (рис. 4) видно существенное уменьшение числа травмированных в 2020 г.

На (рис. 5) представлена динамика травмированных подростков в возрасте до 16 лет (S_{16} , тыс. чел.), аппроксимированная полиномиальной моделью (4):

$$S_{16} = 21,37 + 0,3(g - 2015) - 3 \cdot 10^{-9}(g - 2015)^{13}. \quad (4)$$

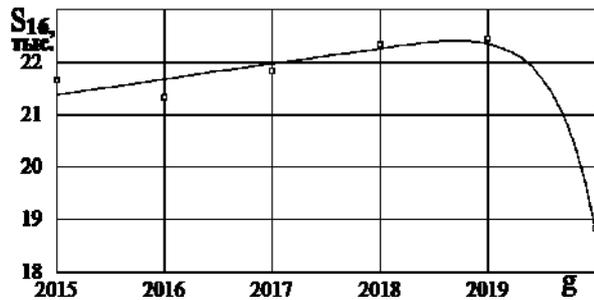


Рис. 5. Динамика травмированных подростков в возрасте до 16 лет за 2015–2019 гг.

Fig. 5. Dynamics of traumatized adolescents under the age of 16 for 2015–2019

Наибольшей величина S_{16} (22 449) была в 2019 г. (см. рис. 5). В 2020 г. она резко уменьшилась, но остается еще существенно высокой. Об адекватности модели (4) можно судить по значениям критериев (табл. 1).

Динамика численности травмированных подростков в возрасте до 18 лет S_{18} аппроксимирована полиномиальной моделью (5) (рис. 6):

$$S_{16} = 21,37 + 0,3(g - 2015) - 3 \cdot 10^{-9}(g - 2015)^{13}. \quad (5)$$

О достоверности модели можно судить по критериям (табл. 1).

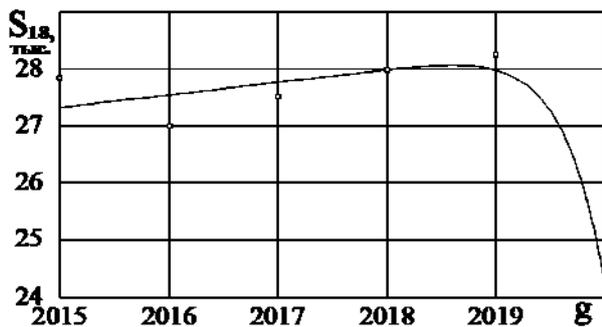


Рис. 6. Динамика травмированных подростков в возрасте до 18 лет за 2015–2019 гг.

Fig. 6. Dynamics of traumatized adolescents under the age of 18 for 2015–2019

Таблица 1. Критерии адекватности регрессионных моделей

Table 1. Criteria of the adequacy of regression models

Номер модели	$R^2, \%$	$R^2_c, \%$	DW	σ	Δ
1	2	3	4	5	6
(1)	97,89	96,48	1,77	3 118,06	1 830,47
1	2	3	4	5	6
(2)	98,82	98,03	2,00	376,0	245,51
(3)	98,13	96,89	1,70	4 011,13	2 360,61
(4)	97,37	95,62	2,15	278,88	156,18
(5)	96,43	94,05	2,98	23,86	14,79

Видно, что критерии $R^2, \%$ и $R^2_c, \%$ высоки, что позволяет их использовать для прогноза рассмотренных показателей ДТП (см. табл. 1).

Сравнительный анализ показателей травматизма и причин дорожно-транспортных происшествий

Статистический анализ данных [8] выполнялся с использованием MS Excel. За 2020 г. произошло 144 139 ДТП, аналогичный показатель прошлого года (АППГ) –12,3 %. Погибло в результате ДТП 16 023 чел. (АППГ= – 5,64 %), ранено 181 797 чел. (АППГ= – 13,79 %) (табл. 2), (рис. 7).

Таблица 2. Численность дорожно-транспортных происшествий, погибших и раненых по категориям пострадавших в 2019–2020 гг.

Table 2. The number of road traffic accidents, deaths and injuries by categories of victims in 2019–2020

Категория	Число дорожно-транспортных происшествий		Количество погибших		Количество раненых	
	2019	2020	2019	2020	2019	2020
Водители	74913	69803	6990	7012	77114	70831
Велосипедисты	5 369	5 678	366	364	5036	5 333
Пассажиры	60640	52026	4606	4133	77114	67992
Пешеходы	48734	39724	3998	4432	33330	36979
Другие лица	539	479	72	75	428	470

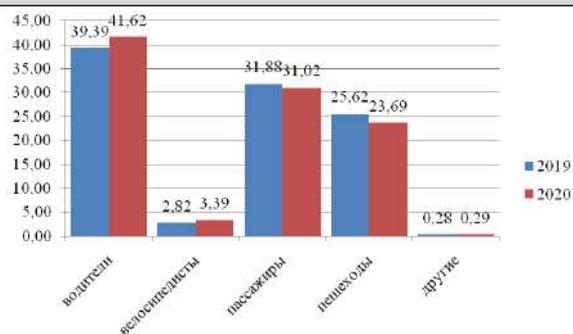


Рис. 7. Гистограмма численности дорожно-транспортных происшествий по категориям пострадавших за 2019–2020 гг.

Fig. 7. Histogram of the number of road traffic accidents by categories of victims for 2019–2020

Видно, что в 2020 г. в 41,62 % ДТП погибли водители, в 31,02 % ДТП – пассажиры, в 23,67 % ДТП – пешеходы (см. рис. 7).

