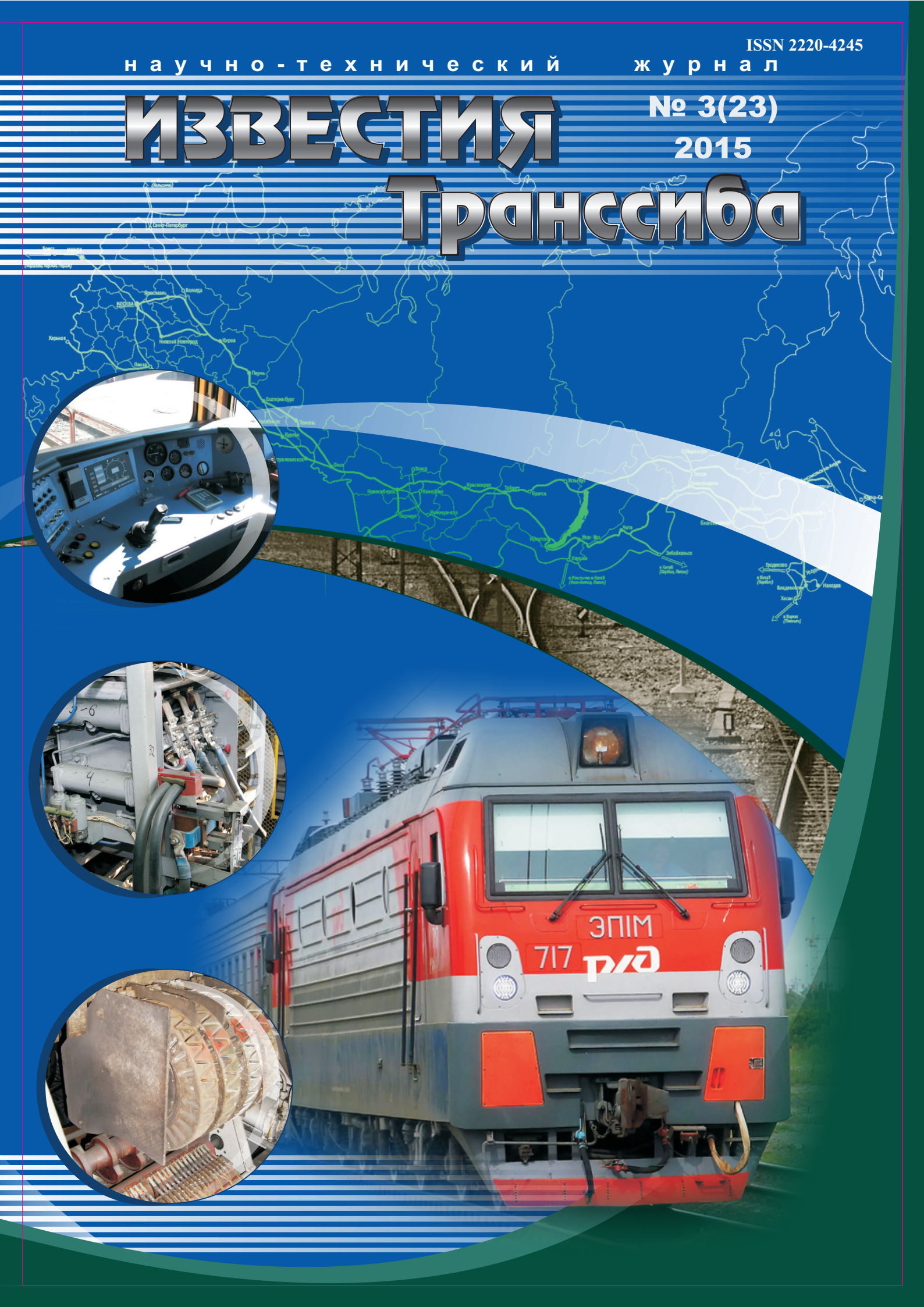
ISSN 2220-4245

научно-технический журнал

ИЗВЕСТИЯ Транссиба

№ 3(23)
2015



ИЗВЕСТИЯ Транссиба
научно-технический журнал
№ 3(23)
2015
Периодичность - 4 выпуска в год

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

1. Овчаренко Сергей Михайлович – главный редактор, ректор ОмГУПСа, д.т.н., доцент.
2. Галиев Ильхам Исламович – зам. главного редактора, президент ОмГУПСа, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ.
3. Шантаренко Сергей Георгиевич – зам. главного редактора, проректор по научной работе ОмГУПСа, д.т.н., доцент.
4. Черемисин Василий Титович – зам. главного редактора, директор НИИЭ ОмГУПСа, д.т.н., профессор.
5. Бокарев Сергей Александрович – проректор по научной работе СГУПСа, д.т.н., профессор (Новосибирск).
6. Глинка Тадеуш – доктор, профессор Силезского политехнического университета (Гливице, Польша).
7. Дёмин Юрий Васильевич – профессор кафедры «Электрооборудование и автоматика» СГУВТа, д.т.н., профессор (Новосибирск).
8. Камаев Валерий Анатольевич – зав. кафедрой «Системы автоматизированного проектирования» ВолгГТУ, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ (Волгоград).
9. Каргапольцев Сергей Константинович – проректор по научной работе ИрГУПСа, д.т.н., профессор (Иркутск).
10. Косарев Александр Борисович – зам. генерального директора ОАО «ВНИИЖТ», д.т.н., профессор (Москва).
11. Лю Цзянькунь – доктор, профессор Пекинского транспортного университета, Школа строительства (Пекин, Китай).
12. Сидоров Олег Алексеевич – зав. кафедрой «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПСа, д.т.н., профессор.
13. Солоненко Владимир Гельевич – профессор кафедры «Вагоны» КазАТК, д.т.н., профессор (Алматы, Республика Казахстан).
14. Файзибаев Шерзод Сабирович – проректор по научной работе ТашИИТа, д.т.н., профессор (Ташкент, Республика Узбекистан).
15. Харламов Виктор Васильевич – зав. кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПСа, д.т.н., профессор.

EDITORIAL BOARD

1. Ovcharenko Sergey Mikhailovich – chief editor, the rector of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
2. Galiev Ilkham Islamovich – deputy chief editor, the president of OSTU, D. Sc., professor, the honored worker of science and engineering of the Russian Federation (Omsk, Russia).
3. Shantarenko Sergey Georgievich – deputy chief editor, vice-rector for research of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
4. Cheremisin Vasily Titovich – deputy chief editor, director of SRIE OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
5. Bokaryov Sergey Alexandrovich – vice-rector for research of SSTU, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
6. Glinka Tadeusz – Ph. D., professor of Silesian University of Technology (Gliwice, Polish).
7. Demin Yury Vasilyevich – professor of the department «Electrical equipment and automation» of SSUWT, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
8. Kamaev Valery Anatolyevich – head of the department «Systems of automated designing» of VSTU, D. Sc., professor, the honored worker of science of the Russian Federation (Volgograd, Russia).
9. Kargapoltcev Sergey Konstantinovich – vice-rector for research of ISTU, D. Sc., professor (Irkutsk, Russia).
10. Kosarev Alexander Borisovich – deputy of general director of JSC «VNIIZhT» (Railway Research Institute), D. Sc., professor (Moscow, Russia).
11. Liu Jiankun – Ph. D., professor of Beijing Jiaotong University, School of Civil Engineering (Beijing, China).
12. Sidorov Oleg Alexeevich – head of the department «Power supply of rail transport» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
13. Solonenko Vladimir Gelyevich – professor of the department «Wagons» of KazATC, D. Sc., professor (Almaty, Kazakhstan).
14. Fayzibaev Sherzod Sabirovich – vice-rector for research of TashIRE, D. Sc., professor (Tashkent, Uzbekistan).
15. Kharlamov Viktor Vasilyevich – head of the department «Electrical machines and common electrotechnic» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).

Захаренко Елена Игоревна – ответственный секретарь (Омск).

СОДЕРЖАНИЕ

Подвижной состав железных дорог

Анисимов А. С., Носков В. О., Фоменко В. К. Расчет тепловыделения в систему охлаждения при работе тепловозного дизеля на холостом ходу 2
Бакланов А. А., Есин Н. В., Шиляков А. П. Использование новых электровозов для сокращения времени хода пассажирских поездов на Транссибирской магистрали 7
Елисеев С. В., Кинаш Н. Ж., Нгуен Д. Х. Особенности обратных связей при колебаниях систем с рычажными связями 14
Лакин И. И. Нечеткие множества в системе поддержки принятия решений информационных систем локомотивного комплекса 24
Нехаев В. А., Николаев В. А., Минжасаров М. Х. Математическое моделирование вертикальной динамики электровозов нового поколения 31
Овчаренко С. М., Балагин О. В., Балагин Д. В. Математическое моделирование теплообменных процессов в системе охлаждения тепловоза 38
Томилова О. С., Томилов В. В. Гидравлический расчет модернизированной системы водоснабжения пассажироского вагона железнодорожного транспорта 44
Харламов В. В., Попов Д. И., Литвинов А. В. Методика определения потребляемой мощности во время испытаний асинхронных тяговых двигателей методом взаимной нагрузки с учетом особенностей их питания 53
Шантаренко С. Г., Капустьян М. Ф., Обрывалин А. В. Оценка потерь мощности в узлах экипажной части электровозов 62

Транспортная энергетика

Глухов С. В., Тарута В. Ф., Глухова М. В. Утилизация вторичных энергетических ресурсов при проведении реостатных испытаний 68
Закарюкин В. П., Крюков А. В., Кушов А. А. Определение параметров тяговых сетей по данным измерений 72
Салита Е. Ю., Ковалева Т. В., Никонов А. В. Диагностирование силовых вентилей преобразователей тяговых подстанций 79

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

Ананьева Н. Г., Петров В. В. Применение кластерной технологии для разработки систем видеонаблюдения и видеорегистрации на территориально распределенных объектах железнодорожного транспорта 85
Чижма С. Н., Лаврухин А. А., Малютин А. Г., Окишев А. С. Принципы построения информационной системы мониторинга и учета электроэнергии на фидерах контактной сети 94

Путь и искусственные сооружения

Карпущенко Н. И., Быстров А. В., Труханов П. С. Обеспечение надежности рельсов, имеющих коррозионно-усталостные повреждения 104

Организация производства на транспорте

Базилевич С. В., Зайцев А. В., Кузнецов С. М. Модели показателей эксплуатации выправочно-подбивочно-рихтовочных машин ВПР-02 И ВПРС-02 109
Тихонов Ю. Б. Повышение безопасности работы грузоподъемных кранов восстановительного поезда 118

АННОТАЦИИ 124

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»
Учредитель: Омский государственный университет путей сообщения
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35
Тел./факс: (3812) 31-13-44; e-mail: nauka@omgups.ru

УДК 629.424:001.57

А. С. Анисимов, В. О. Носков, В. К. Фоменко

РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ В СИСТЕМУ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ РАБОТЕ ТЕПЛОВОЗНОГО ДИЗЕЛЯ НА ХОЛОСТОМ ХОДУ

Статья посвящена вопросам математического моделирования теплоотвода в систему охлаждения тепловозного дизеля. В статье представлены особенности расчета тепловыделения в систему охлаждения дизеля при работе на холостом ходу.

В процессе работы любого теплового двигателя часть тепла, выделившегося при сгорании топлива и не преобразовавшегося в работу, поступает в систему охлаждения за счет теплообмена. Тепловозные дизельные двигатели здесь далеко не исключение. Так, при работе на номинальном режиме количество тепла, выделяющегося в систему охлаждения, может достигать до 27 % для двухтактных (дизель 10Д100) и 25 % (ПД1М) для четырехтактных дизелей, при работе на режиме холостого эти значения соответственно равны 55,5 и 48,4 % [1]. Повышение выделения тепла в систему охлаждения примерно в два раза связано с уменьшением частоты вращения коленчатого вала дизеля, а следовательно, с увеличением времени теплообмена. Кроме этого большое влияние на количество теплоты, передающейся от газов через стенку цилиндра в систему охлаждения, оказывает величина коэффициента теплоотдачи α [2].

Наиболее опробованной формулой для расчета коэффициента теплоотдачи в цилиндре поршневого двигателя внутреннего сгорания можно считать уравнение Хохенберга [2]:

$$\alpha = C_1 V_{\varphi}^{-0,06} P^{0,8} T_{\varphi}^{-0,4} (C_{\text{П}} + C_2)^{0,8}, \quad (1)$$

где C_1, C_2 – постоянные коэффициенты;

V_{φ} – текущий объем цилиндра, м^3;

P – давление в цилиндре, МПа;

T_{φ} – температура рабочего тела, К;

$C_{\text{П}}$ – средняя скорость поршня, м/с.

Входящие в выражение (1) значения давления и температуры могут быть определены в результате обработки индикаторных диаграмм, полученных в результате прямого или косвенного индицирования дизеля, а также математического моделирования процессов сжатия, сгорания топлива и расширения. Индицирование двигателей внутреннего сгорания – весьма затратное и трудоемкое дело. Моделирование «виртуальной» индикаторной диаграммы требует знания нагрузочных параметров двигателя (эффективной мощности, частоты вращения коленчатого вала, давления наддува и давления газа перед турбиной) и элементарного состава топлива. Процесс сгорания топлива рассчитывается с использованием известных законов сгорания, таких как законы Вибе, Пугачева, Разлейцева и др. [3 – 5].

Статистически точное отображение особенностей выделения и передачи рабочему телу теплоты при сгорании углеводородного топлива в цилиндре поршневого двигателя внутреннего сгорания позволило кафедре «Локомотивы» ОмГУПСа применить закон сгорания Вибе для моделирования рабочего цикла четырехтактных тепловозных дизелей [6, 7]. Закон Вибе представляет собой полуэмпирическое выражение, включающее в себя такие параметры, как продолжительность сгорания (количественную характеристику процесса) и показатель характера сгорания (качественную характеристику развития процесса сгорания во времени):

$$x = 1 - \mathrm{e}^{-6,908\left(\frac{\varphi}{\varphi_z}\right)^{m+1}}, \quad (2)$$

где φ – текущее значение угла поворота коленчатого вала дизеля;

m – показатель характера сгорания;

φ_z – продолжительность сгорания.

В основе данной математической модели [6] заложено сравнение среднего эффективного давления газов, полученное по нагрузочным параметрам с использованием выражения

$$P_e = \frac{N_e 30\tau}{V_h n_д i}, \quad (3)$$

где N_e – эффективная мощность дизеля, кВт;

τ – коэффициент тактности двигателя;

V_h – рабочий объем одного цилиндра, м^3;

$n_д$ – частота вращения коленчатого вала дизеля, мин$^{-1}$;

i – число цилиндров,

и среднего эффективного давления газов, определяемого в результате моделирования «виртуальной» индикаторной диаграммы.

Определяя по закону сгорания тепловыделение от сгорания топлива за каждый угол поворота коленчатого вала, рассчитывают давление и температуру газов, текущее значение коэффициента теплоотдачи, а используя выражение

$$dQ_w = \alpha(T_г - T_{ст})F_{ст}\frac{d\varphi}{6n_д}, \quad (4)$$

где α – суммарный усредненный по поверхности коэффициент теплоотдачи от рабочего тела к стенкам цилиндра, Вт/(м^2·К);

$T_г$ – температура газа, К;

$T_{ст}$ – температура поверхности камеры сгорания, К;

$F_{ст}$ – площадь тепловоспринимающей поверхности, м^2;

$\frac{d\varphi}{6n_д}$ – время теплоотдачи, с, – количество тепла, отданного рабочим телом стенкам цилиндра на элементарном участке линии сгорания.

Сложность использования представленной математической модели для режима холостого хода работы дизеля тепловоза заключается в том, что эффективная мощность для заданного режима работы равна нулю. В этом случае индикаторная мощность, вырабатываемая дизелем, тратится только на преодоление сил трения, т. е. на преодоление всех механических потерь в двигателе:

$$N_i \equiv N_м, \quad (5)$$

где N_i – индикаторная мощность, кВт;

$N_м$ – мощность механических потерь, кВт.

В этом случае в представленной в источнике [6] математической модели расчета рабочего цикла дизеля необходимо выполнить сравнение среднего давления механических сопротивлений, определенного по параметрам работы двигателя на холостом ходу и среднего давления механических сопротивлений полученного из моделирования “виртуальной” индикаторной диаграммы, поскольку можно считать, что

$$P_i \equiv P_м. \quad (6)$$

Для расчета среднего давления механических сопротивлений во многих случаях используют эмпирическое выражение [8]:

$$P_{\text{м}} = a + bC_{\text{П}}, \tag{7}$$

где $a = 0,09$, $b = 0,012$ – эмпирические коэффициенты для дизельных двигателей;

$C_{П}$ – средняя скорость поршня, м/с.

Средняя скорость поршня определится по выражению:

$$C_{\text{П}} = \frac{Sn_{\text{д}}}{30}. \tag{8}$$

где S – ход поршня, м.

Суммарный теплоотвод в систему охлаждения будет определяться суммой теплоотводов в систему охлаждения при сжатии воздуха, сгорании топлива и расширении отработавших газов после окончания сгорания топлива до выпуска рабочего тела из цилиндра.

Количество тепла, передаваемого в систему охлаждения дизеля, за один цикл определяется суммой элементарного количества тепла за каждый угол поворота коленчатого вала двигателя, кДж/ц:

$$Q_{w_{\Sigma}} = \sum_{i=1}^{360} Q_{w_i}. \tag{9}$$

В течение одного часа работы дизеля выделение теплоты в систему охлаждения, кДж/ч,

$$Q_w^{(\text{ч})} = 30 Q_{w_{\Sigma}} n_{\text{д}}. \tag{10}$$

Изменение давления и температуры газов в процессе сгорания топлива для режима холостого хода дизеля ПД4Д тепловоза ТЭМ18ДМ представлено на рисунке 1.

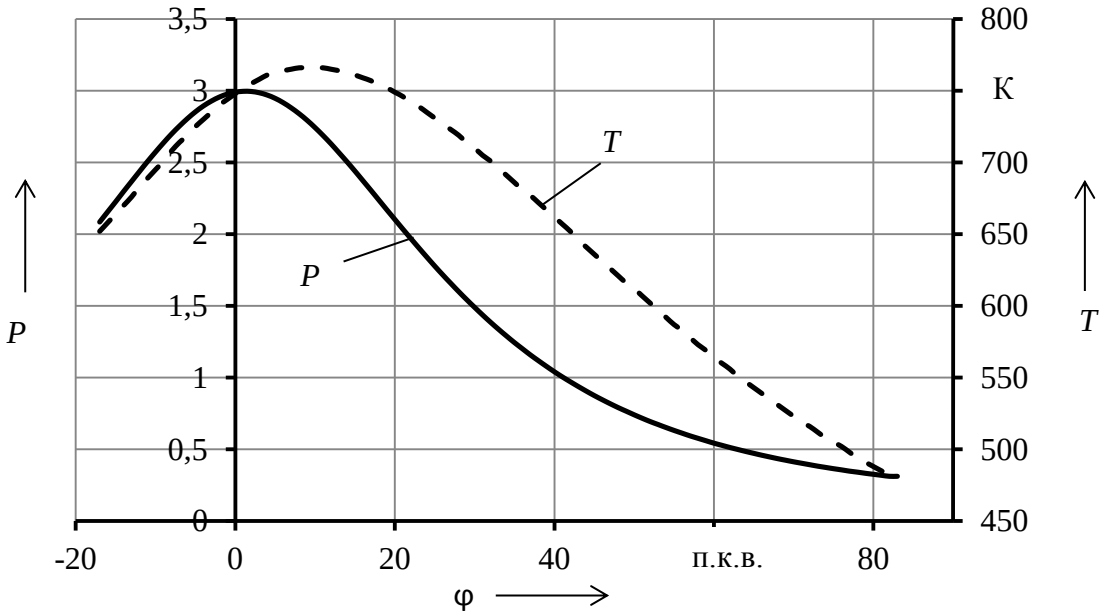


Рисунок 1 – Зависимость давления и температуры от угла поворота коленчатого вала в процессе сгорания топлива

На рисунке 2 представлены результаты расчета коэффициента теплоотдачи по формуле Хохенберга в процессе сгорания топлива. Здесь же приведено изменение тепловыделения в систему охлаждения в процессе сгорания за каждый угол поворота коленчатого вала двигателя. Подобные характеристики могут быть рассчитаны для любого режима работы дизеля на холостом ходу (частота вращения коленчатого вала дизеля).