На (рис. 8) показано распределение ДТП по дням недели.

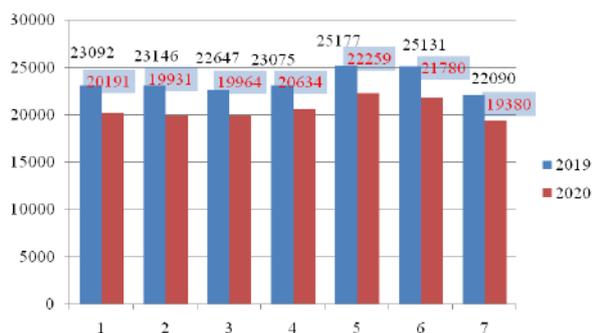


Рис. 8. Распределение дорожно-транспортных происшествий по дням недели в 2019–2020 гг.

Fig. 8. Distribution of road traffic accidents by days of the week in 2019–2020

Видно, что в 2019 и 2020 г. на пятницу и субботу приходится наибольшее количество ДТП.

На (рис. 9) показано распределение ДТП по времени суток.

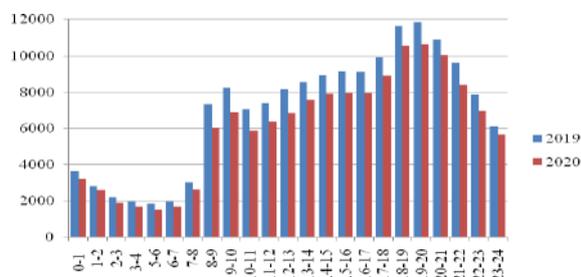


Рис. 9. Распределение дорожно-транспортных происшествий по времени суток в 2019–2020 гг.

Fig. 9. Distribution of road traffic accidents by time of day in 2019–2020

Видно, что максимальное количество ДТП (14,95 %) совершается с 18 до 20 ч. В темное время суток совершается 35 % ДТП, что свидетельствует о недостаточной освещенности автомобильных дорог.

На (рис. 10) представлена численность ДТП, причиной которых стало нарушение правил дорожного движения (ПДД) водителями.

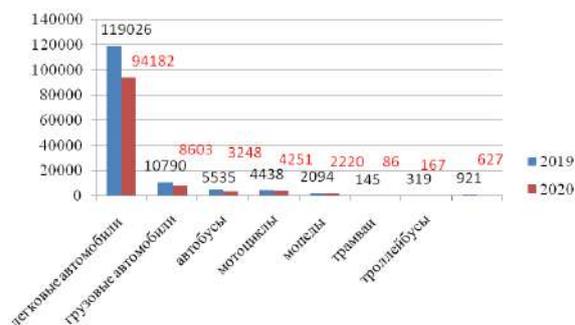


Рис. 10. Число дорожно-транспортных происшествий по причине нарушения правил дорожного движения водителями в 2019–2020 гг.

Fig. 10. The number of road traffic accidents due to violations of traffic rules by drivers in 2019–2020.

В (табл. 3) приведены сведения о водителях, которые в момент нарушения ПДД и реализации ДТП находились в состоянии алкогольного опьянения.

Таблица 3. Количество водителей, находящихся на момент дорожно-транспортного происшествия в состоянии алкогольного опьянения в 2019–2020 гг.

Table 3. The number of drivers who were intoxicated at the time of the road traffic accident in 2019–2020

Категория транспортного средства	Число дорожно-транспортных происшествий		Количество погибших		Количество раненых	
	2019	2020	2019	2020	2019	2020
Легковой автомобиль	10439	12040	3456	3029	17158	15514
Грузовой автомобиль	348	423	138	88	543	447
Автобус	41	61	6	5	120	73
Мотоцикл	1 059	1 140	242	269	1 208	1 082
Трамвай	0	1	0	0	1	0
Троллейбус	1	0	0	0	0	1
Трактор	79	125	183	36	103	76

В 2020 г. процент пьяных водителей составил: на легковых автомобилях 11,08 % (АППГ = 9,57 %), на грузовых 4,05 % (АППГ = 3,03 %), на автобусах 1,26 % (АППГ = 14,54 %), на мотоциклах 24,91 % (АППГ = – 3,02 %), на тракторах 12,6 % (АППГ = – 7,15 %). В результате несознательности водителей погибло 3 427 чел., ранено 17 191 чел.

Зависимость численности ДТП от возраста водителей представлена на (рис. 11).

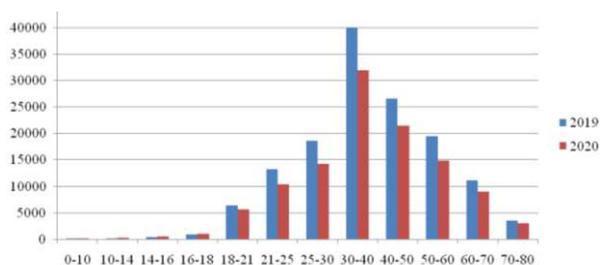


Рис. 11. Зависимость численности дорожно-транспортных происшествий от возраста водителей в 2019–2020 гг.

Fig. 11. Dependence of the number of road traffic accidents on the age of drivers in 2019–2020 гг.

По мнению автора [16], численность ДТП выше у водителей с малым стажем. Статистические данные (см. рис. 11) говорят об обратном: максимальное число ДТП приходится на возрастную группу 30–40 лет, что согласуется также с выводом работы [17].

На (рис. 12) показана зависимость численности ДТП от стажа управления ТС.

Резкое увеличение численности ДТП с ростом стажа более 15 лет можно объяснить возрастанием уверенности водителей в своем профессионализме.

Из-за нарушения ПДД водителями в 2020 г. произошло 88,51 % ДТП (АППГ = – 0,008 %). Поэтому при разработке профилактических мер по понижению ДТП, тяжести их последствий центральное внимание следует обращать на переподготовку (подготовку) водителей ТС и на контроль за выполнением ими ПДД.



Рис. 12. Зависимость численности дорожно-транспортных происшествий от стажа управления транспортным средством в 2019–2020 гг.

Fig. 12. Dependence of the number of road traffic accidents on the driving experience in 2019–2020

Распределение численности ДТП, произошедших из-за нарушения ПДД водителя, по дням недели показано на (рис. 13).

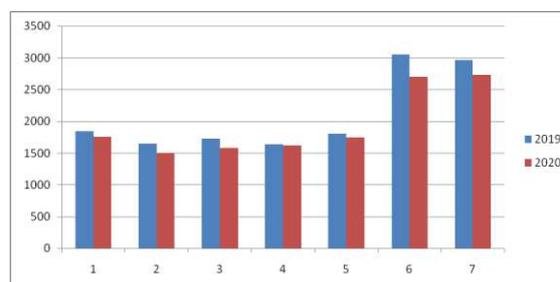


Рис. 13. Распределение численности дорожно-транспортных происшествий из-за нарушения правил дорожного движения водителями по дням недели в 2019–2020 гг.

Fig. 13. Distribution of the number of road traffic accidents due to traffic violations by drivers by day of the week in 2019–2020

Видно, чаще всего водители нарушают ПДД в субботу и воскресенье, возможно, из-за водителей, которые пользуются личным ТС преимущественно по выходным дням.

С места возникновения ДТП в 8,67 % случаях ТС скрывалось, в 1,84 % случаев скрывался только водитель ТС.

На (рис. 14) представлено распределение обстоятельств ДТП с пострадавшими пешеходами по различным причинам. Видно, что наезд ТС на пешеходов чаще происходит по вине водителей и на нерегулируемых пешеходных переходах. Преимущественно наезд ТС происходит в первой (73,60 %) и во второй (21,22 %) полосах движения. Реже страдают пешеходы по выходным дням. В городах и населенных пунктах ДТП преимущественно происходит на дорогах федерального и регионального значения.

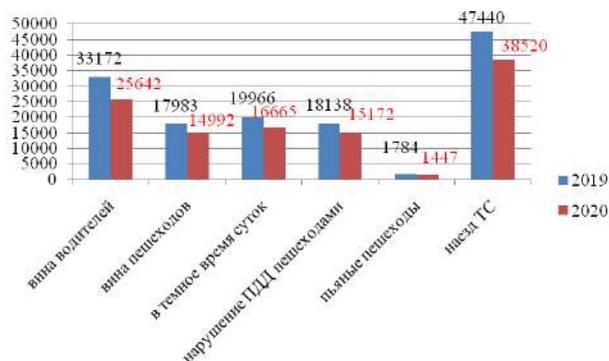


Рис. 14. Распределение причин реализации дорожно-транспортных происшествий с пострадавшими пешеходами в 2019–2020 гг.

Fig. 14. Distribution of reasons for the implementation of road accidents with injured pedestrians in 2019–2020

На (рис. 15) представлена гистограмма ДТП с участием подростков до 16 лет по обстоятельствам их реализации.

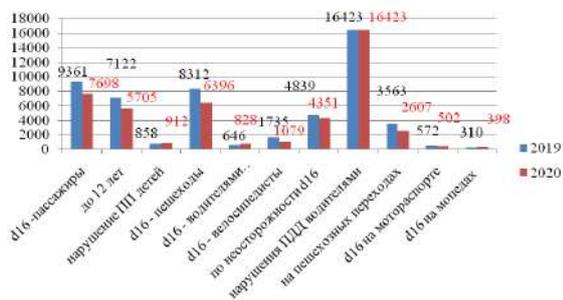


Рис. 15. Гистограмма дорожно-транспортных происшествий с участием подростков до 16 лет по обстоятельствам их реализации в 2019–2020 гг.

Fig. 15. Histogram of road accidents involving adolescents under 16 years of age according to the circumstances of their implementation in 2019–2020

Видно, что в основном ДТП с участием d_{16} происходит с детьми-пассажирами (46,48 %), причем 74,11 % детей имеют возраст не старше 12 лет. При перевозке детей-пассажиров (без удерживающих устройств и ремней безопасности) возникает 11,85 % ДТП.

С пешеходами до 16 лет возникает 38,6 % ДТП, из них 40,76 % ДТП реализуется на пешеходном переходе: с велосипедистами (66,09 %), с водителями механических ТС (5 %).

По собственной неосторожности детей до 16 лет происходит 26,27 % ДТП, из них 58,54 % с пешеходами, 24,8 % с велосипедистами, 13,4 % с водителями механических ТС.

Подверженность детей-пешеходов к ДТП обусловлена их незнанием ПДД, дорожных знаков и разметок дорог. Они не способны адекватно оценить дорожную обстановку. Некоторые подростки не подчиняются сигналам светофора, играют на проезжей части, переходят дорогу в ненадлежащем месте [19, 20].

Вследствие нарушения водителями ПДД происходит 79,03 % ДТП с d_{16} , 81,21 % с участием d_{18} .