В таблице представлены результаты расчета тепловыделения в систему охлаждения дизеля ПД4Д на режиме холостого хода по позициям контроллера машиниста в течение одного

часа работы тепловоза, а изменение количества теплоты в зависимости от частоты вращения коленчатого вала $Q_w = f(n_д)$ представлено на рисунке 3.

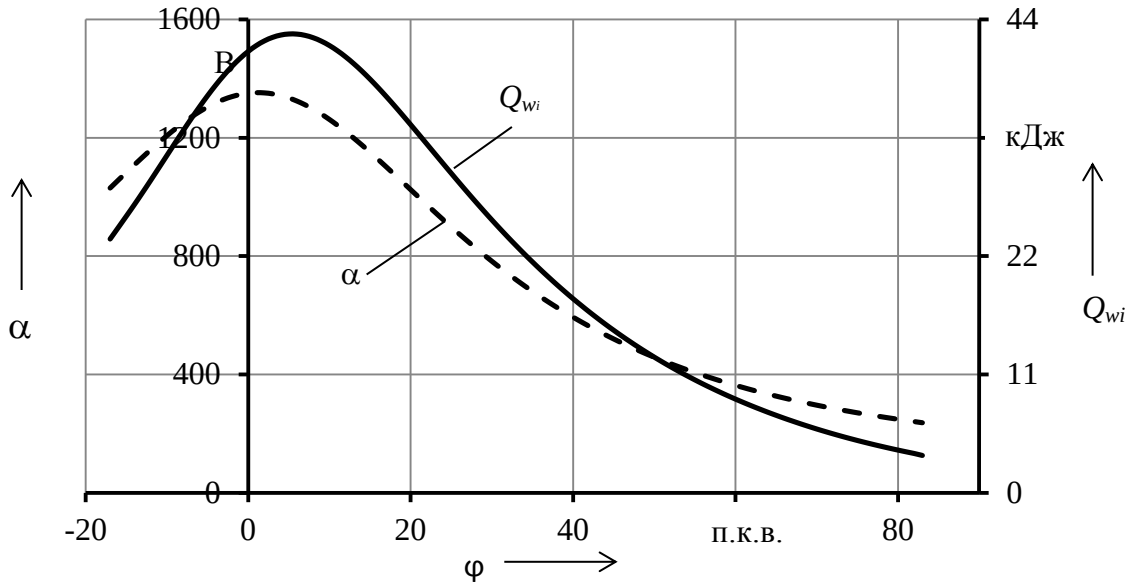


Рисунок 2 – Изменение коэффициента теплоотдачи и количества тепла, передаваемого в систему охлаждения дизеля от угла поворота коленчатого вала в процессе сгорания топлива

Значения параметров работы дизеля ПД4Д

Параметр	Результаты расчетов по позициям контроллера машиниста								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$n_д$, мин$^{-1}$	300	300	300	300	400	480	570	650	750
$C_п$, м/с	3,3	3,3	3,3	3,3	4,4	5,28	6,27	7,15	8,25
$P_м$, МПа	0,129	0,129	0,129	0,129	0,142	0,153	0,165	0,175	0,189
$N_м$, кВт	50,92	50,92	50,92	50,92	74,81	96,44	123,3	146,9	185,6
$Q_w^{(ч)}$, кДж/ч	35787	35787	35787	35787	57593	74093	96988	125730	157688

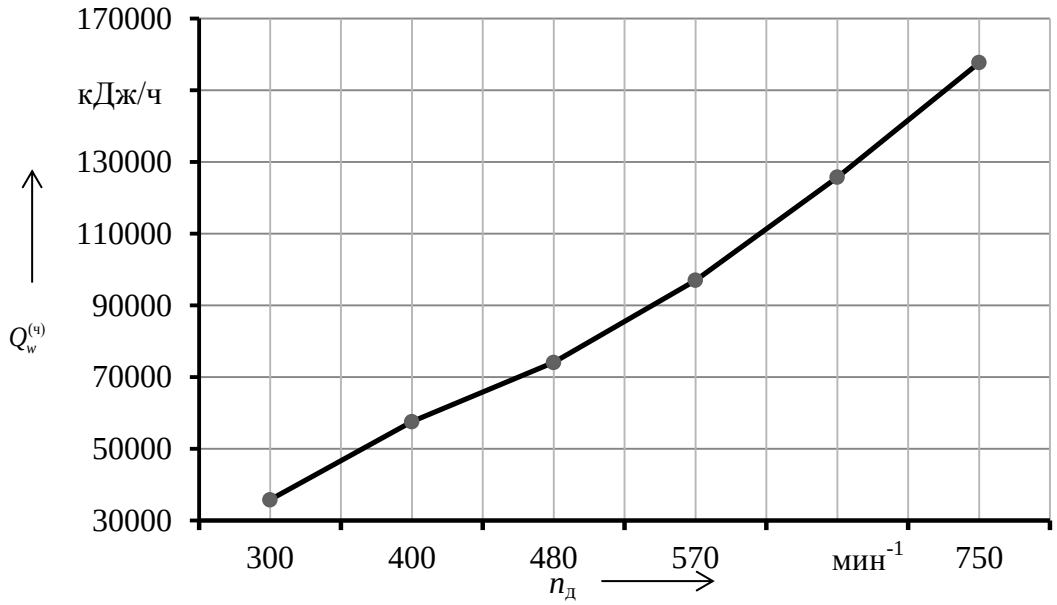


Рисунок 3 – Зависимость выделения теплоты в систему охлаждения тепловоза от частоты вращения коленчатого вала дизеля

Практическое значение представленных в статье результатов научных исследований заключается в контроле тепловыделения в систему охлаждения двигателя и далее в окружающую среду через секции охлаждения холодильника тепловоза.

Особенно важно контролировать процесс теплоотвода в холодное время года, когда важно не допускать снижения температуры теплоносителя, поступающего из дизеля в секции охлаждения, ниже значений регламентируемых инструкций по эксплуатации тепловоза.

В этом случае потери тепла в окружающую среду могут быть компенсированы только за счет тепловыделения в систему охлаждения от сгорания топлива, если другие способы поддержания температуры теплоносителя не предусмотрены. В случае применения сторонних источников поддержания температурного режима двигателя значение количества тепла, выделяющегося в систему охлаждения, будет определять требуемую тепловую мощность системы прогрева для любых условий окружающей среды.

Список литературы

1. Тепловозные двигатели внутреннего сгорания: Учебник для вузов [Текст] / А. Э. Симсон, А. З. Хомич и др. – М.: Транспорт, 1987. – 536 с.

2. Кавтарадзе, Р. З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях: Учебное пособие для вузов [Текст] / Р. З. Кавтарадзе. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. – 427 с.

3. Вибе, И. И. Новое о рабочем цикле двигателей [Текст] / И. И. Вибе. – М.-Свердловск, 1962. – 271 с.

4. Дьяченко, Н. Х. Теория двигателей внутреннего сгорания [Текст] / Н. Х. Дьяченко, А. К. Костин и др. – Л., 1974. – 552 с.

5. Разлейцев, Н. Ф. Моделирование и оптимизация процесса сгорания в дизелях [Текст] / Н. Ф. Разлейцев. – Харьков, 1980. – 169 с.

6. Володин, А. И. Комплексный анализ термодинамических, экономических и экологических характеристик тепловозных дизелей в условиях эксплуатации: Монография [Текст] / А. И. Володин, Е. И. Сковородников, А. С. Анисимов / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2011. – 166 с.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014615305. Расчет рабочего цикла четырехтактного дизеля методом Вибе [Текст] / А. С. Анисимов, Е. И. Сковородников // Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 22 мая 2014 г.

8. Петриченко, Р. М. Физические основы внутрицилиндровых процессов в двигателях внутреннего сгорания [Текст] / Р. М. Петриченко / Ленинградский гос. ун-т. – Л., 1983. – 244 с.

References

1. Simpson A. E., Khomich A. Z., Chicken A. A. *Teplovoznye dvigateli vnutrennego sgoraniia: Uchebnik dlia vuzov* (Diesel combustion engines: Textbook for Universities). Moskow: Transport, 1987, 536 p.

2. Kavtaradze R. Z. *Lokal'nyi teploobmen v porshnevykh dvigateliakh* (Local heat transfer in piston engines). Moskow: MSTU, 2007, 427 p.

3. Vibe I. I. *Novoe o rabochem tsikle dvigatelei* (New of the working cycle of the engine). Moscow, Sverdlovsk, 1962, 271 p.

4. Dyachenko N. H., Kosteen A. K., Pugachev B. P. *Teoriia dvigatelei vnutrennego sgoraniia* (Theory of internal combustion engines). Leningrad, 1974, 552 p.

5. Razleytsev N. F. *Modelirovanie i optimizatsiia protsessa sgoraniia v dizeliakh* (Simulation and optimization of the combustion process in diesel engines). Kharkiv, 1980, 169 p.

6. Volodin A. I., Skovorodnikov E. I., Anisimov A. S. *Kompleksnyi analiz termodinamicheskikh, ekonomicheskikh i ekologi-cheskikh kharakteristik teplovoznykh dizelei v usloviiakh ekspluatatsii: Monografiia* (Comprehensive analysis of the thermodynamic, economic and environmental performance of diesel engines in operation). Omsk: OSTU, 2011, 166 p.

7. Anisimov A. S., Scovorodnikov E. I. *Patent RU 2014615305*, 22.05.2014.

8. Petrychenko R. M. *Fizicheskie osnovy vnutritsilindrovykh protsessov v dvigateliakh vnutrennego sgoraniia* (Physical bases intracylinder processes in internal combustion). Leningrad: LGU, 1983, 244 p.

УДК 629.4.016.1

А. А. Бакланов, Н. В. Есин, А. П. Шиляков

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НОВЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ ДЛЯ СОКРАЩЕНИЯ ВРЕМЕНИ ХОДА ПАССАЖИРСКИХ ПОЕЗДОВ НА ТРАНССИБИРСКОЙ МАГИСТРАЛИ

Рассмотрены возможности повышения скорости движения и сокращения времени хода пассажирских поездов на Транссибирской магистрали, в том числе с помощью новых пассажирских электровозов ЭП1, ЭП2К, ЭП20.

Повышение скорости движения пассажирских поездов связано с решением ряда социальных проблем, в том числе с сокращением времени нахождения в пути, и позволяет привлечь пассажиров с других видов транспорта, т. е. повысить конкурентоспособность железнодорожного транспорта [1]. Скорость движения представляет собой один из основных факторов, влияющих на важнейшие технико-экономические показатели работы железных дорог, в том числе на энергозатраты в тяге поездов.

Сокращение времени хода предполагает прежде всего повышение максимальной скорости движения пассажирских поездов, а для этого в первую очередь необходимо увеличивать мощность и силу тяги локомотива. Сила тяги, необходимая для движения пассажирского поезда, определяется основным сопротивлением движению и дополнительным сопротивлением от подвагонных генераторов, а также профилем и планом пути. При увеличении скорости движения на участке возрастает доля основного сопротивления движению в силе тяги локомотива и снижается доля, обусловленная профилем и планом пути. При этом сила тяги локомотива и механическая работа увеличиваются пропорционально скорости движения во второй степени, а мощность и расход электроэнергии – пропорционально скорости движения в третьей степени.

В качестве примера в таблице 1 приведены значения силы тяги $F_к$ и полезной (механической) мощности P электровоза, необходимые для движения пассажирского поезда из 17 – 19 вагонов на равнинном профиле пути с различными скоростями. По этим данным видно, что при скоростном движении с максимальной скоростью 160 км/ч по сравнению с обычной скоростью 120 км/ч, т. е. при увеличении скорости движения пассажирского поезда в 1,33 раза, требуемая касательная сила тяги локомотива возрастает с 70 – 86 до 100 – 123 кН, т. е. в 1,43 раза, а мощность увеличивается с 2333 – 2867 до 4444 – 5467 кВт, т. е. в 1,9 раза, во столько же раз возрастают ток электровоза и энергозатраты.

Таблица 1 – Сила тяги и мощность электровоза при движении с пассажирским поездом из 17 – 19 вагонов на равнинном профиле пути

V, км/ч	60	80	100	120	140	160
$F_к$, кН	42 – 51	49 – 59	58 – 71	70 – 86	84 – 104	100 – 123
P, кВт	700 – 850	1089 – 1311	1611 – 1972	2333 – 2867	3267 – 4044	4444 – 5467

Следовательно, переход на скоростное движение пассажирских поездов требует значительного увеличения касательной силы тяги и мощности пассажирских электровозов, токовых нагрузок контактной сети, расхода энергии на тягу, поэтому повышение скорости движения необходимо обосновывать всесторонне путем выполнения технико-экономических расчетов и проведения экспериментальных исследований, которые выходят за рамки данной статьи.

Время хода поезда, как известно, определяется средней скоростью движения, которая, в свою очередь, зависит от максимальной скорости движения, количества и продолжительности остановок, ограничений скорости, профиля и плана пути участка, параметров и технического состояния подвижного состава, пути, устройств тягового электроснабжения, сигнализации и связи и других факторов.

Отношение средней ходовой скорости $V_{ср}$ к максимально допустимой скорости движения поезда $V_{доп}$ на участке назовем коэффициентом средней скорости

$$k_v = \frac{V_{ср}}{V_{доп}}. \quad (1)$$

Средняя ходовая скорость $V_{ср}$ на участке длиной L определяется общим временем хода поезда T и характеризуется выражением:

$$V_{ср} = \frac{L_{ср}}{T_{доп}} = \frac{L}{\sum \frac{L_j}{V_j} + T_o} = \frac{1}{\sum \frac{\alpha_j}{V_j} + \tau_o}, \quad (2)$$

где L_j, V_j – длина j-го отрезка пути и скорость движения на нем;

T_o – время стоянок на участке;

$\alpha_j = L_j/L$ – относительная протяженность j-го отрезка пути в общей длине участка;

$\tau_o = T_o/L$ – время стоянок на единицу длины участка.

В настоящее время на Транссибирской магистрали максимальная скорость движения пассажирских поездов дальнего следования в основном не превышает 120 км/ч. Поэтому в качестве примера рассмотрим участок, одну часть которого протяженностью α_1 поезд проходит со скоростью $V_1 = V_{доп}$ =120 км/ч, а другую часть протяженностью α_2 поезд проходит со скоростью V_2 = 80 км/ч, время стоянок на единицу длины участка меняется в диапазоне τ_o = = 0,001 – 0,005 ч/км. Построенные по результатам расчетов на рисунке 1 зависимости $V_{ср}$ (α_1, τ_o) показывают, что в данных условиях коэффициент средней скорости находится в диапазоне k_v = 0,49 – 0,85. С увеличением относительной протяженности пути α_1, пройденного с максимальной скоростью $V_{доп}$, от 0,1 до 0,9, т. е. в девять раз, коэффициент k_v и, соответственно, средняя скорость $V_{ср}$ возрастают в 1,24 – 1,34 раза. При увеличении времени стоянок поезда τ_o от 0,001 до 0,005 ч/км, т. е. в пять раз, коэффициент k_v и, соответственно, средняя скорость $V_{ср}$ снижаются в 1,75 раза. Следовательно, степень влияния остановок и их продолжительности на среднюю скорость существенно больше, чем влияние протяженности пути, пройденного поездом с максимальной скоростью.

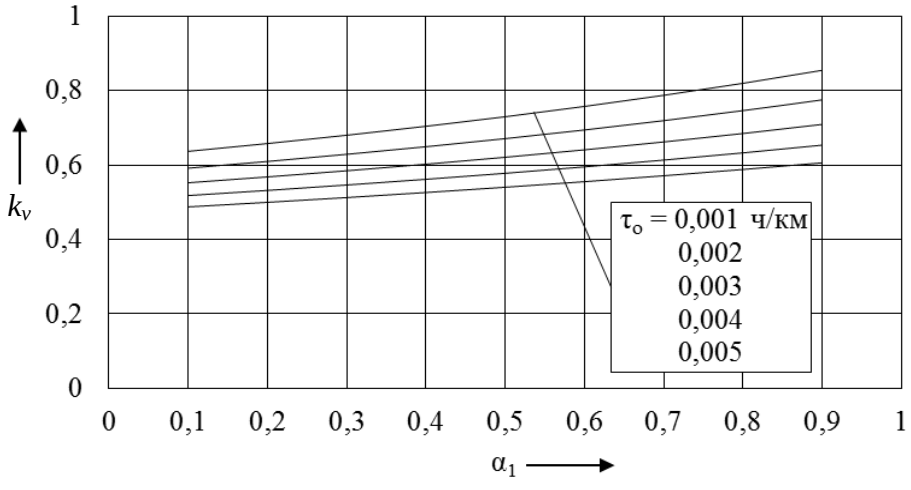


Рисунок 1 – Коэффициент средней скорости движения поезда

На основании анализа действующего расписания движения пассажирских поездов дальнего следования на Транссибирской магистрали, на отдельных участках которой максимальная скорость движения пассажирских поездов достигает 120 км/ч, коэффициент средней скорости k_v находится в диапазоне 0,50 – 0,75. При этом большие значения коэффициента k_v соответствуют расписанию движения поезда с минимальными количеством и продолжительностью остановок, а меньшие значения – с большими количеством и продолжительностью остановок.

Для указанного диапазона коэффициента k_v в таблице 2 приведены значения средней скорости $V_{ср}$ при различных значениях максимально допустимой скорости движения $V_{доп}$.

Таблица 2 – Максимально допустимые и средние скорости движения пассажирских поездов дальнего следования

$V_{доп}$, км/ч	80	100	120	140	160
$V_{ср}$, км/ч	40 – 60	50 – 75	60 – 90	70 – 105	80 – 120

Анализ действующего расписания и средней скорости движения скорого фирменного пассажирского поезда № 2 «Россия» (рисунок 2) и ему подобных поездов на полигоне Москва – Владивосток показывает следующее.

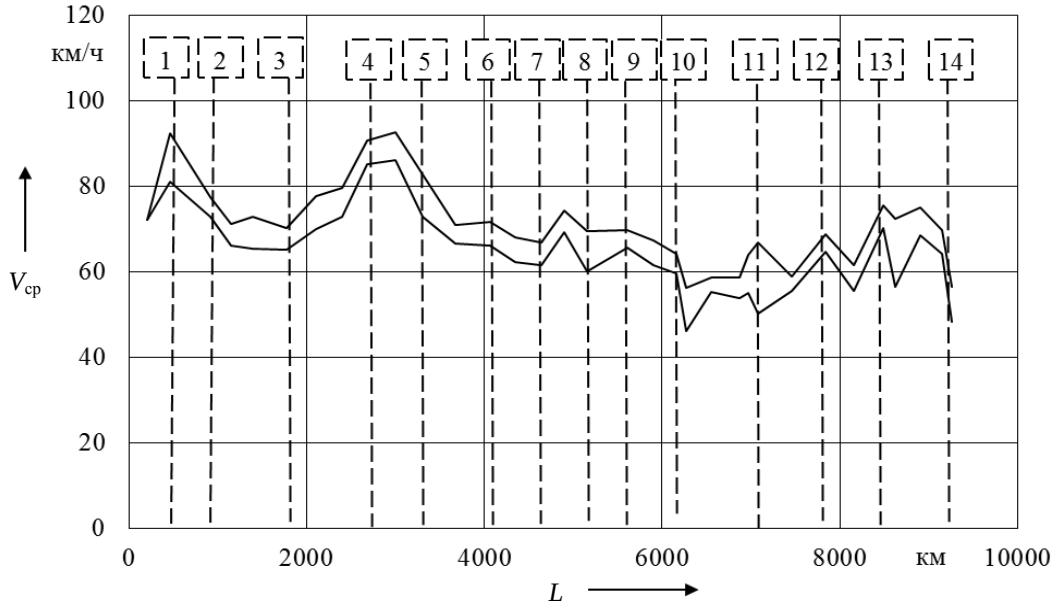


Рисунок 2 – Средняя скорость движения по участкам скорого фирменного пассажирского поезда № 2 «Россия» Москва – Владивосток: нижняя кривая – с учетом остановок; верхняя кривая – без учета остановок; 1 – Нижний Новгород; 2 – Киров; 3 – Екатеринбург; 4 – Омск; 5 – Новосибирск; 6 – Красноярск; 7 – Нижнеудинск; 8 – Иркутск; 9 – Улан-Удэ; 10 – Чита; 11 – Ерофей Павлович; 12 – Белогорск; 13 – Хабаровск; 14 – Владивосток

Наибольшая средняя скорость движения скорых фирменных поездов 80 – 95 км/ч имеет место на участках Владимир – Нижний Новгород длиной 250 км и Свердловск – Тюмень – Омск – Новосибирск длиной около 1500 км. На остальных участках средняя скорость находится на уровне 60 – 75 км/ч, а на участках Чита – Могоча и Ерофей Павлович – Магдагачи она меньше 60 км/ч. Поэтому средняя ходовая скорость движения на всем пути следования скорых фирменных поездов составляет 65 – 72 км/ч.