Распределение ДТП по видам представлено на (рис. 16).

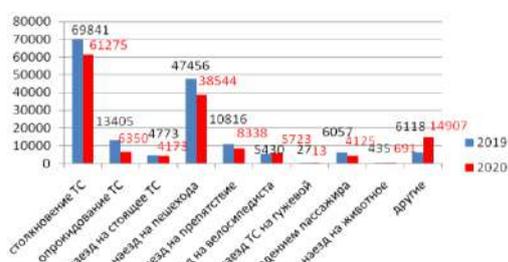


Рис. 16. Распределение дорожно-транспортных происшествий по видам в 2019–2020 гг.

Fig. 16. Distribution of road traffic accidents by type in 2019–2020

Градация причин ДТП (%) от численности ДТП в 2020 г.:

– столкновение ТС (42,51 %) (следует отметить, что по этой причине наибольшее число погибших и раненых в ДТП);

– наезд ТС на пешехода (26,74 %);

– наезд ТС на препятствие (5,78 %);

– опрокидывание ТС (4,41 %);

– наезд ТС на велосипедистов (3,97 %);

– наезд на стоящее ТС (2,90 %);

– с падением пассажиров (2,86 %);

– наезд ТС на животное (0,48 %);

– наезд ТС на гужевой транспорт (0,01 %);

– другие (10,34 %).

Представленная градация причин полностью согласуется с данными работы [17]. Две первые причины согласуются с данными работы [18].

Из-за нарушения обязательных требований, которые предъявляются к эксплуатации дорог, происходит 34,63 % от всех ДТП. Численность ДТП из-за неудовлетворительных дорожных условий (НДУ) представлена на (рис. 17).

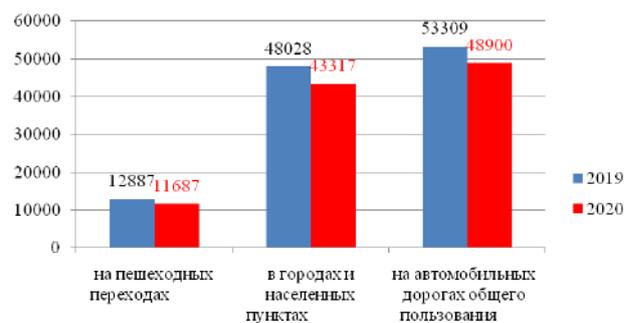


Рис. 17. Численность дорожно-транспортных происшествий из-за неудовлетворительных дорожных условий в 2019–2020 гг.

Fig. 17. Number of road traffic accidents due to unsatisfactory road conditions in 2019–2020

НДУ стали причиной 86,78 % ДТП в населенных пунктах и городах, а НДУ на пешеходных переходах послужили причиной 23,41 % ДТП. На автодорогах общего пользования из-за НДУ возникло 33,93 % ДТП.

На (рис. 18) приведено распределение численности ДТП по поселениям: 1 – города федерального значения; 2 – столицы субъектов РФ; 3 – городские округа; 4 – центры муниципальных районов; 5 – городские поселения; 6 – центры сельских поселений; 7 – села.

В столицах субъектов РФ произошло 39,25 % ДТП и наибольшее число раненых 48 632 чел., в городских округах – 15,67 % ДТП, в городах федерального значения – 11,89 %, в других городских поселениях – 4,63 %, в административных центрах сел – 3,35 %, в других сельских поселениях – 14,25 % и наибольшее число погибших 2 121 чел.

Таблица 4. Показатели дорожно-транспортных происшествий для транспорта общего пользования
Table 4. Rates of road traffic accidents for public transport

Вид транспортного средства	Число дорожно-транспортных происшествий	Аналогичный показатель прошлого года, %	Количество погибших	Аналогичный показатель прошлого года, %	Количество раненых	Аналогичный показатель прошлого года, %
Автобус	4688	-24,78	270	-11,0	6866	-26,33
Автобус по заказу	45	-4,17	4	-18,2	84	-9,29
Пригородный автобус	482	-23,79	75	62,61	804	-31,61
Пригородный автобус (заказ)	30	5,26	7	-18,2	68	-13,02
Междугородный регулярный рейс	261	-33,05	57	-2,17	660	-19,11
Троллейбус	520	-36,38	18	4,47	611	-38,41
Трамвай	341	-36,43	20	-3,18	377	-41,8

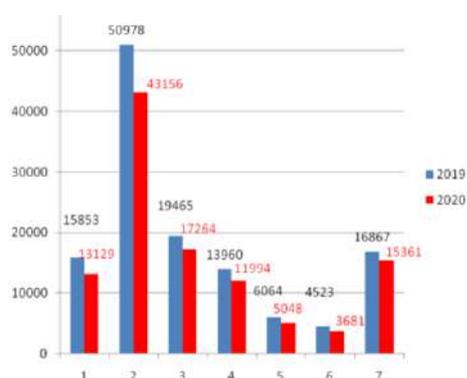


Рис. 18. Распределение численности дорожно-транспортных происшествий по различным видам поселений в 2019–2020 гг.