Исходя из соотношений средней скорости $V_{ср}$ и максимально допустимой скорости движения $V_{доп}$, приведенных в таблице 2, при реализации максимальной скорости движения 120 км/ч на всех участках Транссибирской магистрали средняя скорость движения пассажирских поездов может достигать 90 км/ч. Разумеется, для этого необходимо провести прежде всего реконструкцию пути на всем полигоне, в том числе замену кривых малого радиуса кривыми большего радиуса, и ряд других мероприятий.

Выполняемый капитальный ремонт пути на Западно-Сибирской и других железных дорогах позволяет поднять максимальную скорость движения пассажирских поездов до 140 км/ч, при этом средняя скорость движения может достигать 105 км/ч (см. таблицу 2). Расчеты показывают, что при средней скорости 90 – 100 км/ч время хода скорых пассажирских поездов на Транссибирской магистрали можно сократить на 21 – 35 % (таблица 3). В частности, от Москвы до Омска время хода сокращается на 9 – 11 ч, до Новосибирска – на 10 – 12 ч, до Красноярска – на 13 – 17 ч, до Иркутска – на 19 – 23 ч, до Улан-Удэ – на 21 – 25 ч, до Читы – на 25 – 29 ч, до Хабаровска – на 41 – 45 ч, до Владивостока – на 45 – 50 ч.

Таблица 3 – Временные и скоростные показатели движения скорых фирменных поездов на Транссибирской магистрали

Пункт	Расстояние от Москвы L, км	В настоящее время		В перспективе		Разность Δt	
		t, ч	$V_{ср}$, км/ч	t, ч	$V_{ср}$, км/ч	ч	%
Омск	2676	37 – 39	69 – 73	26 – 30	90 – 100	9 – 11	23 – 30
Новосибирск	3303	45 – 47	71 – 73	33 – 37	90 – 100	10 – 12	21 – 27
Красноярск	4065	57 – 59	69 – 71	40 – 46	90 – 100	13 – 17	22 – 30
Иркутск	5153	74 – 77	67 – 70	51 – 58	90 – 100	19 – 23	24 – 31
Улан-Удэ	5609	81 – 84	67 – 69	56 – 63	90 – 100	21 – 25	25 – 31
Чита	6166	90 – 94	66 – 69	61 – 69	90 – 100	25 – 29	28 – 33
Хабаровск	8493	130 – 135	63 – 65	85 – 94	90 – 100	41 – 45	30 – 35
Владивосток	9259	143 – 148	63 – 65	93 – 103	90 – 100	45 – 50	30 – 35

Следовательно, время хода пассажирских поездов можно уменьшить в определенной степени без существенного повышения максимальной скорости движения за счет увеличения средней скорости путем сокращения количества и продолжительности остановок, ликвидации ограничений скорости и т. п., такой подход не приводит к значительному возрастанию энергетических затрат на тягу поездов. Это можно реализовать без больших капитальных затрат на существующих линиях, особенно с использованием нового подвижного состава, прежде всего пассажирских электровозов нового поколения, обладающих большими мощностью и силой тяги и позволяющих повысить скорость движения поездов на лимитирующих подъемах. Кроме того, новые электровозы рассчитаны на непрерывную длительную работу на полигонах большой длины и больший срок между техническими обслуживаниями ТО-2, за счет этого сокращаются количество остановок и время стоянок пассажирских поездов для смены локомотивов.

В настоящее время промышленность страны освоила выпуск новых отечественных пассажирских электровозов постоянного тока ЭП2К и переменного тока ЭП1 с коллекторными тяговыми двигателями, а также электровозов двойного питания ЭП20 с бесколлекторными асинхронными тяговыми двигателями [5 – 7], основные технические данные этих электровозов приведены в таблице 4. Здесь также приведены для сравнения основные технические данные старых пассажирских электровозов постоянного тока ЧС2 [8] и переменного тока ЧС4 [9] с коллекторными тяговыми двигателями.

Таблица 4 – Основные технические данные пассажирских электровозов

Параметр	Серия электровоза				
	ЭП2К	ЭП1	ЭП20	ЧС2	ЧС4
Конструкционная скорость, км/ч	160	140	160	160	180
Номинальная скорость, км/ч	91/87,8	73,1/71	78/78	96,9/91,5	108/106
Номинальная сила тяги, кН	167,4/192,8	219/239	300/325	134,4/161,9	164,8/170,7
Номинальная мощность на валах тяговых двигателей, кВт	4320/4800	4500/4800	6600/7200	3700/4200	4920/5100

Примечание. В числителе указаны данные продолжительного режима, в знаменателе – часового режима.

Для электровозов ЭП1, ЭП2К на рисунках 3, 4 приведены тяговые характеристики $F_к(V)$ с кривыми сопротивления движению $W(V)$ пассажирского поезда повышенной длины, состоящего из $n_в = 23$ вагона массой $m_с = 1380$ т, на подъемах различной крутизны i. Кривые соп-

ротивления движению рассчитаны в соответствии с указанными источниками [2 – 4], при этом в расчетах приняты масса одного пассажирского вагона $m_в$ = 60 т, мощность подвагонного генератора $P_{пг}$ = 10 кВт, бесстыковой путь и нормальные метеорологические условия. Кривые сопротивления движению пассажирского поезда построены от скорости движения 20 км/ч, при которой начинают работать под нагрузкой подвагонные генераторы, и имеют вогнутый характер потому, что в области низких скоростей движения возрастает дополнительное сопротивление движению от подвагонных генераторов, а в области высоких скоростей движения возрастает основное сопротивление движению.

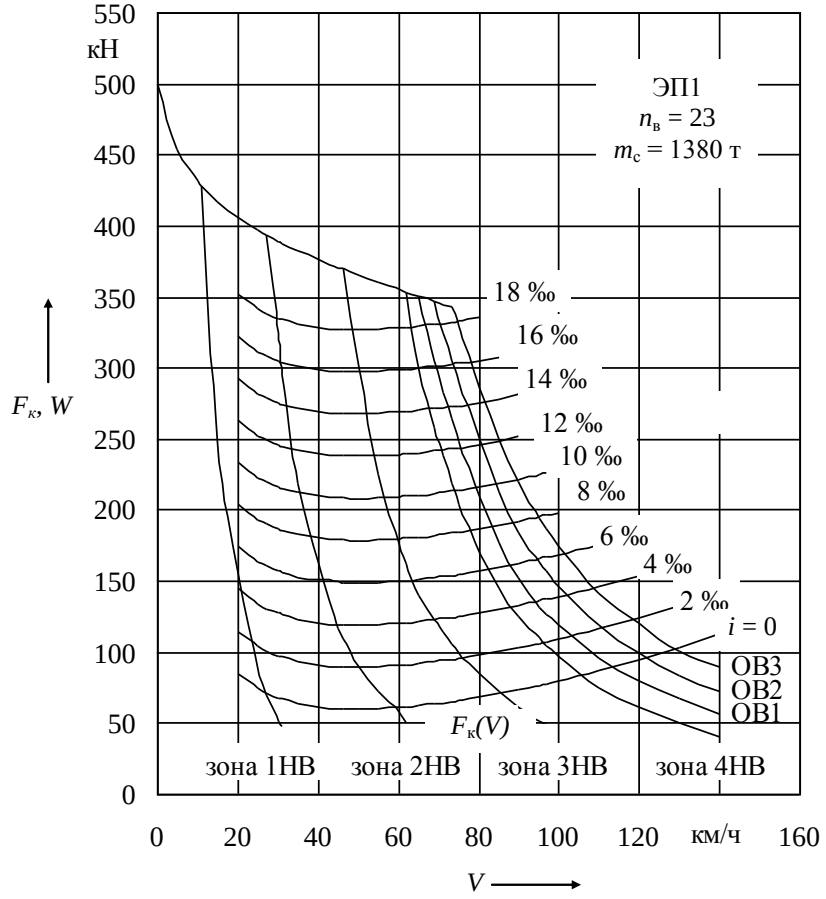


Рисунок 3 – Тяговые характеристики 6-осного электровоза переменного тока ЭП1 при напряжении в контактной сети 25000 В и характеристики сопротивления движению пассажирского поезда массой состава 1380 т, 23 вагона

Тяговые характеристики электровоза ЭП1 указаны на границах зон 1 – 4 регулирования выпрямленного напряжения выпрямительно-инверторных преобразователей при нормальном возбуждении (НВ) тяговых двигателей, при этом на зоне 4 показаны характеристики для трех ступеней ослабления возбуждения ОВ1 – ОВ3 тяговых двигателей. Тяговые характеристики электровоза ЭП2К указаны на трех соединениях тяговых двигателей при полном возбуждении (ПВ): сериесном С-ПВ, сериес-параллельном СП-ПВ и параллельном П-ПВ, при этом на параллельном соединении показаны характеристики для пяти ступеней ослабления возбуждения ОВ1-ОВ5 тяговых двигателей.

Анализ характеристик на рисунках 3, 4 позволяет определить установившиеся скорости движения $V_{уст}$ электровозов на всех ходовых позициях регулирования с пассажирским поездом массой $m_с$ = 1380 т из $n_в$ = 23 вагона, значения которых приведены в таблицах 5, 6.

Из анализа кривых на рисунке 3 и данных в таблице 5 видно, что электровозом переменного тока ЭП1 при напряжении в контактной сети $U_с$ = 25000 В и нормальных метеорологи-

ческих условиях и сцеплении колес с рельсами можно водить пассажирские поезда повышенной длины из 23 вагонов массой состава 1380 т с установившимися скоростями на подъемах крутизной до 18 ‰.

Кривые на рисунке 4 и данные в таблице 6 показывают, что электровозом постоянного тока ЭП2К при напряжении в контактной сети $U_с$ = 3000 В и нормальных метеорологических условиях и сцеплении колес с рельсами можно водить пассажирские поезда повышенной длины из 23 вагонов массой состава 1380 т с установившимися скоростями на подъемах крутизной до 14 ‰.

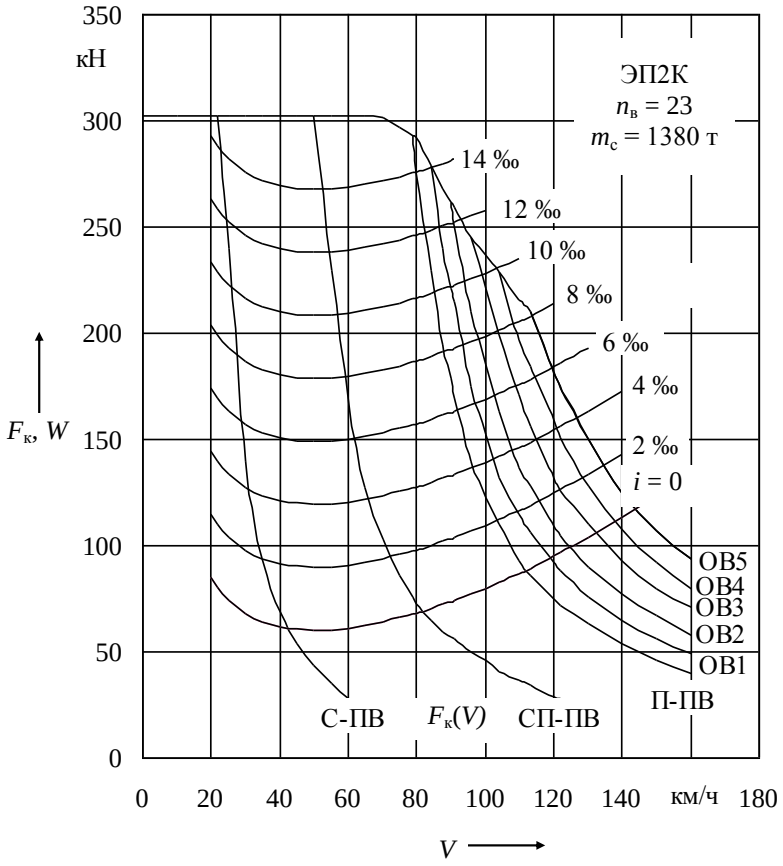


Рисунок 4 – Тяговые характеристики 6-осного электровоза постоянного тока ЭП2К при напряжении в контактной сети 3000 В и характеристики сопротивления движению пассажирского поезда массой состава 1380 т, 23 вагона

Таблица 5 – Установившиеся скорости движения пассажирского поезда массой состава 1380 т с электровозом ЭП1 на подъемах различной крутизны при напряжении в контактной сети 25000 В

i, ‰	$V_{уст}$, км/ч						
	1НВ	2 НВ	3НВ	4НВ	4ОВ1	4ОВ2	4ОВ3
0	26	59	85	106	113	122	129
2	23	50	76	96	103	110	119
4	20	44	68	87	93	102	108
6		41	63	81	88	94	101
8		38	60	77	83	88	94
10		35	56	73	79	83	88
12		33	53	70	75	80	85
14		31	52	67	71	76	81
16		30	50	64	69	72	77
18		29	48	63	66	70	74

Таблица 6 – Установившиеся скорости движения пассажирского поезда массой состава 1380 т с электровозом ЭП2К на подъемах различной крутизны при напряжении в контактной сети 3000 В

i, ‰	$V_{уст}$, км/ч							
	С-ПВ	СП-ПВ	П-ПВ	П-ОВ1	П-ОВ2	П-ОВ3	П-ОВ4	П-ОВ5
0	42	81	111	119	124	132	138	143
2	33	72	103	108	115	121	128	134
4	30	66	96	102	107	114	120	127
6	28	61	91	97	102	108	113	119
8	27	59	87	92	98	103	108	113
10	26	57	84	89	93	99	104	
12	24	54	82	86	90			
14	23	52	80	84				

На Транссибирской магистрали большинство лимитирующих затяжных подъемов имеют крутизну до 10 ‰, однако есть небольшое количество затяжных подъемов крутизной до 17 – 18 ‰. Следовательно, на большей части Транссибирской магистрали на участках с лимитирующими подъемами крутизной 10 ‰ новые электровозы ЭП1, ЭП2К, ЭП20 могут водить пассажирские поезда, в том числе повышенной длины с количеством вагонов 20 – 23, в номинальном режиме тяги со скоростью не менее 70 км/ч и с большей скоростью на подъемах меньшей крутизны, в том числе с максимальной скоростью на участках с равнинным профилем пути, при этом время хода поездов существенно сократится.

Еще больше уменьшить время хода пассажирских поездов могут электровозы двойного питания ЭП20 с асинхронным тяговым приводом и конструкционной скоростью 160 км/ч за счет сокращения стоянок, особенно в пунктах смены рода тока. При увеличении срока между техническими обслуживаниями ТО-2 до 96 ч электровозы ЭП20 могут без отцепки водить скорые пассажирские поезда на полигоне Москва – Владивосток.

Таким образом, по своим тягово-энергетическим и скоростным параметрам электровозы ЭП1, ЭП2К, ЭП20 вполне способны обеспечить повышение скорости движения и сокращение времени хода пассажирских поездов на Транссибирской магистрали. С целью оценки технико-экономической целесообразности и детализации возможностей сокращения времени хода пассажирских поездов с использованием новых электровозов необходимо провести комплекс исследований, результаты которых позволят обосновать и разработать условия и мероприятия по повышению скорости движения пассажирских поездов на Транссибирской магистрали.

Список литературы

1. Косарев, А. Б. Проблемы развития скоростного движения [Текст] / А. Б. Косарев, О. Н. Назаров // Материалы второго междунар. симпозиума eltrans «Электрификация и научно-технический прогресс на железнодорожном транспорте» / ПГУПС. – Санкт-Петербург, 2003. – С. 42 – 54.

2. Розенфельд, В. Е. Теория электрической тяги [Текст] / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. – М.: Транспорт, 1983. – 328 с.

3. Правила тяговых расчетов для поездной работы [Текст]. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.

4. Гребенюк, П. Т. Тяговые расчеты: Справочник [Текст] / П. Т. Гребенюк, А. Н. Долганов, А. И. Скворцова. – М.: Транспорт, 1987. – 272 с.

5. Электровоз ЭП1: Руководство по эксплуатации [Текст]. – Новочеркасск, 2006. – Т. 1. – 527 с.

6. Подопросветов, А. В. Особенности электрических схем электровоза ЭП2К [Текст] / А. В. Подопросветов, Б. Н. Морошкин // Локомотив. – 2013. – № 2. – С. 26 – 28.

7. Солтус К. П. Знакомьтесь: электровоз ЭП20 [Текст] // Локомотив. – 2013. – № 4. – С. 34 – 37.

8. Раков, В. А. Пассажирский электровоз ЧС2 [Текст]. – М.: Трансжелдориздат, 1963. – 360 с.

9. Пассажирский электровоз ЧС4 [Текст] / В. А. Каптелкин, Ю. В. Колесин и др. – М.: Транспорт, 1971. – 303 с.

References

1. Kosarev A. B., Nazarow O. N. Problems of development of high-speed traffic [Problemy razwitija skorostnogo dwigenija]. *Electrifikazija i nauchno-tehnicheskij progress na geleznodorognom transporte: Materialy wtorogo megdunarodnogo simpoziuma eltrans 2003* (Electrification and scientific and technical progress in the railway transport: Materials of the Second International Symposium eltrans). – St. Petersburg 2003, pp. 42 – 54.

2. Rozenfeld W. E., Isaew I. P., Sidorow N. N. *Teorija elektricheskoj tjagi* (Electric traction theory). Moscow: Transport Publ., 1983, 328 p.

3. *Prawila tjagowih raschetow dlja poezdnoj raboty* (Rules of traction calculations for train operation). Moscow: Transport Publ., 1985, 287 p.

4. Grebenjuk P. T., Dolganow A. N., Skworzowa A. I. *Tjagowije raschety* (Traction calculations). Moscow: Transport Publ., 1987, 272 p.

5. *Electrowoz EP1. Rukowodstwo po ekspluatazii* (Electric locomotive EP1. The manual). Vol. 1. Nowocherkask, 2006, 527 p.

6. Podoproswetow A. W., Moroschkin B. N. Features of electrical circuits electric locomotive EP2K [Osobennosti electricheskih shem electrowoza EP2K]. *Locomotiv – The Locomotive,* 2013, no. 2, pp. 26 – 28.

7. Soltus K. P. Meet the electric locomotive EP20 [Znakomtes: electrowoz EP20]. *Locomotiv – The Locomotive,* 2013, no. 4, pp. 34 – 37.