Fig. 18. Distribution of the number of road traffic accidents by different types of settlements in 2019–2020

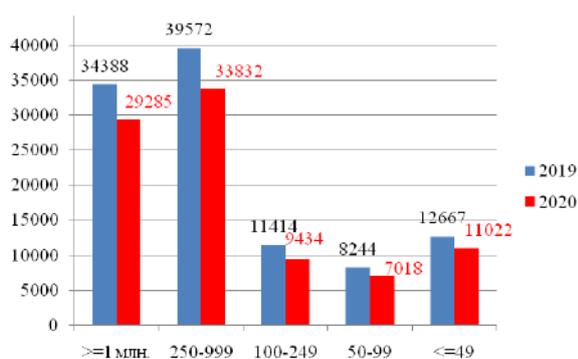


Рис. 19. Зависимость численности дорожно-транспортных происшествий от количества жителей городов в 2019–2020 гг.

Fig. 19. Dependence of the number of road traffic accidents on the number of urban residents in 2019–2020

На (рис. 19) представлена зависимость численности ДТП от количества жителей городов.

Чаще всего из транспорта общего пользования в ДТП попадают автобусы. Там же отмечается наибольшее количество раненых и погибших пассажиров, водителей и других участников движения. Среди электрического транспорта ДТП чаще происходят с троллейбусами, чем с трамваями. В 2020 г. существенно возросло число погибших в результате ДТП в пригородных автобусах (АППГ = 62,61) (табл. 4).

Заключение

Уровень подросткового травматизма – острая проблема для России, так как число ДТП с участием детей в возрасте до 14 лет, которое приходится на 10 тыс. ед. ТС, превышает аналогичный показатель Италии в 30 раз, Германии и Франции – в 20 раз, Великобритании – 10 раз [22].

Полученные уравнения регрессии для ДТП с участием подростков характеризуются высокими показателями достоверности и могут быть использованы для прогноза показателей.

Наблюдаемое резкое снижение всех показателей ДТП в 2020 г., по-видимому, связано со значительными ограничениями в перемещении участников движения из-за пандемии, а также понижением интенсивности автотранспортных потоков.

Список литературы

1. Гусельников Ю.А. Проблемы контроля обеспечения безопасности дорожного движения в субъектах транспортной деятельности // Вестник Курганского государственного университета. 2015. № 3. С. 70–82.
2. Гусельников Ю.А., Борщенко Я.А. Решение проблем организационно-нормативного обеспечения безопасности дорожного движения // Известия Тульского государственного университета. 2015. Вып. 6. Ч. 1. С. 3–11.

3. О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2019 г. : государственный доклад. М. : МЧС России; ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2020. 259 с.
4. О состоянии защиты населения и территорий РФ от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2018 году : государственный доклад. М.: МЧС России. ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2019. 344 с.
5. Причины детского травматизма [Электронный ресурс]. URL: https://dshiharp.yam.muzkult.ru/media/2018/09/24/1220310094/detskiy_trvmatizm.pdf (дата обращения 13.01.2021).
6. Фаттахов Т.А. Дорожно-транспортный травматизм в России и его факторы // Социальные аспекты здоровья населения: электрон. науч. журнал. 2015. С. 1–18. URL: <http://vestnik.mednet.ru/content/view/695/30/>.
7. Карева В.В., Карева Д.А. Системный подход к проведению профилактической работы по снижению детского дорожно-транспортного травматизма // Автомобильный транспорт Дальнего востока. 2018. № 1. С. 143–148.
8. Сведения о показателях состояния безопасности дорожного движения: сайт Госавтоинспекции. URL: <http://stat.gibdd.ru/> (дата обращения 21.12.2020).
9. Лапшин В.А. Онтология в компьютерных системах. М.: Изд-во: Научный мир, 2010. 224 с.
10. Муромцев Д.И. Концептуальное моделирование знаний в системе Concept Map. СПб: СПб ГУ ИТМО, 2009. 83 с.
11. Микони С.В. Формализованный подход к установлению связи и роли понятий // Труды XXI Международной объединенной конференции «Интернет и современное общество, IMS-2018. СПб. 30.05-2.06.2018: Сборник научных статей. СПб.: Университет ИТМО, 2018. С. 77–86.
12. Попова И.М., Данилов И.К., Попова Е.А. Навигационные системы как средство повышения безопасности перевозок на пассажирских автопредприятиях // Вестник ХНАДУ. 2013. Вып. 61-62. С. 284–288.
13. Веселов В.Н. Влияние технического уровня и эксплуатационного состояния автомобильных дорог на уровень аварийности // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2012. № 1. С. 22–26.
14. Качество дорог – Классация стран [Электронный ресурс]. URL: https://ru.theglobaleconomy.com/rankings/roads_quality/#Russia (дата обращения 22.02.2021).
15. Катасонов М.В., Лескин А.И., Кочетков А.В., Сыроежкина М.А., Щеголева Н.В., Задворнов В.Ю. Математическая модель прогнозирования аварийности дорожного движения на сети автомобильных дорог и в местах концентрации дорожно-транспортных происшествий // Интернет-журнал «Науковедение». 2017. Т. 9. № 1. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/33TVN117.pdf> (дата обращения 20.01.2021).
16. Асламова В.С., Минко А.А., Асламов А.А. Регрессионные модели травматизма на автомобильных дорогах России // Образование – Наука – Производство: матер. IV Всероссийской науч.-практ. конф., 24 декабря 2020 г. Чита : ЗаБИЖТ, ИрГУПС, 2020. Т. 2. С. 109–113.
17. Рябоконеко К.Р. Анализ зависимости возраста и стажа водителя на безопасное управление автомобилем // Логистика — евразийский мост: материалы 10-й междунар. научн.-практ. конф. Красноярск, 2015. С. 537–541.
18. Короткий А.А., Бахтеев О.А. Дорожно-транспортные происшествия: основные причины, анализ аварийности, методы снижения // Безопасность техногенных и природных систем. 2019. Т. 2. С. 50–55.
19. Григоров П.П., Шкрабак Р.В. Характеристика транспортных происшествий на дорогах страны в 2015 году и пути их профилактики // Техносферная безопасность. 2017. № 3 (39). С. 79–85.
20. Колесников Р.В. Состояние, особенности и основные показатели дорожно-транспортных преступлений, совершаемых несовершеннолетними // Вестник Воронежского института МВД России. 2019. № 1. С. 151–158.
21. Причины детского травматизма [Электронный ресурс]. URL: https://dshiharp.yam.muzkult.ru/media/2018/09/24/1220310094/detskiy_trvmatizm.pdf (дата обращения 13.01.2021).