8. Rakov V. A. *Passazhirskii elektrovoz ChS2* (Passenger electric ChS2). Moskow: Transzheldorizdat. 1963. 360 p.

9. Kaptelkin V. A., Kolesin Iu. V. *Passazhirskii elektrovoz ChS4* (Passenger electric ChS4). Moskow: Transport. 1971. 303 p.

УДК 629.4.015;656.2;621.0;534.014

С. В. Елисеев, Н. Ж. Кинаш, Д. Х. Нгуен

ОСОБЕННОСТИ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ СИСТЕМ С РЫЧАЖНЫМИ СВЯЗЯМИ

Предлагается метод построения математических моделей для механических систем с дополнительными обратными связями, которые формируются рычажными механизмами различного рода. Показано, что математические модели могут быть получены путем упрощения более сложной системы с твердым телом, имеющим неподвижную точку вращения. При построении модели рычажные связи формально проявляются, если уменьшать момент инерции промежуточного твердого тела до малых значений. Показано, что механическая колебательная система может быть приведена к эквивалентной схеме, соответствующей системе цепного типа. Эквивалентные расчетные схемы могут иметь межпарциальные связи различного вида. Предложены и обоснованы возможности использования квазипружин. Такие сложные образования состоят из упругих звеньев, соединенных между собой рычажными механизмами. Приведенная жесткость квазипружин определяется по правилам преобразования структурных математических моделей. Основой математического моделирования является использование преобразований Лапласа с последующим построением эквивалентных в динамическом отношении структурных схем систем автоматического управления. Получены аналитические соотношения, характеризующие возможности реализации особых динамических режимов.

Обратные связи в динамике механических колебательных систем разнообразны в своих проявлениях, что нашло отражение в ряде работ последних лет [1, 2]. Введение в структуру механических систем рычажных механизмов в определенном смысле расширило представления о возможных формах динамических взаимодействий элементов виброзащитных си-

стем [3]. В работах [4, 5] приведены результаты, характеризующие влияние рычажных связей, формируемых механизмами различных видов, также в этих источниках нашли отражение задачи динамики рычажных механизмов, работающих во взаимодействии с пневматическими и гидравлическими устройствами. Вместе с тем ряд вопросов, связанных с физическими формами реализации обратных связей, не получил достаточной детализации рассмотрения.

В предлагаемой статье развивается методологический базис для оценки возможностей рычажных связей в формировании динамических свойств, характерных для виброзащитных систем оборудования и машин.

I. Общие положения.

Рассматривается механическая система с двумя степенями свободы, в составе которой имеется устройство (рисунок 1) для преобразования движения. Интерес представляет сравнительный анализ систем с рычажными связями в их сопоставлении с известными схемными решениями в виде цепных структур из твердых тел, совершающих вертикальные колебательные движения в последовательной связке с упругими элементами (см. рисунок 1).

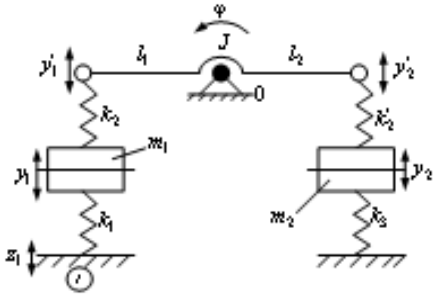


Рисунок 1 – Расчетная схема с рычажной связью, обеспечивающей взаимодействие между двумя массоинерционными элементами системы

Отметим, что в системах имеются особенности динамических взаимодействий. Важным обстоятельством для оценки возможных форм динамических взаимодействий являются соотношения форм движения по отдельным координатам.

В общем случае твердое тело, имеющее точку вращения O (т. O), обладает моментом инерции J; центр тяжести твердого тела совпадает с т. O. В дальнейшем предполагается возможность малости значений момента инерции, что позволяет переходить к оценке рычажных связей «занулением» параметра J.

Рычаг имеет центр вращения в виде неподвижной точки O и плечи l_1 и l_2. Внешнее возмущение представлено движением основания $z_1(t)$ гармонического вида; жесткости пружин обозначены соответственно k_1, k_2, k'_2, k_3. Для вывода уравнений движения принимается, что рычаг обладает моментом инерции J относительно точки вращения – передаточное отношение $i = l_2/l_1$ – и характеризуется в данном случае изменением направления скоростей движения точек по концам рычага; свойства системы предполагаются линейными, трение отсутствует, а движения элементов системы считаются малыми.

Для построения математической модели системы (см. рисунок 1) вводится система координат y_1 и y_2 (относительно неподвижного базиса) и угол поворота рычага, обозначенный через φ. Полагаем, что выражения для расчета кинетической и потенциальной энергии можно представить в виде:

$$\mathrm{T} = \frac{1}{2} m_1 \dot{y}_1^2 + \frac{1}{2} J \dot{\phi}^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{y}_2^2; \tag{1}$$

$$\Pi = \frac{1}{2} k_1 (y_1 - z_1)^2 + \frac{1}{2} k_2 (y'_1 - y_1)^2 + \frac{1}{2} k'_2 (y'_2 - y_2)^2 + \frac{1}{2} k_3 y_2^2 . \tag{2}$$

В данном случае y'_1, y'_2 являются координатами концов твердого тела J или рычага второго рода, обладающего массоинерционными свойствами, поэтому $y'_1 = l_1\varphi$, а $y'_2 = l_2\varphi$. Внешние возмущения представлены кинематическим возмущением $z_1(t)$ опорной поверхности I (см. рисунок 1). Выбирается система координат, связанная с неподвижным базисом (y_1, y'_1, y_2). Между координатами y'_1 и y'_2 существует связь, формируемая устройством для преобразования движения.

Если учесть рычажные связи, привносимые твердым телом J, то можно получить соотношение между координатами y'_1 и y'_2 $y'_1/l_1 = y'_2/l_2$, откуда следует, что

$$y'_2 = iy'_1, \tag{3}$$

где $i = l_2/l_1$. При этом скорости $\dot{y}'_1$ и $\dot{y}'_2$ направлены в противоположные стороны. Существенное значение для определения кинетической энергии имеет учет возможных форм деформации упругих элементов k_2 и k'_2 при соответствующих сочетаниях y'_1 и y_1, а также y'_2 и y_2.

Если принять, что в упругом элементе k_2 потенциальная энергия определится как

$$\Pi_{k_2} = \frac{1}{2} k_2 (y' - y_1)^2, \tag{4}$$

то такая форма нагружения пружины k_2 предполагает, что y_1 и y'_1 двигаются синфазно, поэтому можно полагать деформацию пружины в виде $y'_1 - y_1$ (тогда потенциальная энергия определится выражением (4)). Однако при определенных условиях может возникнуть ситуация, при которой движения по координатам y_1 и y'_1 будут происходить в противофазе, тогда деформация пружины определится суммой координат $y_1 + y'_1$. В этом случае потенциальная энергия для упругого элемента k_2

$$\Pi = \frac{1}{2} k_2 (y_1 + y'_1)^2. \tag{5}$$

Значения потенциальной энергии, определяемые из уравнений (4) и (5), будут различными.

Вместе с тем при выборе определенных форм деформации элемента k_2 возможны разные формы нагружения упругого элемента k'_2. Возможные варианты соотношения форм деформации элементов k_2 и k'_2 можно представить следующим образом:

1) случай I: при $y_1 - y'_1$ и $y'_2 - y_2$ или $iy'_1 - y_2$;
2) случай II: при $y_1 - y'_1$ имеем $y'_2 + y_2$ или $-iy'_1 - y_2$;
3) случай III: при $y_1 + y'_1$ имеем $y'_2 - y_2$ или $iy'_1 - y_2$;
4) случай IV: при $y_1 + y'_1$ имеем $y'_2 + y_2$ или $-iy'_1 - y_2$.

Задача исследования заключается в оценке особенностей обратных связей, которые рассматриваются в структурных математических моделях, отражающих динамические свойства исходных механических систем.

II. Построение математических моделей.

Отметим, что твердое тело (см. рисунок 1), обладающее массоинерционными свойствами (момент инерции J), является в рамках поставленной задачи исследования рычажным устройством, обеспечивающим преобразования движении элементов системы. Математическая модель может быть построена на основе уравнения Лагранжа второго рода в предположении, что кинетическая энергия системы равна в данном случае сумме кинетических энергий составляющих частей. При этом особое внимание должно уделяться учету форм деформации упругих элементов. Предполагается, что в линейной системе силы трения отсутствуют, а движения системы являются малыми колебаниями относительно положении статического равновесия. Гармоническая сила прикладывается к элементу m_1 или через колебания $z_1(t)$ опорной поверхности I (см. рисунок 1). Если рассматривается система на рисунке 1, то выражения для вычисления кинетической и потенциальной энергии принимают вид с учетом определенных соотношений между координатами y_1, y'_1, y'_2 и y_2.

В зависимости от того, какой случай из приводимых вариантов рассматривается, будут получаться различные математические модели.

Рассмотрим математические модели и их структурные аналоги, относящиеся к расчетной схеме на рисунке 1, т. е. при связях, реализуемых рычажным механизмом второго рода [6].

1. Для случая I при $y_1 - y'_1$ и $iy'_1 - y_2$ уравнения движения имеют вид:

$$\begin{cases} m_1\ddot{y}_1 + y_1(k_1+k_2) - k_2y_1' = k_1z_1; \\ (J/l_1^2)\ddot{y}_1' + y_1'(k_2+k_2'i^2) - k_2'iy_2 - k_2y_1 = 0; \\ m_2\ddot{y}_2 + y_2(k_2'+k_3) - k_2'iy_1' = 0. \end{cases} \quad (6)$$

2. Для случая II при $y_1 - y'_1$ и $-iy'_1 - y_2$ соответственно получим:

$$\begin{cases} m_1\ddot{y}_1 + y_1(k_1+k_2) - k_2y_1' = k_1z_1; \\ (J/l_1^2)\ddot{y}_1' + y_1'(k_2+k_2'i^2) - k_2y_1 + k_2'iy_2 = 0; \\ m_2\ddot{y}_2 + y_2(k_2'+k_3) + k_2'iy_1' = 0. \end{cases} \quad (7)$$

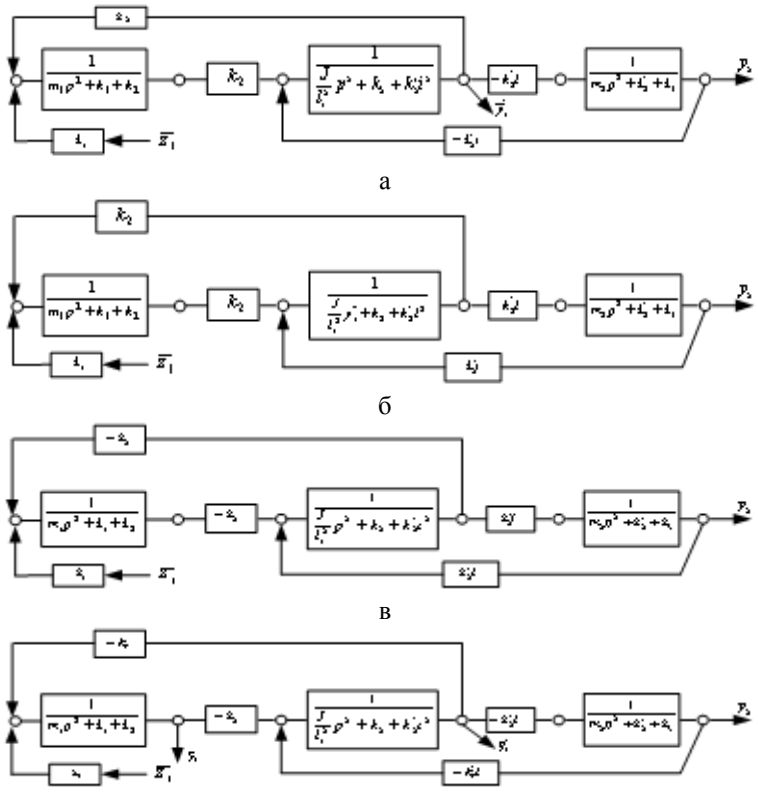
3. Для случая III при $y_1 + y'_1$ и $iy'_1 - y_2$ уравнения движения принимают вид:

$$\begin{cases} m_1\ddot{y}_1 + y_1(k_1+k_2) + k_2y_1' = k_1z_1; \\ (J/l_1^2)\ddot{y}_1' + y_1'(k_2+k_2'i^2) + k_2y_1 - k_2'iy_2 = 0; \\ m_2\ddot{y}_2 + y_2(k_2'+k_3) - k_2'iy_1' = 0. \end{cases} \quad (8)$$

4. Для случая IV при $y_1 + y'_1$ и $-iy'_1 - y_2$ соответственно получаем, что

$$\begin{cases} m_1\ddot{y}_1 + y_1(k_1+k_2) + k_2y_1' = k_1z_1; \\ (J/l_1^2)\ddot{y}_1' + y_1'(k_2+k_2'i^2) + k_2y_1 + k_2'iy_2 = 0; \\ m_2\ddot{y}_2 + y_2(k_2'+k_3) + k_2'iy_1' = 0. \end{cases} \quad (9)$$

На рисунке 2 приведены структурные схемы систем с тремя степенями свободы, соответствующие математическим моделям (6) – (9).



а

б

в

г

Рисунок 2 – Варианты структурных схем механической систем с рычажными связями при различных соотношениях форм движения по координатам y_1 и y_2: *а* – деформация пружин по условиям $y_1 - y'_1$ и $iy'_1 - y_2$; *б* – условия $y_1 - y'_1$ и $-iy'_1 - y_2$; *в* – условия $y_1 + y'_1$ и $iy'_1 - y_2$; *г* – условия $y_1 + y'_1$ и $-iy'_1 - y_2$

Сравнение вариантов показывает, что между случаями I – IV имеются определенные зависимости, отражающие разные виды межпарциальных связей:

$$\begin{array}{l} 1)\ y_1 - y'_1 \text{ и } iy'_1 - y_2 \Rightarrow +k_2,\ +k_2'i; \\ 2)\ y_1 - y'_1 \text{ и } -iy'_1 - y_2 \Rightarrow +k_2,\ -k_2'i; \\ 3)\ y_1 + y'_1 \text{ и } iy'_1 - y_2 \Rightarrow -k_2,\ +k_2'i; \\ 4)\ y_1 + y'_1 \text{ и } -iy'_1 - y_2 \Rightarrow -k_2,\ -k_2'i. \end{array} \quad (10)$$

III. Исключение координаты φ, или y'_1 (y'_2).

1. Рассмотрим случай I при $J \to 0$. Используя соотношение, полученное из системы (6) для определения y'_1, найдем, что

$$y'_1 = \frac{k_2 y_1 - k'_2 i y_2}{k_2 + k'_2 i^2} = a y_1 + b y_2, \quad (11)$$

где

$$a = k_2 / (k_2 + k'_2 i^2); \quad (12)$$

$$b = k'_2 i / (k_2 + k'_2 i^2). \quad (13)$$

В этом случае система уравнений (6) трансформируется к виду (после преобразований Лапласа):

$$\bar{y}_1 (m_1 p^2 + k_1 + k_2 - a k_2) - b k_2 \bar{y}_2 = k_1 \bar{z}_1; \quad (14)$$

$$\bar{y}_2 (m_2 p^2 + k'_2 + k_3 - b k'_2 i) - a k'_2 i \bar{y}_1 = 0, \quad (15)$$

где $p = j\omega$ – комплексная переменная, значок <–> соответствует изображению по Лапласу [1].

Структурная схема системы приведена на рисунке 3, из которой можно найти передаточные функции вида:

$$W_1(p) = \frac{\bar{y}'_1}{k_1 \bar{z}_1} = \frac{m_2 p^2 + k'_2 + k_3 - b k'_2 i}{A_0}; \quad (16)$$

$$W_2(p) = \frac{\bar{y}_2}{k_1 \bar{z}_1} = \frac{a k'_2 i}{A_0}, \quad (17)$$

где A_0 – частотное характеристическое уравнение:

$$A_0 = \begin{pmatrix} m_1 p^2 + k_1 + \\ + k_2 - a k_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} m_2 p^2 + k'_2 + \\ + k_3 - b k'_2 i \end{pmatrix} - ab k_2 k'_2 i = 0. \quad (18)$$

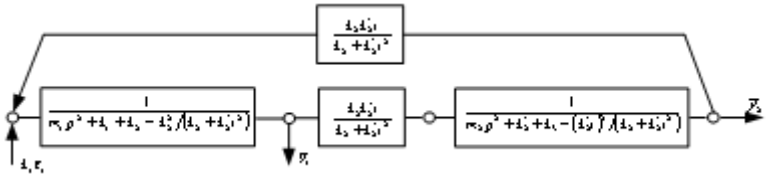


Рисунок 3 – Структурная схема системы при исключении координаты y'_1 и $J \to 0$

С учетом уравнений (12) и (13) частотное уравнение (18) может быть приведено к виду:

$$\begin{pmatrix} m_1 p^2 + k_1 + \\ + k_2 - \dfrac{k_2^2}{k_2 + k'_2 i^2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} m_2 p^2 + k'_2 + \\ + k_3 - \dfrac{(k'_2 i)^2}{k_2 + k'_2 i^2} \end{pmatrix} - \left(\frac{k_2 k'_2 i}{k_2 + k'_2 i^2} \right)^2 = 0. \quad (19)$$

Отметим, что при кинематическом возмущении $z_1(t)$ в системе возможен режим динамического гашения на частоте

$$\omega^2_{\text{дин}} = \frac{k'_2 + k_3 - \frac{(k'_2 i)^2}{k_2 + k'_2 i^2}}{m_2} = \frac{k_3 + \frac{k_2 k'_2}{k_2 + k'_2 i^2}}{m_2}. \quad (20)$$

2. Для случая, когда выполняется условие $y_1 - y'_1$ и $-iy'_1 - y_2$, система уравнений движения при $J \to 0$, примет вид:

$$\bar{y}_1 \left(m_1 p^2 + k_1 + k_2 - \frac{k_2^2}{k_2 + k'_2 i^2} \right) + \frac{k_2 k'_2 i}{k_2 + k'_2 i^2} \cdot \bar{y}_2 = k_1 \bar{z}_1; \quad (21)$$

$$\bar{y}_2 \left(m_2 p^2 + k'_2 + k_3 - \frac{(k'_2 i)^2}{k_2 + k'_2 i^2} \right) + \frac{k_2 k'_2 i}{k_2 + k'_2 i^2} \bar{y}_1 = 0. \quad (22)$$

Структурная схема системы в данном случае приводится к виду, показаному на рисунке 4.

Для межпарциальных связей выполняется условие $-k'_2 ia = k_2 b$, что приводит к соотношению $\frac{k_2 k'_2 i}{k_2 + k'_2 i^2} = \frac{k_2 k'_2 i}{k_2 + k'_2 i^2}$. Таким образом, симметрия межпарциальных связей сохраняется.

3. Для случая III выражение для потенциальной энергии имеет вид

$$\Pi = \frac{1}{2} k_1 y_1^2 + \frac{1}{2} k_2 (y_1 + y'_1)^2 + \frac{1}{2} k'_2 (iy'_1 - y_2)^2 + \frac{1}{2} k_3 y_2^2, \quad (23)$$

а для случая IV соответственно:

$$\Pi = \frac{1}{2} k_1 y_1^2 + \frac{1}{2} k_2 (y_1 + y'_1)^2 + \frac{1}{2} k'_2 (-iy'_1 - y_2)^2 + \frac{1}{2} k_3 y_2^2. \quad (24)$$

Уравнения движения в системах координат y_1 и y_2 приобретают соответствующие различия.

1. Для случая III получим, что

$$\bar{y}_1 \left(m_1 p^2 + k_1 + k_2 - \frac{k_2^2}{k_2 + k'_2 i^2} \right) + \frac{k_2 k'_2 i}{k_2 + k'_2 i^2} \bar{y}_2 = k_1 \bar{z}_1; \quad (25)$$

$$\bar{y}_2 \left(m_2 p^2 + k'_2 + k_3 - \frac{(k'_2 i)^2}{k_2 + k'_2 i^2} \right) + \frac{k_2 k'_2 i}{k_2 + k'_2 i^2} \bar{y}_1 = 0. \quad (26)$$

2. Для случая IV соответственно:

$$\bar{y}_1 \left(m_1 p^2 + k_1 + k_2 - \frac{k_2^2}{k_2 + k'_2 i^2} \right) - \frac{k_2 k'_2 i}{k_2 + k'_2 i^2} \bar{y}_2 = k_1 \bar{z}_1; \quad (27)$$

$$\bar{y}_2 \left(m_2 p^2 + k'_2 + k_3 - \frac{(k'_2 i)^2}{k_2 + k'_2 i^2} \right) - \frac{k_2 k'_2 i}{k_2 + k'_2 i^2} \bar{y}_1 = 0. \quad (28)$$

На рисунке 5 приведены структурные схемы, из которых следует, что учет форм движения по отдельным координатам, в частности, y_1 и y_2, связан с появлением межпарциальных связей того или иного знака. Отметим, что структурные схемы на рисунках 3 и 5, *б*, а также на рисунках 4 и 5, *а* совпадают, что отражает свойства симметрии межпарциальных связей. Соотношение знаков таковы, что при случаях I и IV межпарциальные связи имеют положи-

тельные знаки. В случаях II и III знаки межпарциальных связей отрицательные, что характеризует формы движения элементов m_1 и m_2 в плане определения особенностей движения элементов по признакам: движения с одинаковой фазой или движения противофазны.

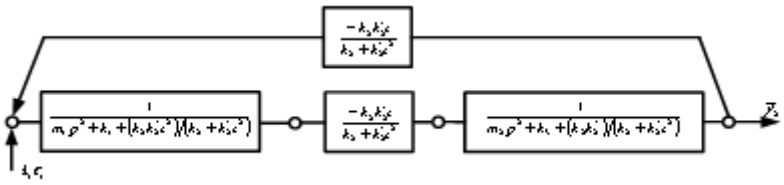
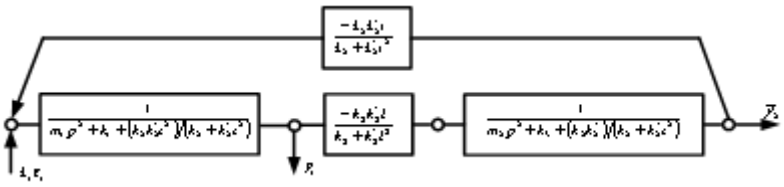
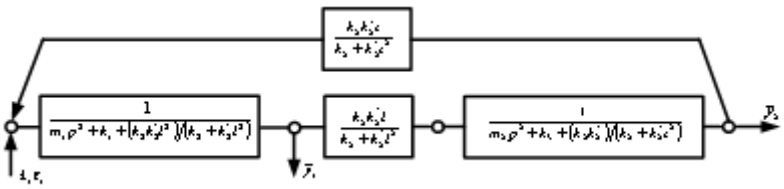


Рисунок 4 – Структурная схема системы с исключенной координатой y'_1 при $J = 0$



а



б

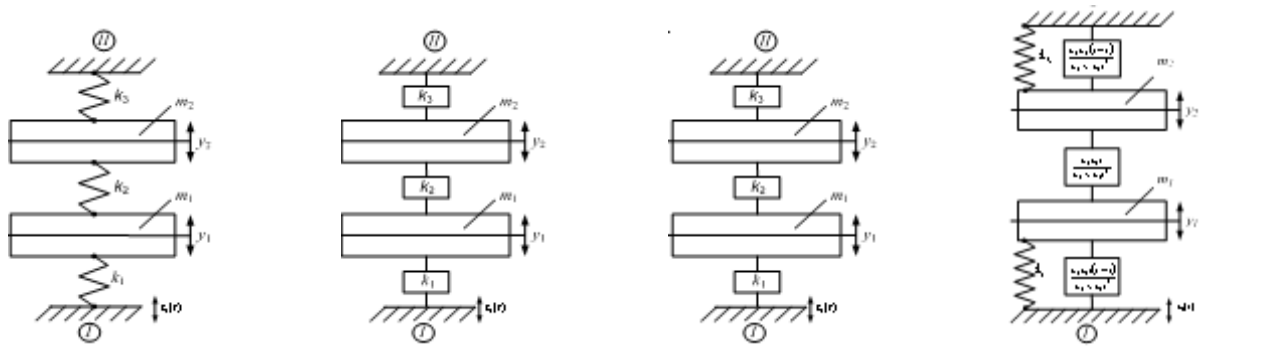
Рисунок 5 – Структурные схемы для случаев III и IV при исключенных y'_1:
а – отрицательная межпарциальная связь; *б* – положительная межпарциальная связь

IV. Особенности соотношения форм совместных движений. Структурные схемы, представленные на рисунках 2 – 5, могут быть использованы для построения эквивалентных расчетных схем, когда механическая система с рычажными устройствами может интерпретироваться как механическая колебательная система цепного вида. Отдельные аспекты эквивалентных представлений в механических колебательных системах рассмотрены в работах [7, 8].

На рисунке 6 показаны варианты представления расчетных схем системы с рычажными устройствами с учетом ранее рассмотренных случаев I – IV соотношений в формах движений по координатам y_1 и y_2. На рисунках 6, *а, б* показана обычная расчетная схема цепного типа при упругой связи между координатами y_1 и y_2 через упругий элемент с жесткостью k_2. На рисунках 6, *в, г* представлены расчетные схемы систем, имеющих рычажные связи, приведенных к эквивалентным схемам цепного вида с упругими элементами более сложной структуры.

Расчетная схема, приведенная на рисунке 6, *в*, соответствует случаям II и III, для которых характерны деформации упругих элементов k_2 и k'_2 по соотношения координат $y_1 - y'_1$ и $iy'_1 - y_2$ соответственно, что связано с отрицательной межпарциальной связью, определяемой приведенной жесткостью $-\dfrac{k_2 k'_2 i}{k_2 + k'_2 i^2}$.

На рисунке 6, *г* представлена расчетная схема для механической системы с рычажной связью при учете взаимного расположения координат по упругим элементам k_2 и k_2' в виде $y_1 + y'_1$ и $-iy'_1 - y_2$ соответственно. В таком случае межпарциальная связь является положительной и определяется приведенной жесткостью $+\dfrac{k_2 k'_2 i}{k_2 + k'_2 i^2}$, как показано на рисунке 6, *г*.



а б в г

Рисунок 6 – Сопоставление расчетных схем механических систем с обычными и дополнительными (рычажными связями): *а* – расчетная схема цепного вида с упругими элементами k_1, k_2, k_3; *б* – расчетная схема с упругими элементами, отображаемыми блоками; *в* – расчетная схема для системы с отрицательной межпарциальной связью (сл. II, III); *г* – расчетная схема системы с положительной межпарциальной связью (случаи I – IV)

В отличие от представлений, связанных с оценкой динамических свойств обычной цепной системы с двумя степенями свободы (рисунки 6, *а*, *б*), рычажные связи привносят изменения, которые затрагивают значения парциальных частот, собственных частот и частот динамического гашения.

Если для сопоставления выбрать соотношения координат по случаям I и IV, как соответствующие естественной форме самоорганизации движения, то парциальная частота в соответствии со структурной схемой на рисунке 6, *б* определяется так:

$$n_1^2 = \frac{k_1\left(k_2 + k_2' i^2\right) + k_2 k_2' i \cdot (i+1)}{m_1\left(k_2 + k_2' i^2\right)}; \tag{29}$$

$$n_2^2 = \frac{k_3\left(k_2 + k_2' i^2\right) + k_2 k_2' i \cdot (i-1)}{m_2\left(k_2 + k_2' i^2\right)}. \tag{30}$$

При $i = 1$ из выражения (29) следует, что

$$n_1^2 = \frac{k_1 k_2 + k_1 k_2' + 2k_2 k_2'}{m_1\left(k_2 + k_2'\right)} = \left(k_1 + \frac{2k_2 k_2'}{k_2 + k_2'}\right) \cdot \frac{1}{m_1}. \tag{31}$$

Приведенная жесткость в парциальной системе $m_1 p^2$ имеет вид:

$$k_{\text{пр}_1} = k_1 + \frac{2k_2 k_2'}{k_2 + k_2'}, \tag{32}$$

что соответствует определению квазипружины [9]. Во второй парциальной системе приведенная жесткость:

$$k_{\text{пр}_2} = k_3. \tag{33}$$

Что касается коэффициента жесткости межпарциальной связи, то он определяется как параметр последовательного соединения пружин k_2 и k_2' при $i = 1$.

V. Некоторые особенности проявления рычажных связей в динамике механических колебательных систем. Отметим, что учет рычажных взаимодействий, в методологическом плане, проводится на основе упрощенных представлений о взаимодействиях, привносимых твердым телом с неподвижной точкой опоры (см. рисунок 1), где т. *О* является неподвижной. В исходной ситуации механическая система имеет три степени свободы и затем упрощается при моменте инерции твердого тела $J \to 0$, при этом из уравнения движения исключается координата y'_1. Наличие в исходной ситуации трех степеней свободы предопределяет большое

разнообразие движений, что является основой формирования рассмотренных выше соотношений координат деформации пружин k_2 и k_2', относящихся к случаям I–IV. На рисунке 7 приведена расчетная схема, в которой представлены соотношения координат, соответствующие случаю I (и случаю IV при инверсии движения). Потенциальная энергия системы определяется выражением:

$$\Pi = \frac{1}{2}k_1(y_1 - z_1)^2 + \frac{1}{2}k_2(y_1' - y_1)^2 + \frac{1}{2}k_2'(iy_1' - y_2)^2 + \frac{1}{2}k_3 y_2^2. \quad (34)$$

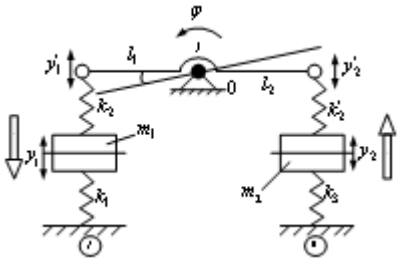


Рисунок 7 – Расчетная схема для системы с рычажными связями для соотношений по случаям I и IV

В данном случае движения реализуется первая форма колебаний для системы с двумя степенями свободы, когда два элемента имеют возможность колебаться синфазно с одной частотой. В исходной системе (см. рисунок 1) – при $J \to 0$.

Передаточная функция системы при входном сигнале $Q_1 = k_1 z$ и входном – $\bar{y}_1$ имеет вид:

$$W_1(p) = \frac{\bar{y}_1}{\bar{Q}_1} = \frac{m_2 p^2 + k_3 + \dfrac{k_2 k_2' i(i+1)}{k_2 + k_2' i^2}}{A_0}, \quad (35)$$

где A_0 определяется выражением (18). Частота динамического гашения может быть найдена по уравнению:

$$\omega_{1\text{дин}}^2 = \frac{k_3\left(k_2 + k_2' i^2\right) + k_2 k_2' i\left(i+1\right)}{m_2\left(k_2 + k_2' i^2\right)}, \quad (36)$$

что совпадает с парциальной частотой n_2 из выражения (30).

При возмущении $\bar{Q}_1$ на частоте $\omega_{1\text{дин}}$ реализуется режим динамического гашения колебаний; при возрастании частоты колебаний внешней силы $\bar{Q}_1$ до значения $\omega_{1\text{дин}}$ элементы m_1 и m_2 колеблются синфазно; при этом значения амплитуды колебаний по координатам y_1 и y_2 будут по величине равными, но они образуют первую форму колебаний. При переходе через режим динамического гашения элементы m_1 и m_2 начнут двигаться в противофазе, образуя другую форму колебаний (встречного движения) на более высоких частотах.

При изменении соотношения движений по координатам y_1 и y_2, что может быть достигнуто специальными приемами, состояние системы будет определяться потенциальной энергией в измененной форме в соответствии с выражением:

$$\Pi = \frac{1}{2}k_1(y_1 - z_1)^2 + \frac{1}{2}k_2(y_1' - y_1)^2 + \frac{1}{2}k_2'(-iy_1' - y_2)^2 + \frac{1}{2}k_3 y_2^2. \quad (37)$$

В этом случае парциальная частота системы n_2 останется неизменной по отношению к рассмотренной выше ситуации, той же остается и частота динамического гашения. Таким образом, можно полагать, что учет деталей взаимодействия элементов подтверждает возможность представления эквивалентных расчетных схем по отношению к исходной схеме (см. рисунок 1) в двух формах, использующих отрицательные и положительные межпарциальные связи.

Рычажные связи в динамике механических колебательных систем играют существенную роль, акцентируя внимание на динамические состояния с устойчивыми соотношениями, соблюдаемыми в движениях по отдельным координатам.

1. Учет рычажных связей и их особенностей, если иметь в виду построение математических моделей, возможен на интерпретациях рычажного механизма, создающего определенные связи, предварительным введением твердого тела с неподвижной точкой опоры. Такое промежуточное звено при уменьшении момента инерции ($J \to 0$) обеспечивает необходимый формализм упрощения системы и выделения рычажных связей.

2. Рычажные связи, создаваемые механизмами различного вида, по существу являются аналогичными. Однако различия между типами рычажных механизмов имеют конструктивно-технические основы, определяющие возможности динамического синтеза конкретных систем, например, в различных задачах динамики машин, в том числе вибрационной защиты.

3. Различие между типами рычажных механизмов и возникающих при этом связей имеет значение при учете особенностей, возникающих при различных типах внешних возмущений, в частности, со стороны опоры рычага. В таких ситуациях рычажные связи будут зависеть от типа рычажного механизма.

4. Рычажные связи выступают в качестве средства, формирующего упругие комплексы, приведенная жесткость которых зависит от передаточных отношений рычага, определяя приведенную жесткость. Такие упругие комплексы могут быть названы квазипружинами, поскольку сами по себе такие структурные образования ведут себя в преобразованиях структурных математических моделей, как обычные пружины.

5. Механической колебательной системе с рычажными связями может быть сопоставлена эквивалентная в динамическом отношении расчетная схема с приведенными жесткостями и межпарциальными связями двух типов (положительными и отрицательными).

6. Рычажные связи привносят в исходные механические системы новые динамические свойства и режимы динамических состояний при действии различных периодических внешних возмущений.

Список литературы

1. Елисеев, С. В. Мехатронные подходы в динамике механических колебательных систем [Текст] / С. В. Елисеев, Ю. Н. Резник, А. П. Хоменко. – Новосибирск: Наука, 2011. – 384 с.

2. Елисеев, С. В. Динамическое гашение колебаний. Концепция обратной связи и структурные методы математического моделирования [Текст] / С. В. Елисеев, А. П. Хоменко. – Новосибирск: Наука, 2014. – 357 с.

3. Механизмы в упругих колебательных системах: особенности учета динамических свойств, задачи вибрационной защиты машин, приборов и оборудования [Текст] / А. П. Хоменко, С. В. Елисеев и др. / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2013. – 187 с.

4. Лаврусь, В. В. Совершенствование пневматических рычажно-шарнирных систем железнодорожного транспорта [Текст]: автореф. дис… канд. техн. наук. – Орел, 2006. – 20 с.

5. Иванов, Б. Г. Разработка методов расчета динамики и прочности агрегатов транспортной техники с рычажно-шарнирными связями [Текст]: автореф. дис… д-ра техн. наук. – Самара, 2007. – 48 с.

6. Крейнин, П. Г. Справочник по механизмам [Текст] / П. Г. Крейнин. – М.: Машиностроение, 1986. – 512 с.

7. Елисеев, С. В. Динамические свойства колебательных систем. Связность движений [Текст] / С. В. Елисеев, А. И. Артюнин // Информационные и математические технологии в науке и управлении / Труды XIX Байкальской всерос. конф. 2014, С. 89 – 99.

8. Хоменко, А. П. Возможности эквивалентных представлений механических систем с угловыми колебаниями твердых тел [Текст] / А. П. Хоменко, С. В. Елисеев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2014. – № 2 (42). – С. 8 – 15.

9. Хоменко, А. П. Квазиэлементы в механических колебательных системах. Особенности систем при исключении переменных динамического состояния [Текст] / А. П. Хоменко, С. В. Елисеев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2013. – № 2 (38). – С. 8 – 17.

References

1. Eliseev S. V., Reznik Yu. N., Khomenko A. P. *Mehatronnye podhody v dinamike mehanicheskih koleba-tel'nyh sistem* (Mechatronic approaches in the dynamics of mechanical vibrations-enforcement systems). Novosibirsk: Nauka, 2011, 384 p.

2. Eliseev S. V., Khomenko A. P. *Dinamicheskoe gashenie kolebanii. Koncepcija obratnoi svjazi i struk-turnye metody matematicheskogo modelirovanija* (Dynamic vibration damping. The concept of feedback and structural methods of mathematical modeling). Novosibirsk: Nauka, 2014, 357 p.

3. Khomenko A. P., Eliseev S. V., Artyunin A. I., Parshuta E. A., Kaimov E. V. *Mehanizmy v uprugih kole-batel'nyh sistemah: osobennosti ucheta dinamicheskih svoistv, zadachi vibracionnoi zashity mashin, priborov i oborudovanija* (Mechanisms in elastic-Cola vibrational systems: the features of the account of the dynamic properties, the problem of the vibration protection of machines, instruments and equipment). Irkutsk, 2013, 187 p.

4. Lavrov V. V. *Sovershenstvovanie pnevmaticheskih rychazhno-sharnirnyh sistem zheleznodorozhnogo transporta* (Perfection pneumatic lever-hinge rail systems). Ph. D. thesis, Orel, 2006, 20 p.

5. Ivanov B.G. *Razrabotka metodov rascheta dinamiki i prochnosti agregatov transportnoi tehniki s ry-chazhno-sharnirnymi svjazjami* (Development of methods for calculating the dynamics and strength of units of transport equipment with lever-hinge connections). Ph. D. thesis, Samara, 2007, 48 p.

6. Kreynin P. G. *Spravochnik po mehanizmam* (Manual mechanisms). Moscow: Mechanical engineering, 1986, 512 p.

7. Eliseev S.V., Artyunin A.I. Dynamic properties of oscillating systems. Connectivity movements [Dinamicheskie svoistva kolebatel'nyh sistem. Svjaznost' dvizhenii]. *Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii* (Information Technology and Mathematical Sciences and Management). – Irkutsk, 2014, pp. 89 – 99.

8. Khomenko A. P., Eliseev S. V. capabilities equivalent representations of mechanical systems with angular oscillations of solids [Vozmozhnosti yekvivalentnyh predstavlenii mehanicheskih sistem s uglovymi kolebanijami tverdyh tel]. *Sovremennye tehnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Simulation*, 2014, no 2 (42), pp. 8 – 15.

9. Khomenko A. P. Eliseev S. V. Quasielementy in mechanical vibrating systems. Features of systems to the exclusion of the dynamic state variables [Kvaziyelementy v mehanicheskih kolebatel'nyh sistemah. Osobennosti sistem pri isklyuchenii peremennyh dinamicheskogo sostojanija]. *Sovremennye tehnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Simulation*, 2013, no 2 (38), pp. 8 – 17.

УДК 629.471

И. И. Лакин

НЕЧЕТКИЕ МНОЖЕСТВА В СИСТЕМЕ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ЛОКОМОТИВНОГО КОМПЛЕКСА

В статье предлагается использовать теорию нечетких множеств в системе поддержки принятия решений (СППР) информационно-управляющих систем локомотивного комплекса. Для этого предлагается метод

перевода лингвистических утверждений на язык математической логики. Предлагаемый метод внедряется по принципу «встроенное качество» в единой информационно-управляющей системе мониторинга технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов сервисной компании ООО «ТМХ-Сервис» и управляющей компании ООО «Локомотивные технологии».