References

1. Gusel'nikov Yu.A. Problemy kontrolya obespecheniya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya v sub"ektakh transportnoi deyatel'nosti [Solving the problems of organizational and regulatory road safety] Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta [The bulletin of Kurgan State University], 2015. No 3. Pp. 70–82.
2. Gusel'nikov Yu.A., Borshchenko Ya.A. Reshenie problem organizatsionno-normativnogo obes-pecheniya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya [Solving the problems of organizational and regulatory road safety]. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta [The bulletin of Tula State University]. 2015. Vol. 6. Part. 1. Pp. 3–11.
3. O sostoyanii zashchity naseleniya i territorii Rossiiskoi Federatsii ot chrezvychainykh situatsii prirodnogo i tekhnogen-nogo charaktera v 2019 g.: gosudarstvennyi doklad [On the state of protection of the population and territories of the Russian Federation from natural and man-made emergencies in 2019: a state report]. Moscow: EMERCOM of Russia; FGBU VNIIGOCHS (FC) Publ., 2020. 259 p.
4. O sostoyanii zashchity naseleniya i territorii Rossiiskoi Federatsii ot chrezvychainykh situatsii prirodnogo i tekhnogen-nogo Charaktera v 2018 g.: gosudarstvennyi doklad [On the state of protection of the population and territories of the Russian Federation from natural and man-made emergencies in 2018: a state report.]. Moscow: EMERCOM of Russia; FGBU VNIIGOCHS (FTs) Publ., 2020. 342 p.
5. Prichiny detskogo travmatizma [Reasons for child injuries] [Electronic media]. URL: https://dshiharp.yam.muzkult.ru/media/2018/09/24/1220310094/detskiy_trvmatizm.pdf (Accessed: January 13, 2021).
6. Fattakhov T.A. Dorozhno-transportnyi travmatizm v Rossii i ego faktory [Road traffic injuries in Russia and its factors]. Social'nye aspekty zdorov'ya naseleniya: elektron. nauchn. zhurnal [Social aspects of population health: an electron. sci. journal], 2015. Pp. 1–18 [Electronic media]. URL: <http://vestnik.mednet.ru/content/view/695/30/>.