В современных информационных системах локомотивного комплекса (АСУТ, ЦОММ, АС ПУЛ и др.) [1] управляющие функции сводятся к логическому контролю правильности действий персонала депо. Система поддержки принятия решений сводится в основном к системе отчетов и справок с выделением информации цветом. Имеются интерактивные функции, связанные с рассылкой SMS-сообщений, электронных писем и выводом сообщений на экран в случаях, если системой обнаружены события, требующие вмешательства соответствующих работников локомотивного комплекса. Актуальной задачей является разработка собственно системы поддержки принятия решений (СППР), которая бы выявляла эти опасные события, тенденции.

Методики СППР наиболее глубоко проработаны применительно к задачам риск-менеджмента и нашли свое отражение в ряде стандартов [2 – 4]. Риск определяется как сочетание вероятности нанесения ущерба и его тяжести. Основными рисками в локомотивном комплексе являются отказы локомотивов и нарушения (ошибочные действия) со стороны локомотивных бригад. Отказ (неисправность) локомотива или ошибки локомотивной бригады являются риском R появления отказа перевозочного процесса**.** Риск $R \in [0, 1]$ является совокупностью рисков R_i возникновения различных неисправностей локомотива и нарушений бригад, которые могут привести к отказу перевозочного процесса. Тяжесть отказа можно учесть через весовой коэффициент последствий отказа локомотива m_i:

$$R = 1 - \Pi (1 - m_i \cdot R_i). \quad (1)$$

Опасные события i должны быть независимыми. Например, проезд запрещающего светофора и столкновение могут произойти одновременно. Число возможных опасных событий i можно определить эмпирически из анализа статистики отказов локомотивов или аналитически с использованием методики ГОСТ Р ИСО 31000-2010.

Риск R_i обусловлен рядом факторов влияния. Например, пробой изоляции ТЭД обусловлен перегревом ТЭД в эксплуатации, нарушением технологии пропитки обмоток, перенапряжением, старением изоляции и др.:

$$R_i = 1 - \Pi (1 - R_{ik}), \quad (2)$$

где R_{ik} – риск наступления отказа i из-за фактора k.

Не каждый инцидент (проявление фактора k) приводит к наступлению отказа i. Поэтому согласно FMEA и стандартам ОАО «РЖД» по управлению рисками расчет индекса влияния производится по формуле:

$$R_{ik} = K_{ik} \cdot Q_{ik}, \quad (3)$$

где Q_{ik} – вероятность опасного события (проявления фактора);

K_{ik} – коэффициент влияния фактора на риск опасного события $K_{ik} \in [0, 1]$.

Практическая реализация управления рисками сталкивается с рядом проблем. Например, при определении весового коэффициента $m_i \in [0, 1]$: на практике часто используют экспертную оценку (например, метод Дельфи [5]) с интуитивным отнесением влияния к предполагаемому диапазону на основании жизненного опыта (таблица 1). Таким образом, происходит отход от четкой математики к нечетким «интуитивным» понятиям. Результаты анализа также часто используют не в числовом виде, а как принадлежащие к одному из множеств (таблица 2). Таким образом, использование классических подходов статистических методов оценки рисков нуждается в дальнейшем развитии.

Таблица 1 – Нечеткие множества уровня ущерба m_i

Значение m_i	Уровень ущерба
0 – 4	Несущественный: отказ третьей категории, повлекший за собой дополнительные расходы, но не нарушивший перевозочного процесса
5 – 19	Малый: отказ второй категории, несущественно повлиявший на перевозочный процесс
20 – 39	Ощутимый: отказ первой категории, ощутимо повлиявший на перевозочный процесс одного или нескольких поездов
40 – 59	Существенный: отказ первой категории, приведший к остановке движения на полигоне и (или) дорогостоящему ремонту
60 – 79	ЧП: согласно приказу Минтранса № 163
80 – 94	Авария: согласно приказу Минтранса № 163
95 – 100	Крушение: согласно приказу Минтранса № 163

Таблица 2 – Множества уровней риска

Значение R	Уровень риска
0 – 4	Маловероятно
5 – 19	Неопасно
20 – 39	Возможно
40 – 59	Достаточно опасно
60 – 79	Опасно
80 – 94	Очень опасно
95 – 100	Неизбежно

Нечеткие множества.

Дополнением к статистическим и вероятностным методам управления рисками предлагается применение методов нечеткой логики (Fuzzy Sets), которые в последние десятилетия нашли широкое применение в промышленности [6 – 8]. Теория предложена американским математиком и логиком Лотфи Задэ, который разработал метод учета особенностей логических построений при использовании людьми понятий, не имеющих четких числовых границ. При этом получают не только правильный, но и более точный результат.

Рассмотрим пример. Из теории электрической тяги известно, что если полновесный поезд на руководящим подъеме будет следовать со скоростью ниже заданной, то возникнет риск выхода из строя тяговых электродвигателей (ТЭД). Причиной является перегрев изоляции: известно, что минимальная скорость на подъемах устанавливается именно для исключения риска перегрева ТЭД.

Приведенное логическое утверждение о риске перегрева ТЭД при низкой скорости является для инженеров очевидным. Но при попытке переложить это утверждение на язык компьютера возникают проблемы: что такое «полновесный» поезд? Если установленная масса поезда 6000 т, то 5999 т – это уже не полновесный поезд? И какую скорость следует считать «ниже заданной»? Если задана минимальная скорость 60 км/ч, то 59,9 км/ч уже приведет к отказу ТЭД? И как быть, если скорость была ниже заданной не на всем подъеме, а только на его часть? Например, из 100 % подъема только на 30 % подъема скорость была недопустимой, то каков риск отказа ТЭД? Выясняется, что утверждение о риске выхода из строя ТЭД не так просто формализовать. Аналогичные примеры типичны для управления: определение перепробега локомотива как +10% от норматива не позволит увидеть риск при перепробеге +9,9%. Также трудно четко определить такие понятия, как «старый локомотив», «ненадежный локомотив», «нарушение режима эксплуатации», «опасное боксование или юз», «низкая квалификация машиниста или обслуживающего персонала», «повышенный износ» и др.

Приведенные примеры сложности определения границ понятий являются широко распространенными во всех областях техники. Отметим, что проблема была известна в Древней Греции, где софисты задавались, например, вопросом: на каком удаленном зернышке куча зерен перестанет быть кучей? Выход из ситуации был предложен в 60-е гг. XX в. американским ученым Лотфи Заде [6], предложившим отказаться от четких границ множеств и утверждений по принципу «принадлежит – не принадлежит», а использовать нечеткие границы

множеств. В теории нечетких множеств (Fuzzy Sets) основным понятием является собственно нечеткое множество A, которое задается множеством входящих в него элементов $x \in X$ и функцией принадлежности $\mu_A(x) \in [0, 1]$ этих элементов к множеству: $A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\}$.

Рассмотрим пример. Применительно к нечеткому множеству A «полновесный поезд» в приведенном выше примере множество весов поезда X будет иметь диапазон от 0 до 9 тыс. т: $X = [0, 9000]$. Масса поезда $x > 6000$ т будет иметь функцию принадлежности к полновесным поездам $\mu_A(y) = 1$ (100%), масса поезда $x < 4000$ т ($4000 < x < 6000$) будет иметь функцию принадлежности $\mu_A(y) = 0$ (0%), масса поезда от 4000 до 6000 т будет иметь линейно изменяющуюся функцию принадлежности $\mu_A(x)$, как показано на рисунке 1, а.

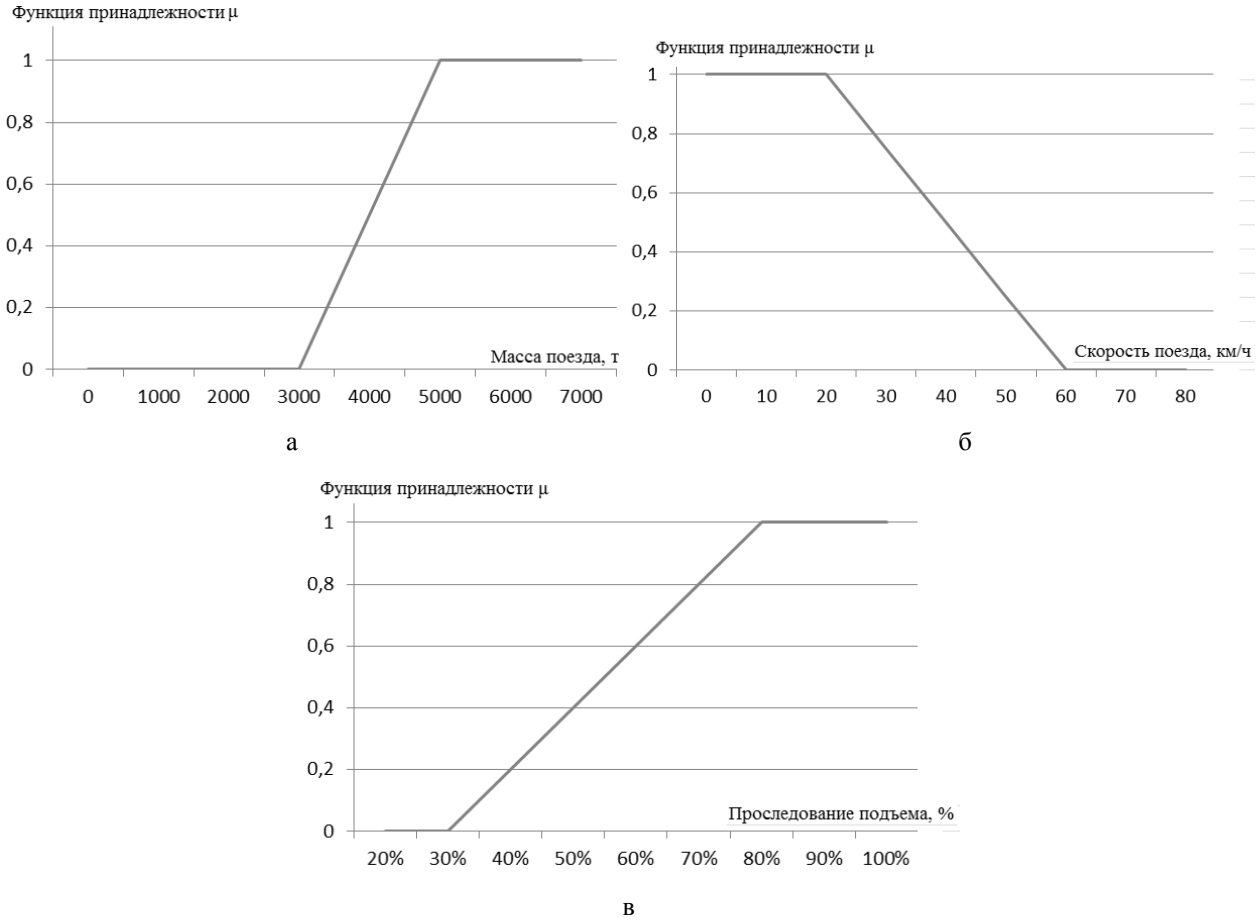


Рисунок 1 – Примеры функций принадлежности к нечетким множествам:
а – принадлежность поезда к тяжеловесным;
б – принадлежность скорости к нарушению скоростного режима на руководящем подъеме;
в – принадлежность к следованию на руководящем подъеме с нарушением скоростного режима

Нечеткое множество B «скорость ниже заданной» в приведенном выше примере будет иметь множество скоростей поезда Y в диапазоне от 0 до 110 км/ч. Скорость $y < 30$ км/ч будет иметь функцию принадлежности $\mu_B(y) = 1$ (100 %), скорость $y > 60$ км/ч будет иметь функцию принадлежности $\mu_B(y) = 0$ (0 %), а скорость в диапазоне от 30 до 60 км/ч ($30 < y < 60$) будет иметь линейно изменяющуюся функцию принадлежности, как показано на рисунке 1, б:

$$B = \{(y, \mu_B(y)) \mid y \in Y\}. \quad (4)$$

Нечеткое множество C «проследование руководящего подъема со скоростью ниже заданной» будет иметь множество процента проследования Z в диапазоне от 0 до 100 %. Процент $z < 30$ % будет иметь функцию принадлежности $\mu_C(x) = 0$ (0 %), процент $z > 80$ % будет иметь функцию принадлежности $\mu_A(x) = 1$ (100 %), а процент в диапазоне от 30 до 80 % будет иметь линейно изменяющуюся функцию принадлежности, как показано на рисунке 1, в:

$$C = \{(z, \mu_C(z)) \mid z \in Z\}. \quad (5)$$

Тогда логическое утверждение «если полновесный поезд (нечеткое множество A = {(x, $\mu A(x)$) | $x \in X$}) проследует руководящий подъем (нечеткое множество C = {(z, $\mu_C(z)$) | $z \in Z$}) со скоростью ниже заданной (нечеткое множество B = {(y, $\mu_B(y)$) | $y \in Y$}) будет определять риск R отказа ТЭД по формуле:

в четкой логике: $R = A$ *and* B *and* C , где возможны два значения: есть риск (R = истина, 1) и нет риска (R = ложь, 0);

в нечеткой логике: $R = \mu A(x) \cdot \mu_B(y) \cdot \mu_C(z)$, где риск определяется в диапазоне от 0 до 1 (от 0 до 100 %).

В рассматриваемом примере при следовании поезда массой 2000 т со скоростью 90 км/ч по всему руководящему подъему риск R отказа ТЭД будет отсутствовать:

$$R = 0 \cdot 0 \cdot 0 = 0. \quad (6)$$

При следовании с поездом массой 6000 т со скоростью 20 км/ч весь руководящий подъем можно утверждать, что ТЭД обязательно выйдет из строя:

$$R = 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1 \ (100\ \%). \quad (7)$$

При следовании с поездом массой 4000 т со скоростью 50 км/ч 50 % руководящего подъема можно утверждать, что риск R отказа ТЭД.

$$R = 0{,}5 \cdot 0{,}2 \cdot 0{,}4 = 0{,}04 \ (4\ \%). \quad (8)$$

Если за время наблюдения несколько раз нарушался режим следования по руководящему подъему (например, R_1 = 0,04, R_2 = 0,1, R_3 = 0,3), то риск R выхода ТЭД из строя будет определяться по формуле:

$$R = 1 - \Pi\,(1 - R_i) = 1 - (1 - 0{,}04)(1 - 0{,}1)(1 - 0{,}3) = 0{,}395 \ (39{,}5\ \%). \quad (9)$$

Если число двигателей на локомотиве N = 8, то общий риск

$$R_8 = 1 - (1 - R)\text{^}N = 1 - (1 - 0{,}395)\text{^}8 = 0{,}98 \ (98\ \%). \quad (10)$$

Лингвистические утверждения согласно мировой практике являются обобщением жизненного опыта специалистов отрасли. Применительно к задаче управления надежностью локомотивов и рисками их отказов лингвистические утверждения будут иметь следующий вид:

при запуске дизеля без прокачки масла при низкой температуре окружающей среды есть риск повышенного износа и выхода из строя механических частей дизеля;

при отключении дизеля при повышенной температуре воды и (или) масла есть риск возникновения течи;

при боксовании и больших токах есть риск кругового огня по коллектору;

при многократном срабатывании защиты при больших токах есть риск пробоя изоляции ТЭД;

если при повышенной влажности не прогреть ТЭД, то есть риск пробоя изоляции.

Таким образом, использование нечетких множеств позволяет преодолеть недостатки классических методов управления рисками и расширить возможности уже существующих информационных систем в части поддержки принятия решений за счет формализации использования лингвистических утверждений о возможных рисках.

Определение функций принадлежности.

Для практической реализации описанной выше методики необходимо определить функции принадлежности ($\mu_A(x) \cdot \mu_B(y) \cdot \mu_C(z)$). В рассмотренном примере обоснована только стопроцентная принадлежность (μ = 1), когда точно поезд полновесный, скорость допустимая и весь подъем пройден в одном режиме. В литературе обычно описывается линейный переход от μ = 1 к μ = 0 и наоборот. При этом и выбор значения параметра, при котором достигается значение μ = 0, тоже носит экспертный характер [7, 8]. Применительно к задачам управления рисками отказов локомотивов с использованием теории локомотивной тяги можно четко описать функцию переходов.

Рассмотрим пример. Допустимая масса поезда определяется коммерческими соображениями. После установления необходимой массы поезда (в примере m = 6000 т) проводятся тяговые испытания, в процессе которых определяется минимально допустимая скорость $V_{\min}$ на руководящем подъеме из условия отсутствия перегрева ТЭД. Возможна обратная задача, когда по минимальной скорости $V_{\min}$ определяется допустимая масса поезда m. Тогда очевидно, что масса поезда, при которой функция принадлежности $\mu_A = 0$ будет соответствовать режиму тяги с длительным током, когда перегрева не происходит, или часовому току, если подъем преодолевается быстрее 60 мин. При постоянной скорости и одном значении уклона удельное сопротивление движению будет постоянно, таким образом, сила тяги будет пропорциональна массе поезда m. $F_k \equiv m$. В свою очередь при последовательном возбуждении ТЭД и ненасыщенном режиме работы магнитной системы сила тяги пропорциональна квадрату тока $F_k \equiv I^2$. А выделяемое тепло пропорционально, в свою очередь, квадрату тока $\Delta P \equiv I^2$. Таким образом, в случае с массой поезда $m \equiv \Delta P$ функция принадлежности будет иметь линейный характер, как и показано на рисунке 1, а (масса, при которой $\mu_A = 0$ определяется из тяговых расчетов).

По-другому обстоит дело со скоростью $V < V_{\min}$. Согласно скоростным характеристикам в первом приближении $V \equiv 1/I$. Следовательно, $\Delta P \equiv 1/V^2$. Таким образом, переходная кривая должна быть не прямой, а гиперболой.

Таким образом, функции принадлежности следует определять с использованием теории локомотивной тяги и с учетом местных условий полигона.

Многопараметрические нечеткие множества.

В рассмотренном выше примере лингвистических выражений применялись три нечетких множества – A, B, C, в каждом из которых использовался один параметр – соответственно X, Y, Z. Это обычный способ использования теории нечетких множеств. Однако возможны нечеткие множества нескольких параметров. Например, множество D «надежный локомотив» определяется несколькими параметрами: число отказов на 1 млн км N, время простоя в депо на ТО, стоимость восстановления работоспособности Q и др. В этом случае простейшим вариантом может быть рассмотрение множества как совокупности подмножеств:

$$D = \{(n, \mu_D(n)) \mid n \in N, (t, \mu_D(t)) \mid t \in T, (q, \mu_D(q)) \mid q \in Q, \}. \quad (11)$$

В этом случае общую принадлежность локомотива $\mu_D(n, t, q)$ можно определять как:

$$\mu_D(n, t, q) = \mu_D(n) \cdot \mu_D(t) \cdot \mu_D(q). \quad (12)$$

Однако такой подход требует проверки на допустимость в каждом конкретном случае: неочевидно, что общая функция принадлежности может быть определена как произведение значений функции принадлежности каждого параметра. Исследования автора в этом направлении продолжаются.

Порядок использования нечетких множеств.

Предлагаемый метод поддержки принятия решений используется по принципу «встроенное качество», т. е. формулы и логические выражения записываются внутри программы: на этапе проектирования системы необходимо сформулировать логическое утверждение о наличии риска и определить функции принадлежности $\mu_A(x)$ возможных значений к опасному множеству.

В сервисных локомотивных компаниях ООО «Локомотивные технологии» и ООО «ТМХ-Сервис» создается автоматизированная информационно-управляющая единая система мониторинга технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов (ЕСМТ), в задачи которой входят две основные функции: «Управление инцидентами» и «Управление проблемами». Управление инцидентами предполагает фиксацию, устранение и разбор каждого инцидента с локомотивом: отказ, предотказное состояние, замечания машинистов, нарушения режимов эксплуатации и др. Управление проблемами предполагает анализ данных об инцидентах, поиск и устранение первопричин инцидентов. На этом этапе сле-

дует использовать предлагаемую методику расчета рисков. Для этого следует реализовать интерактивную функциональность периодического анализа данных с вычислением риска наступления опасного события *R* с использованием теории нечетких множеств.