7. Kareva V.V., Kareva D.A. Sistemy podkhod k provedeniyu profilakticheskoi raboty po snizheniyu detskogo dorozhno-transportnogo travmatizma [A systematic approach to preventive work to reduce child road traffic injuries]. *Avtomobil'nyi transport Dal'nego vostoka* [Automobile transport of the Far East], 2018. No. 1. Pp. 143–148.
8. Svedeniya o pokazatelyakh sostoyaniya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya: sait Gosavtoinspektsii [Information about the indicators of the road safety state: the web site of the State traffic inspectorate] [Electronic media]. URL: <http://stat.gibdd.ru/> (Accessed: December 21, 2020).
9. Lapshin V.A. Ontologiya v komp'yuternykh sistemakh [Ontology in computer systems]. Moscow: Nauchnyi mir Publ., 2010. 224 p.
10. Muromtsev D.I. Konceptual'noe modelirovanie znaniy v sisteme Concept Map [Conceptual modeling of knowledge in the Concept Map system]. St. Petersburg: SPb GU ITMO Publ., 2009. 83 p.
11. Mikoni S.V. Formalizovannyi podkhod k ustanovleniyu svyazi i roli ponyatii [A formalized approach to linking and the role of concepts]. *Trudy XXI Mezhdunarodnoi ob"edinennoi konferentsii «Internet i sovremennoe obshchestvo, IMS-2018. SPb. 30.05-2.06.2018: Sbornik nauchnykh statei* [Proceedings of the XXI International Joint Conference “Internet and Contemporary Society, IMS-2018. SPb. 30.05-2.06.2018: a collection of scientific articles]. St.Petersburg: The ITMO University Publ., 2018. Pp. 77–86.
12. Popova I.M., Danilov I.K., Popova E.A. Navigatsionnye sistemy kak sredstvo povysheniya bezopasnosti perevozok na passazhirskikh avtopredpriyatiyakh [Navigation systems as a means of increasing the safety of transportation in passenger car companies]. *Vestnik KhNADU* [KhNADU Bulletin]. 2013. Vol. 61-62. Pp. 284–288.
13. Veselov V.N. Vliyaniye tekhnicheskogo urovnya i ekspluatatsionnogo sostoyaniya avtomobil'nykh dorog na uroven' avariinosti [Influence of the technical level and operational condition of highways on the accident rate]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [The bulletin of Astrakhan State Technical University], 2012. No. 1. Pp. 22–26.
14. Kachestvo dorog – Klassatsiya stran [Quality of roads – Classifying of countries]. [Electronic media]. URL: https://ru.theglobaleconomy.com/rankings/roads_quality/#Russia (Accessed: February 22, 2021).
15. Katasonov M.V., Leskin A.I., Kochetkov A.V., Syrozhekina M.A., Shchegoleva N.V., Zadvornov V.Yu. Matematicheskaya model' prognozirovaniya avariinosti dorozhnogo dvizheniya na seti avtomobil'nykh dorog i v mestakh kontsentratsii dorozhno-transportnykh proisshestvii [Mathematical model of predicting traffic accidents on the road network and in places of concentration of road traffic accidents] *Internet-zhurnal «Naukovedenie»* [Internet magazine “Science Studies”], 2017. Vol. 9. No. 1 [Electronic media]. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/33TVN117.pdf> (Accessed: January 20, 2021).
16. Aslamova V.S., Minko A.A., Aslamov A.A. Regressionnye modeli travmatizma na avtomobil'nykh dorogakh Rossii [Regression models of injuries on the roads of Russia]. *Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo: mater. IV Vserossiiskoi nauch.-prakt. konf., 24 dekabrya 2020 g.* [Education – Science – Manufacturing: mater. of IV All-Russian scientific and practical conf., December 24, 2020]. Chita: ZabiZhT, IrGUPS Publ., 2020. Vol. 2. Pp. 109–113.
17. Ryabokononko K.R. Analiz zavisimosti vozrasta i stazha voditelya na bezopasnoe upravlenie avtomobilem [Analysis of the dependence of the driver's age on the safe driving]. *Logistika — evraziiskii most: materialy 10-i mezhdunar. nauchn.-prakt. konf.* [Logistics is the Eurasian Bridge: materials of the 10th Intern. scientific and practical conf.]. Krasnoyarsk, 2015. Pp. 537–541.
18. Korotkii A.A., Bakhteev O.A. Dorozhno-transportnye proisshestviya: osnovnye prichiny, analiz avariinosti, metody snizheniya [Road traffic accidents: main causes, accident analysis, mitigation methods]. *Bezopasnost' tekhnogennykh i prirodnykh sistem* [Safety of technogenic and natural systems], 2019. Vol. 2. Pp. 50–55.
19. Grigorov P.P., Shkrabak R.V. Charakteristika transportnykh proisshestvii na dorogakh strany v 2015 godu i puti ih profilaktiki [Characteristics of traffic accidents on the roads of the country in 2015 and ways of their prevention]. *Tekhnosfernaya bezopasnost'*. [Technosphere safety], 2017. No. 3 (39). Pp. 79–85.
20. Kolesnikov R.V. Sostoyaniye, osobennosti i osnovnye pokazateli dorozhno-transportnykh prestuplenii, sovershaemykh nesovershennoletnimi [State, features and main indicators of road traffic crimes committed by minors]. *Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii*. [The bulletin of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia], 2019. No.1. Pp. 151–158.
21. Prichiny detskogo travmatizma [Reasons of child injury] [Electronic media]. URL: https://dshif.Charp.yam.muzkult.ru/media/2018/09/24/1220310094/detskiy_trvmatizm.pdf (Accessed: January 13, 2021).

Информация об авторах

Асламова Вера Сергеевна – д-р техн. наук, профессор, кафедра техносферной безопасности, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: aslamovav@yandex.ru

Минко Анна Андреевна – магистрант, Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: an-yaminko@mail.ru

Асламов Александр Анатольевич – канд. техн. наук, доцент, кафедра машин и аппаратов химических производств, Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, e-mail: aaa_mx@angtu.ru

Асламова Елизавета Александровна – ассистент, кафедра бизнес-информатики и моделирования процессов, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, e-mail: Liza.Ocean@mail.ru

Information about the authors

Vera S. Aslamova – Doctor of Engineering Science, Professor, The Subdepartment of Technosphere Safety, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: aslamovav@yandex.ru

Anna A. Minko – Master's student, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: anyminko@mail.ru

Aleksandr A. Aslamov – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, The Subdepartment of Machines and Devices of Chemical Production, Angarsk State Technical University, e-mail: aaa_mx@angtu.ru

Elizaveta A. Aslamova – assistant, the Subdepartment of Business Informatics and Modeling of Business Processes, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, e-mail: Liza.Ocean@mail.ru



МУХОПАД ЮРИЙ ФЁДОРОВИЧ

**Заслуженный деятель науки Российской Федерации,
заслуженный профессор ИрГУПС,
доктор технических наук**

Юрий Фёдорович родился 3 ноября 1934 г. в Сталинграде, в многодетной семье, из детей он – старший. Отец работал электромехаником на тракторном заводе, мама – швей. В июне 1942 г. вся семья была эвакуирована под бомбежкой из горящего Сталинграда в город Барнаул Алтайского края.

Юрий мечтал, как отец, стать радиотехником, поэтому в школе посещал кружок радиотехники, а в 5 классе сам собрал детекторный приёмник. Выбор профессии стал судьбоносным. После 10 класса молодой человек поступил в Томский госуниверситет на радио-физический факультет (закрытое спецотделение, где студентам читали секретные

лекции о радиолокации ракетной техники). В течение четырех лет учебы Юрий Федорович – стипендиат престижной именной стипендии им. А.С. Попова. Во время учёбы Юрий активно занимался спортом, имел первый разряд по лёгкой атлетике, второй разряд по горному туризму и третий разряд по штанге.