На базе современных информационных систем локомотивного комплекса, используя логические построения (лингвистические утверждения), теорию нечетких множеств и математический аппарат теорий статистики и надежности, можно построить автоматизированную систему управления рисками отказов локомотивов.

Список литературы

1. Лакин, И. К. Автоматизированная система управления локомотивным хозяйством [Текст] / И. К. Лакин / Отраслевой центр внедрения новой техники и технологий. – М., 2002. – 516 с.

2. Гапанович, В. А. Эксплуатация и техническое обслуживание подвижного состава [Текст] / В. А. Гапанович, В. И. Киселев, И. К. Лакин. – М.: Ирис-групп, 2012. – 576 с.

3. Лакин, И. К. Применение статистических методов при диагностировании тепловозови [Текст] / И. К. Лакин, А. А. Аболмасов, В. А. Мельников // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2015. – № 1. – С. 20 – 29.

4. Липа, К. В. Мониторинг технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов. Теория и практика [Текст] / К. В. Липа, А. А. Белинский и др. / ООО «Локомотивные Технологии». – М., 2015. – 212 с.

5. Метод Дельфи. Википедия. http://ru.wikipedia.org/wiki

6. Задэ Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений [Текст] / Л. Задэ. – М.: Мир, 1976. – 166 с.

7. Тэрано Т. Прикладные нечеткие системы [Текст] / Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно. – М.: Мир, 1993. – 184 с.

8. Тартаковский, Э. Д. Формализация экспертных оценок при аттестации локомотиворемонтных производств [Текст] / Э. Д. Тартаковский, В. Г. Пузырь, Ю. Н. Дацун / Материалы первой междунар. науч.-практ. конф. «Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов» / ООО «ТМХ-Сервис». – М., 2014. – С. 286 – 291.

References

1. Lakin I. K. *Avtomatizirovannaia sistema upravleniia lokomotivnym khoziaistvom* (The automated control system of a locomotive economy). Moscow: JCV, 2002, 516 p.

2. Gapanovich V. A., Kiselev V. I., Lakin I. K. *Ekspluatatsiia i tekhnicheskoe obsluzhivanie podvizhnogo sostava* (Operation and maintenance of rolling stock). Moscow: «Iris group», 2012, 576 p.

3. Lakin I. K., Abolmasov A. A., Melnikov V. A. Application of statistical methods in the diagnosis of diesel [Primenenie statisticheskikh metodov pri diagnostirovanii teplovozov]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2015, no. 1, pp. 20 – 29.

4. Lipa K. V. *Monitoring tekhnicheskogo sostoianiia i rezhimov ekspluatatsii lokomoti-vov. Teoriia i praktika* (Monitoring the technical condition and operation modes Lokomotiv Islands. Theory and practice). Moscow: OOO «Lokomotiv-TECHNOLOGIES», 2015, 212 p.

5. Delphi Method. Wikipedia. http://ru.wikipedia.org/wiki/

6. Zade L. *Poniatie lingvisticheskoi peremennoi i ego primenenie k priniatiiu pribli-zhennykh reshenii* (Concept of linguistic variable and its application to decision-conjugated approximate solutions). Moscow: Mir, 1976, 166 p.

7. Terano T., Asai K., Sugeno M. *Prikladnye nechetkie sistemy* (Applied fuzzy system). Moscow: Mir, 1993, 184 p.

8. Tartakovsky E. D., Bubble V. G., Datsun Y. N Formalization of expert assessments for certification lokomotivore-montnyh production [Formalizatsiia ekspertnykh otsenok pri attestatsii lokomotivore-montnykh proizvodstv]. *Materialy pervoi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Perspektivy razvitiia servis-nogo obsluzhivaniia lokomotivov»* (Proceedings of the

first international scientific conference «Prospects of development tion service maintenance of locomotives»). Moscow: «ТМН-Service», 2014, p. 286 – 291.

УДК 629.4.027

В. А. Нехаев, В. А. Николаев, М. Х. Минжасаров

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОВОЗОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

В статье на основе анализа конструкции экипажной части электровозов новых поколении построены расчетные схемы и сформированы их математические модели вертикальной динамики. С использованием уже известных методик упрощения математических моделей выведена математическая модель вертикальной динамики условного «одноосного» электровоза нового поколения и проведены расчеты динамических и тяговых качеств железнодорожного экипажа с параметрами пассажирского электровоза ЭП2К.

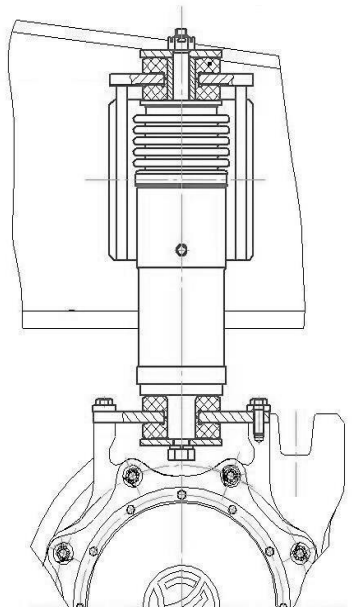


Рисунок 1 – Установка буксового гидродемпфера электровоза ЭП2К

Базовые и перспективные требования к железнодорожной технике, необходимой для перевооружения и модернизации железнодорожной транспортной системы, изложены в принятой ОАО «РЖД» «Программе инновационного развития», в которой определены пути и этапы повышения качества подвижного состава и сложных технических систем. Компанией разработаны и переданы заводам промышленности технические требования ко всем видам подвижного состава нового поколения [1].

Если ранее к нему предъявлялись требования безусловного обеспечения безопасности движения и надежности, то сегодня главными составляющими при формировании технических требований является снижение издержек при эксплуатации подвижного состава, в том числе за счет снижения стоимости жизненного цикла. В результате уже сегодня российские локомотивостроительные заводы полностью перешли на выпуск локомотивов переходного периода как в пассажирском, так и в грузовом движении (2ЭС6 – «Синара», 2ЭС10 – «Гранит», 2ЭС4К – «Дончак», 2ЭС7, 2ЭС5К – «Ермак», и др.). В указанных локомотивах применяется новое рессорное подвешивание, основное конструктивное отличие которого от старых конструкций заключается в отсутствии в буксовой ступени рессорного подвешивания листовых рессор, функции которых выполняет гаситель вязкого трения (рисунок 1), установленный параллельно несущим упругим элементам и подвешенный резиновым амортизатором. В кузовной ступени подвешивания взамен люлечного подвешивания применены винтовые пружины (Flexicoil) (рисунок 2, а), которые предназначены как для восприятия вертикальных нагрузок, так и для создания возвращающих моментов при поперечном и угловом перемещениях тележки относительно кузова, в прямом и в кривом участках пути.

Отказ в конструкции обрессоривания от листовых рессор и применение в качестве диссипативных элементов гидродемпферов, установленных параллельно винтовым пружинам, обусловил возникновение ряда проблем, связанных в первую очередь с низкой надежностью гидродемпферов буксовой ступени. Для решения этой технической задачи необходимо сформировать адекватную математическую модель вертикальной динамики электровоза и на его основе рассчитать необходимые параметры.

При выполнении расчетов математическая модель взаимодействия экипажа и пути должна отражать наиболее существенные характеристики исследуемой динамической системы и протекающих в ней процессов.

а б

Рисунок 2 – Витые пружины кузовной (а) и буксовой (б) ступеней обрессоривания экипажа

При этом для упрощения расчетов и снижения трудоемкости вычислений часто принимают ряд некоторых допущений, которые обоснованно позволяют не учитывать некоторые параметры и взаимные перемещения элементов. В нашем случае приняты следующие:

1) кузов, тележки и необрессоренные элементы экипажа считаются абсолютно твердыми телами;

2) движение колесных пар по рельсам безотрывное;

3) масса тягового электродвигателя распределена пополам между массой тележки и необрессоренными массами в случае опорно-осевого подвешивания (грузовые электровозы) [2] и отнесена к массе тележки в случае опорно-рамного подвешивания (пассажирские электровозы);

4) верхнее строение пути представлено в виде сосредоточенной массы с упругими и диссипативными параметрами (погрешность – не более 12 %) [3];

5) экипаж симметричный;

6) колебания малые;

7) возмущающее воздействие на экипаж принимается случайным;

8) скорость движения локомотива вдоль оси пути постоянная.

Для составления математической модели динамики экипажа при его движении с постоянной скоростью по инерционному пути с упруго-диссипативными свойствами воспользуемся энергетическим методом Лагранжа:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i}\right)-\frac{\partial T}{\partial q_i}+\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_i}+\frac{\partial \Pi}{\partial q_i}=Q_i \qquad (1)$$

где T – кинетическая энергия экипажа и пути;

П – потенциальная энергия системы;

Ф – диссипативная функция колебательных процессов;

q_i и $\dot{q}_i$ – обобщенные координаты и их производные;

Q_i – обобщенные внешние силы.

В первую очередь назначим обобщенные координаты и введем параметры, необходимые для расчета: $z_к$ – вертикальное перемещение кузова; $\varphi_к$ – угловое перемещение кузова; $z_{т\,k}$ – вертикальное перемещение k-й тележки; $\varphi_{т\,k}$ – угловое перемещение k-й тележки; $z_{д\,i}$ – вертикальные колебания i-го демпфера; $z_{к.п\ i}$ – вертикальные колебания i-й колесной пары; $z_{пi}$ –

вертикальные колебания участка пути, приведенного к i-ой колесной паре; η_i – случайная функция неровности рельса под i-ой колесной парой; $m_к$ – масса кузова; $m_т$ – масса обрессоренных частей тележки; $m_{к.п}$ – масса колесной пары; $m_п$– приведенная масса пути; $c_к$ – жесткость кузовной ступени подвешивания; $c_б$ – жесткость буксовой ступени подвешивания; $c_а$ – жесткость резинового амортизатора; $c_п$ – приведенная жесткость пути; $\beta_к$ – коэффициент вязкого трения кузовной ступени подвешивания; $\beta_б$ – коэффициент вязкого трения буксовой ступени подвешивания; $\beta_п$ – приведенный коэффициент вязкого трения пути. Здесь $k = 1, 2$; $i = 1,\ldots, 6$, нумерация тележек и колесных пар – по ходу локомотива.

Исходя из цели исследования и поставленных задач принята плоская расчетная схема экипажа с 15 степенями свободы (рисунок 3) для пассажирского электровоза ЭП2К.

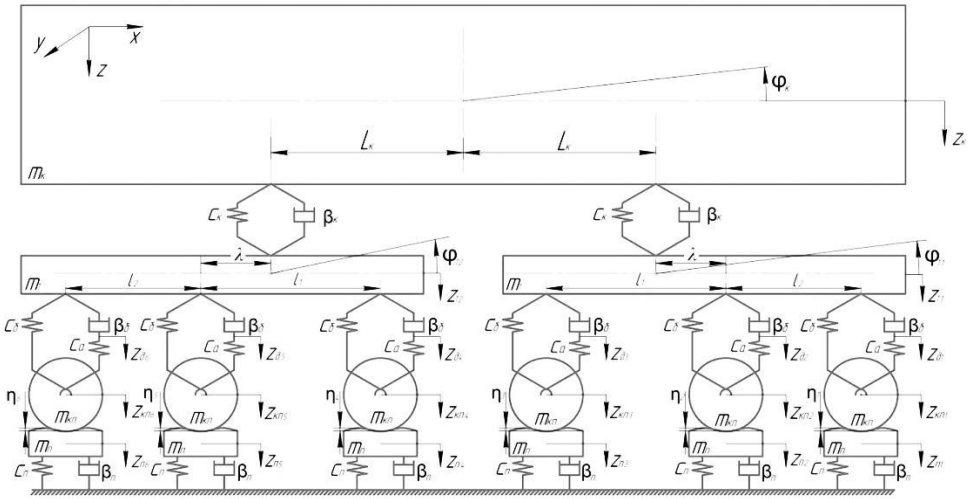


Рисунок 3 – Плоская расчетная схема пассажирского электровоза ЭП2К

Согласно принятой выше методике расчета определим суммарные кинетическую и потенциальную энергии, а также диссипативную функцию исследуемой системы, записав их выражения для каждого элемента, а затем, определив частные производные по каждой обобщенной координате, подставим их в формулу (1).

Кинетическая энергия системы записывается в виде суммы кинетической энергии поступательного движения центра масс элементов и вращения вокруг центра масс для рассматриваемых угловых координат. Таким образом, кинетическую энергию исследуемых экипажей можно записать выражением

$$T = \frac{1}{2} m_к \dot{z}_к^2 + \frac{1}{2} J_к \dot{\varphi}_к^{\,2} + \frac{1}{2} m_т \sum_k \dot{z}_{т\,k}^2 + \frac{1}{2} J_т \sum_k \dot{\varphi}_{т\,k}^2 + \frac{1}{2} m_{кп} \sum_i \dot{z}_i^2 + \frac{1}{2} m_п \sum_i (\dot{z}_{кпi} - \dot{\eta}_i)^2. \qquad (2)$$

Потенциальная энергия системы для консервативных сил упругости в связях между элементами экипажа определяется деформациями, возникающими в этих связях. Энергия упругих деформаций пропорциональна их квадрату, коэффициент пропорциональности равен жесткости связи. Потенциальная энергия исследуемой системы равна сумме потенциальных энергий экипажа и пути, таким образом, потенциальная энергия всей системы примет вид:

$$\Pi = \frac{1}{2} c_к \sum_k \Delta_{к\,k}^2 + \frac{1}{2} c_б \sum_i \Delta_{б\,i}^2 + \frac{1}{2} c_а \sum_i \Delta_{а\,i}^2 + \frac{1}{2} c_п \sum_i \Delta_{п\,i}^2. \qquad (3)$$

Диссипативная функция пропорциональна скорости прогибов, а в роли коэффициентов пропорциональности выступает коэффициент вязкого трения (демпфирования). Следовательно, определим диссипативную функцию следующим образом:

$$\Phi = \frac{1}{2} \beta_к \sum_k \dot{\Delta}_{к\,k}^2 + \frac{1}{2} \beta_б \sum_i \dot{\Delta}_{б\,i}^2 + \frac{1}{2} \beta_п \sum_i \dot{\Delta}_{п\,i}^2. \qquad (4)$$

Подставляя полученные функции (2 – 4), определив их частную производную по каждой обобщенной координате, в формулу (1), получим систему из 18 дифференциальных уравнений, описывающих динамику исследуемого экипажа, следующего вида:

$$M\ddot{q} + B\dot{q} + Cq = M_*\ddot{\eta} + B_*\dot{\eta} + C_*\eta, \qquad (5)$$

где $M = diag\{m_к, J_к, m_{т1}, J_{т1}, m_{т2}, J_{т2}, 0, 0, 0, 0, 0, 0, m_{кп1}, m_{кп2}, m_{кп3}, m_{кп4}, m_{кп5}, m_{кп6}\}$;

$M_* = diag\{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, m_п, m_п, m_п, m_п, m_п, m_п\}$;

$B_* = diag\{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, \beta_п, \beta_п, \beta_п, \beta_п, \beta_п, \beta_п\}$;

$C_* = diag\{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, c_п, c_п, c_п, c_п, c_п, c_п\}$ – диагональные матрицы инерционных, диссипативных и жесткостных коэффициентов экипажа и пути;

$$B = \begin{pmatrix}
2\beta_к & 0 & -\beta_к & 0 & -\beta_к & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 2\beta_к L_к^2 & \beta_к L_к & 0 & -\beta_к L_к & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
-\beta_к & \beta_к L_к & \beta_к + 3\beta_б & -\beta_б(3\lambda + l_2 - l_1) & 0 & 0 & -\beta_б & -\beta_б & -\beta_б & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & -\beta_б(3\lambda + l_2 - l_1) & \beta_б((l_2+\lambda)^2 + \lambda^2 + (l_1-\lambda)^2) & 0 & 0 & \beta_б(l_2+\lambda) & \beta_б\lambda & -\beta_б(l_1-\lambda) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
-\beta_к & -\beta_к L_к & 0 & 0 & \beta_к + 3\beta_б & \beta_б(3\lambda + l_2 - l_1) & 0 & 0 & 0 & -\beta_б & -\beta_б & -\beta_б & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & \beta_б(3\lambda + l_2 - l_1) & \beta_б((l_2+\lambda)^2 + \lambda^2 + (l_1-\lambda)^2) & 0 & 0 & 0 & \beta_б(l_1-\lambda) & -\beta_б\lambda & -\beta_б(l_2+\lambda) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & -\beta_б & \beta_б(l_2+\lambda) & 0 & 0 & \beta_б & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & -\beta_б & \beta_б\lambda & 0 & 0 & 0 & \beta_б & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & -\beta_б & -\beta_б(l_1-\lambda) & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_б & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & -\beta_б & \beta_б(l_1-\lambda) & 0 & 0 & 0 & \beta_б & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & -\beta_б & -\beta_б\lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_б & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & -\beta_б & -\beta_б(l_2+\lambda) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_б & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_п & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_п & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_п & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_п & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_п & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_п
\end{pmatrix}$$

– матрица диссипативных коэффициентов экипажа;

$$C = \begin{pmatrix}
2c_к & 0 & -c_к & 0 & -c_к & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 2c_к L_к^2 & c_к L_к & 0 & -c_к L_к & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
-c_к & c_к L_к & c_к + 3c_б & -c_б(3\lambda + l_2 - l_1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_б & -c_б & -c_б & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & -c_б(3\lambda + l_2 - l_1) & c_б((l_2+\lambda)^2 + \lambda^2 + (l_1-\lambda)^2) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_б(l_2+\lambda) & c_б\lambda & -c_б(l_1-\lambda) & 0 & 0 & 0 \\
-c_к & -c_к L_к & 0 & 0 & c_к + 3c_б & c_б(3\lambda + l_2 - l_1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_б & -c_б & -c_б \\
0 & 0 & 0 & 0 & c_б(3\lambda + l_2 - l_1) & c_б((l_2+\lambda)^2 + \lambda^2 + (l_1-\lambda)^2) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_б(l_1-\lambda) & -c_б\lambda & -c_б(l_2+\lambda) \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_а & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_а & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_а & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_а & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_а & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_а & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_а & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_а & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_а & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_а & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_а & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_а \\
0 & 0 & -c_б & c_б(l_2+\lambda) & 0 & 0 & -c_а & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_б + c_а + c_п & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & -c_б & c_б\lambda & 0 & 0 & 0 & -c_а & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_б + c_а + c_п & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & -c_б & -c_б(l_1-\lambda) & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_а & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_б + c_а + c_п & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & -c_б & c_б(l_1-\lambda) & 0 & 0 & 0 & -c_а & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_б + c_а + c_п & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & -c_б & -c_б\lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_а & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_б + c_а + c_п & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & -c_б & -c_б(l_2+\lambda) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_а & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_б + c_а + c_п
\end{pmatrix}$$

– матрица жесткостных коэффициентов экипажа.

Система дифференциальных уравнений (5) представляет собой математическую модель вертикальной динамики пассажирского шестиосного электровоза ЭП2К. Первые шесть уравнений в системе (5) описывают вертикальные колебания подпрыгивания и галопирования кузова и тележек, следующие шесть – вертикальные колебания гидродемпферов буксовой ступени, которые подвешены упруго резиновым амортизатором и следующие шесть – вертикальные колебания колесных пар. В первую очередь нас интересует вертикальное колебание масс железнодорожных экипажей, так как именно они оказывают значительное воздей-

ствие на процесс функционирования гидродемпферов буксовой ступени. В правой части уравнения колебаний колесных пар имеем возмущающее воздействие со стороны пути. В этом случае при движении экипажа с некоторой скоростью будет наблюдаться запаздывание воздействия на каждую следующую по ходу колесную пару:

$$\eta_i(t) = \eta(t - \tau_i). \qquad (6)$$

Время запаздывания для каждой колесной пары электровоза ЭП2К вычисляется так: $\tau_1 = 0$, $\tau_2 = l_2 / V$, $\tau_3 = (l_1 + l_2)/ V$, $\tau_4 = (2L + 2\lambda + l_2 - l_1)/ V$, $\tau_5 = (2L + 2\lambda + l_2)/ V$, $\tau_6 = (2L + 2\lambda + 2l_2)/ V$.