В 1957 г. Юрий Фёдорович был направлен в специализированное конструкторское бюро оборонно-космического назначения в г. Новосибирск. Через 3 года прошёл конкурс и был принят в научно-производственное объединение «Алтай», где работал в вычислительном центре.

В 1967 г. Юрий Фёдорович поступил в аспирантуру Ленинградского электротехнического института на кафедру «Вычислительная техника». В 1970 г. защитился и работал доцентом в Новосибирском электротехническом институте связи, а с 1967 по 1978 гг. – в научно-производственном объединении «Восток». Под его руководством было защищено 6 кандидатских диссертаций, выполнялись спецзаказы оборонных организаций.

В Новосибирске Юрий Фёдорович познакомился со своей женой Татьяной, у них родились двое детей. В то время вопрос с жильём решить было трудно, поэтому, когда в 1978 г. Юрия Фёдоровича пригласили возглавить кафедру вычислительной техники в Восточносибирском технологическом институте и сразу предоставили трёхкомнатную квартиру, семья переехала в г. Улан-Удэ. С 1978-1992 гг. Юрий Фёдорович возглавлял кафедры «Вычислительная техника», «Автоматизация технологических процессов и производств», «Вычислительные системы». К этому времени он опубликовал более 200 научных статей, издал несколько монографий, выпустил ещё трёх аспирантов. К 1998 г. Юрий Федорович самостоятельно подготовил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. В том же году диссертация на тему «Специализированные преобразователи информации» была успешно защищена в диссертационном совете Томского политехнического института.

Научная деятельность Ю.Ф. Мухопода связана с решением современных научно-технических проблем в области микроэлектроники, автоматизации, робототехники, транспорта и высшего образования.

В течение 1969-1981 гг. им была разработана теория структурного синтеза специализированных вычислительных машин и преобразователей информации для автоматизации технологических процессов. Разработки нашли применение на предприятиях электронной техники, авиационной и оборонной промышленности. Им разработана теория проектирования аналого-цифровых вычислительных преобразователей информации с микропрограммным управлением.

В Иркутском институте инженеров железнодорожного транспорта открывалась новая специальность, и в 1994 г. Юрий Фёдорович получил предложение возглавить кафедру «Автоматика, телемеханика и связь». Его семье предоставили квартиру, и они переехали в Иркутск. При непосредственном участии Ю.Ф. Мухопода в ИрГУПС открыто пять специальностей в области информационных технологий и технической кибернетики. Наряду с подготовкой кадров для железной дороги выполнялась большая научно-исследовательская работа по подготовке специалистов высшей квалификации.

За время работы в ИрГУПС Юрий Фёдорович подготовил 12 кандидатов технических наук, 10 докторов технических наук по трём научным направлениям. В ИрГУПС в 2001 г. создан диссертационный совет по защите кандидатских и докторских диссертаций, бессменным председателем которого являлся Юрий Фёдо-

рович. Кроме того, был редактором научного сборника статей «Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте», членом редакционных коллегий научных журналов «Фундаментальные исследования» (Москва), «Научные труды НГТУ» (Новосибирск), «Современные технологии. Системный анализ. Моделирование» (Иркутск), президентом Байкальского научного центра Академии инженерных наук Российской Федерации.

За высокие достижения в научно-исследовательской деятельности и подготовку высококвалифицированных специалистов Ю.Ф. Мухопад награждался грамотами министра образования, именными часами начальника ВСЖД, медалью «200 лет МВД». За успешную научную деятельность в развитии кибернетики Юрий Фёдорович награждён медалью академика Берга, за изобретательскую деятельность – медалью Альфреда Нобеля, а также золотой медалью «За исключительные достижения» Европейской ассоциацией предпринимателей и изобретателей.

В 2006 г. Юрию Фёдоровичу присвоено звание «Засуженный профессор ИрГУПС», в 2010 г. – «Заслуженный деятель науки Российской Федерации». Юрий Фёдорович являлся членом трех российских академий наук и двух зарубежных.

Юрий Фёдорович отличался необыкновенным трудолюбием. Он всё время занимался передовыми технологиями, опубликовал около 400 научных публикаций, из которых более 50 – изобретения СССР и 25 – патенты РФ, 29 учебников и монографий.

Честность, бескорыстность, искренняя вера в Бога – главные черты его характера. Всю жизнь Юрий Фёдорович трудился для могущества России. Ему удалось создать счастливую семью, воспитать замечательных детей и внуков.

Современные технологии
Системный анализ
Моделирование

№ 2 (70)
2 0 2 1

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Главный редактор **А.П. Хоменко**
Ответственный за выпуск **В.Е. Гозбенко**

Подписано в печать 07.07.2021. Формат 60x84/8.
Дата выхода в свет 25.07.2021
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 25.
Уч.-изд. л. 23,75. Тираж 500 экз. Заказ № 3555
Подписной индекс по каталогу «Роспечать»: 64556
ISSN: 1813-9108

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ РАН.

Сведения о журнале ежегодно
публикуются в международной справочной системе
по периодическим и продолжающимся изданиям
«Ulrich's Periodicals Directory»

ИД №06506 от 26.12.01

Маркировка информационной продукции - не маркируется

Цена свободная

Адрес редакции, издательства и типографии
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.
Иркутский государственный университет путей сообщения
Телефон: 8(3952) 38-76-72, E-mail: irgups-journal@yandex.ru

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельство ПИ № ФС77-66109 от 20 июня 2016 г.

Учредитель: ФГБОУ ВО Иркутский государственный университет путей сообщения
(664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15)