Важной особенностью колебаний железнодорожных экипажей является случайный характер внешних возмущений. Математически это возмущение описывается случайной функцией. В настоящее время не существует единой точки зрения относительно математической модели внешнего возмущения. Теоретическому и экспериментальному изучению возмущений, действующих на рельсовые экипажи со стороны пути, посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных ученых [4 – 6]. При этом делались многочисленные попытки описания экспериментальных данных о возмущениях с помощью аналитических выражений. Однако так как эксперименты проводились в разных условиях (например, различное состояние участков железных дорог и подвижного состава, отличающиеся по конструкции экипажи, неодинаковые погодные условия и др.) и с использованием различных методик, то полученные при этом результаты в ряде случаев существенно отличаются друг от друга. Это иногда затрудняет их использование при теоретических исследованиях колебаний рельсовых экипажей.

Для аппроксимации спектральной плотности внешних возмущений во многих случаях используется эмпирическая формула профессора А. И. Беляева [4]:

$$S(\omega, V) = \frac{\alpha D}{\pi} \cdot \frac{\alpha^2 + \beta^2 + \omega^2}{\left(\alpha^2 + \beta^2 - \omega^2\right)^2 + 4\alpha^2\omega^2}, \qquad (7)$$

где дисперсия ускорения D измеряется в $м^2/с^4$, а коэффициенты α и β – в $с^{-1}$, скорость движения V – в км/ч.

На рисунке 4 приведены графики спектральных плотностей ускорения букс локомотива 2ТЭ10Л для летнего периода года, хорошего состояния пути, рельсов Р65. Параметр α во всех случаях был близок $\beta/3$. Для удовлетворительного и плохого состояния пути дисперсия виброускорений букс увеличивается соответственно в 1,7 и 2,8 раза.

При построении моделей железнодорожных экипажей желательно разрабатывать достаточно простые модели, которые адекватно учитывали бы динамические свойства системы, подлежащей исследованию. Простота модели определяется в большей мере числом степеней свободы. При составлении моделей нужно стремиться к минимизации числа степеней свободы системы, учитывая соблюдение необходимой погрешности расчета.

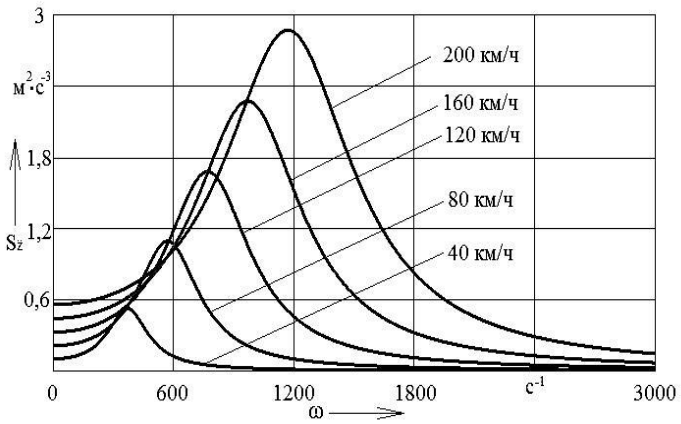


Рисунок 4 – Спектральная плотность ускорения буксы локомотива 2ТЭ10Л

Чтобы упростить систему уравнений (5), используем симметрию экипажа[7]:

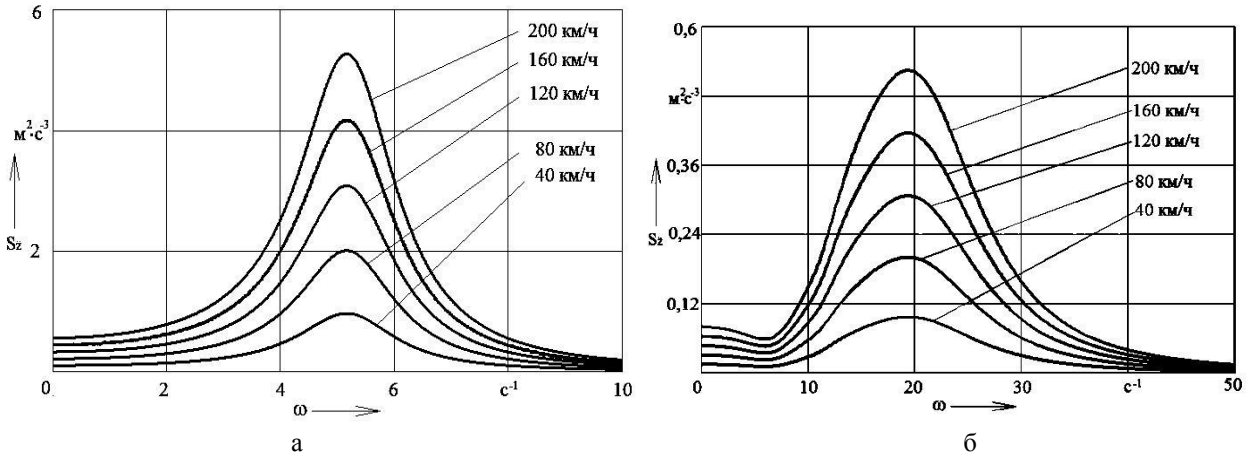
$$\begin{cases} \tilde{z}_{\text{т}} = z_{\text{т}1} + z_{\text{т}2};\ \dot{\tilde{z}}_{\text{т}} = \dot{z}_{\text{т}1} + \dot{z}_{\text{т}2}; \\ \tilde{z}_{\text{д}} = \sum\limits_{j=1}^{6} z_{\text{д}j};\ \dot{\tilde{z}}_{\text{д}} = \sum\limits_{j=1}^{6} \dot{z}_{\text{д}j}; \\ \tilde{z}_{\text{к.п}} = \sum\limits_{j=1}^{6} z_{\text{к.п}\,j};\ \dot{\tilde{z}}_{\text{к.п}} = \sum\limits_{j=1}^{6} \dot{z}_{\text{к.п}\,j}. \end{cases} \tag{8}$$

После необходимых преобразований получим систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} m_{\text{к}}\ddot{z}_{\text{к}} + \beta_{\text{к}}(\dot{z}_{\text{к}} - \dot{\tilde{z}}_{\text{т}}) + c_{\text{т}}(z_{\text{к}} - \tilde{z}_{\text{т}}) = 0; \\ m_{\text{т}}\ddot{\tilde{z}}_{\text{т}} + \beta_{\text{к}}(\dot{\tilde{z}}_{\text{т}} - \dot{z}_{\text{к}}) + \beta_{\text{б}}(\dot{\tilde{z}}_{\text{т}} - \dot{\tilde{z}}_{\text{д}}) + c_{\text{к}}(\tilde{z}_{\text{т}} - z_{\text{к}}) + c_{\text{б}}(\tilde{z}_{\text{т}} - \tilde{z}_{\text{к.п}}) = 0; \\ \beta_{\text{б}}(\dot{\tilde{z}}_{\text{д}} - \dot{\tilde{z}}_{\text{т}}) + c_{\text{а}}(\tilde{z}_{\text{д}} - \tilde{z}_{\text{к.п}}) = 0; \\ (m_{\text{к.п}} + m_{\text{п}})\ddot{\tilde{z}}_{\text{к.п}} + \beta_{\text{п}}\dot{\tilde{z}}_{\text{к.п}} + c_{\text{б}}(\tilde{z}_{\text{к.п}} - \tilde{z}_{\text{т}}) + c_{\text{а}}(\tilde{z}_{\text{к.п}} - \tilde{z}_{\text{д}}) + c_{\text{п}}\tilde{z}_{\text{к.п}} = m_{\text{п}}\sum\limits_{j=1}^{6}\ddot{\eta}_j + \beta_{\text{п}}\sum\limits_{j=1}^{6}\dot{\eta}_j + c_{\text{п}}\sum\limits_{j=1}^{6}\eta_j. \end{cases} \tag{9}$$

Решение системы дифференциальных уравнений (9) выполнено в среде MathCAD. Для этого после преобразования системы дифференциальных уравнений по Лапласу при нулевых начальных условиях были получены передаточные функции кузова, тележки и колесной пары, а затем на основании соотношений Винера – Хинчина определены статистические показатели колебательных процессов.

В качестве основных показателей динамических качеств железнодорожного экипажа приняты виброускорения основных узлов экипажа: кузова (рисунок 5, а), тележек (рисунок 5, б), и колесных пар (рисунок 6, а), величина которых, оказывает значительное влияние на надежность узлов, в частности тяговых электродвигателей, которые на электровозе ЭП2К имеют опорно-рамное подвешивание.

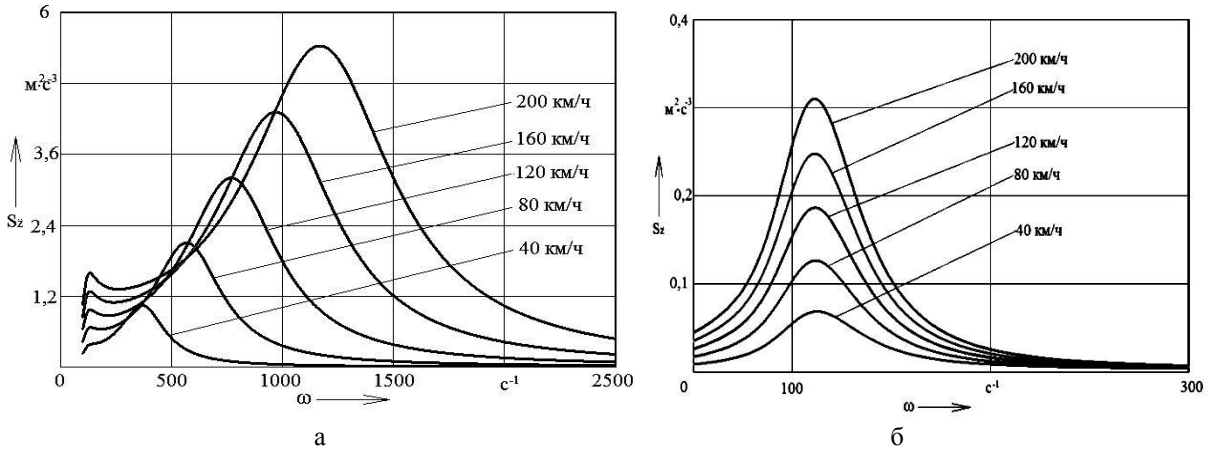


а б

Рисунок 5 – Спектральная плотность: виброускорений кузова (а) и тележек (б)

В качестве показателя тяговых свойств использована величина спектральной плотности давления колеса на рельс (рисунок 6, б). Давление колесной пары на рельсы характеризует нагрузки в области контакта колеса с рельсом при различной скорости движения экипажа. Повышенные нагрузки приводят к нарушению функционирования верхнего строения пути или даже к его повреждению. Пониженные значения этой величины при высоких скоростях движения экипажа могут привести к разносному боксованию, что негативно сказывается на тяговых характеристиках локомотива. Следовательно, необходимо найти максимальные и

минимальные значения давления колесных пар на рельсы в зависимости от скорости движения экипажа, которые представлены на рисунке 7.



а б

Рисунок 6 – Спектральная плотность: а – виброускорений колесных пар; б – динамической добавки

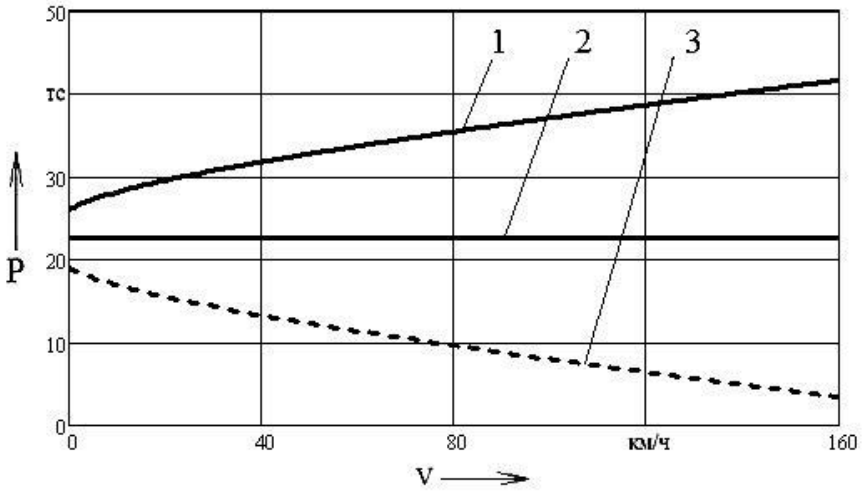


Рисунок 7 – Максимальное и минимальное значения давления на рельс:
1 – максимальное; 2 – статическое; 3 – минимальное

Получена уточненная математическая модель колебаний локомотива в вертикальной плоскости симметрии, позволяющая выполнить оценку влияния параметров демпфирования и жесткости рессорного подвешивания на показатели динамических качеств экипажа. Полученные результаты исследования в первую очередь необходимы для проведения сравнительного анализа динамических и тяговых качеств экипажей с типовым и перспективным типами рессорного подвешивания локомотивов.

Список литературы

1. Гапанович, В. А. Перспективы обновления подвижного состава российских железных дорог [Текст] / В. А. Гапанович // Транспорт Российской Федерации. – Санкт-Петербург, 2006. – № 2. – С. 43 – 45.

2. Механическая часть тягового подвижного состава [Текст] / Под ред. И. В. Бирюкова. – М.: Транспорт, 1992. – 440 с.

3. Камаев, В. А. Оптимизация параметров ходовых частей железнодорожного подвижного состава [Текст] – М.: Машиностроение, 1980. – 215 с.

4. Галиев, И. И. Научные направления школы М. П. Пахомова за 50 лет (1961 – 2011 гг.) [Текст] / И. И. Галиев, В. А. Нехаев, В. А. Николаев / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2012. – 175 с.

5. Ушкалов, В. Ф. Статистическая динамика рельсовых экипажей [Текст] / В. Ф. Ушкалов, Л. М. Резников, С. Ф. Редько. – Киев: Наукова думка, 1982. – 360 с.

6. Гарг, В. К. Динамика подвижного состава [Текст] / В. К. Гарг, Р. В. Дуккипати. – М.: Транспорт, 1988. – 391 с.

7. Нехаев, В. А. Взаимодействие экипажа с квазиинвариантной системой подвешивания и неравноупругого по протяженности пути [Текст]: дис... канд. техн. наук. – Омск, 1983. – 214 с.

References

1. Gapanovich V. A. The renovation of rolling stock Russian Railways [Perspektivy obnovleniia podvizhnogo sostava rossiiskikh zheleznykh dorog]. *Transport Rossiiskoi Federatsii – Transport of the Russian Federation*, 2006, no. 2, pp. 43 – 45.

2. Biriukov I.V. *Mekhanicheskaia chast' tiagovogo podvizhnogo sostava* (Mechanical traction rolling stock). Moskow: Transport Publ., 1992, 440 p.

3. Kamaev V. A. *Optimizatcia parametrov chodovich chastei zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava* (Optimization of parameters undercarriages of railway rolling stock). Moskow: Mascinostroenie Publ., 1980, 215 p.

4. Galiev I. I., Nekhaev V. A., Nikolaev V. A. *Nauchnie napravlenia shkoli M.P. Pachomova za 50 let (1961 – 2011 gg.)* (Research areas of the school M. P. Pakhomov for 50 years (1961 – 2011)). Omsk, 2012, 175 p.

5. Uchkalov V. F., Reznikov L. M., Redko S. F. *Statisticheskaya dinamika relsovyh ekipagei* (Statistical dynamics of railway vehicle dynamics). Kiev: Naukova dumka, 1982, 360 p.

6. Garg V. K., Dukkipaty R. V. *Dinamika podvignogo sostava* (Dynamics of rolling stock). Moskow: Transport Publ., 1988, 391 p.

7. Nehaev V. A. *Vzaimodeistvie ekipaga s kvaziinvariantnoi sistemoi podveshivania i neravouprugogo po protiagennosti puti* (The interaction with the crew quasiinvariant suspension system and variable elastic longest path): Ph. D. thesis, Omsk, 1983, 214 p.

УДК 629.424.3:621.436

С. М. Овчаренко, О. В. Балагин, Д. В. Балагин

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ТЕПЛОВОЗА

В статье представлена математическая модель системы охлаждения тепловоза 2ТЭ10М, позволяющая выполнять расчет параметров теплообменных аппаратов с учетом их технического состояния.

Задачи математического моделирования теплообменных процессов в системе охлаждения могут быть решены с привлечением методов численного моделирования, основных уравнений теплового баланса, теплопередачи, аэродинамики и гидравлики. Уравнения аэродинамики и гидравлики связаны с уравнениями теплообмена, поэтому их приходится решать совместно.

Моделирование работы теплообменных аппаратов тепловоза (радиаторные секции, водомасляный теплообменник, охладитель наддувочного воздуха) необходимо начинать с гидравлического расчета системы охлаждения, так как преодолеваемое насосом сопротивление сети в контурах циркуляции определяет подачу теплоносителя, влияющую на интенсивность теплоотвода и на коэффициенты теплопередачи теплообменных аппаратов.

Методика, разработанная на кафедре «Локомотивы» ОмГУПСа [1], позволяет определить реальный расход теплоносителя, необходимый при выполнении теплового расчета си-

стемы охлаждения тепловоза. В расчетах предполагается отсутствие расхода воды по топливоподогревателю и межконтурному перепуску.

Напорно-расходная характеристика водяного насоса с достаточной степенью достоверности представлена в виде полинома третьей степени [1, 5, 6]:

$$H_{\text{i}} = a \cdot V_{\text{i}}^3 + b \cdot V_{\text{i}}^2 + c \cdot V_{\text{i}} + d\,, \tag{1}$$

где *i* – номер контура охлаждения тепловоза.

Коэффициенты регрессии при переменной величине расхода воды V в уравнении (1) приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты аппроксимации характеристики водяных насосов

Характеристика насоса	Коэффициенты регрессии							
	первый контур				второй контур			
	a	b	c	d	a	b	c	d
По ТУ	764,57	–279,79	7,433	0,422	87,54	–270,01	5,863	0,380
По экспериментальным данным	–912,20	–143,73	4,740	0,453	2484,80	–424,29	8,087	0,357

В общем виде характеристики сети контуров охлаждения можно представить следующим образом [1, 5, 6]:

$$H_{1,2} = V_{1,2}^2 (\Sigma \xi_k + Z_{1,2}^{-n} \cdot \xi_{c1} \cdot V_{1,2}^{n-2}). \tag{2}$$

В результате получаем систему уравнений, определяющую условие совместной работы «насос – гидравлическая сеть» [1, 5, 6]:

$$H_i = V_i^2 (\Sigma \xi_{k\ \text{const}} + Z_i^{-n} \cdot \xi_{c1} \cdot V_i^{n-2}); \tag{3}$$

$$H_{\text{i}} = a \cdot V_{\text{i}}^3 + b \cdot V_{\text{i}}^2 + c \cdot V_{\text{i}} + d. \tag{4}$$

Относительный коэффициент гидравлического сопротивления секции определяем по выражению [1, 5, 6]:

$$\bar{\zeta}_{c1} = \bar{\zeta}_{1л} \cdot \omega^{n-1,78}, \tag{5}$$

где $\bar{\zeta}_{1л}$ – относительный коэффициент гидравлического сопротивления при скорости воды 1 м/с.

Значения относительных коэффициентов сопротивления для секций с различной степенью загрязнения ее водяной полости приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения относительных коэффициентов сопротивления для секций с различным техническим состоянием водяной полости

ε	20	30	40	50	60	70	75
$\bar{\zeta}_{1л}$	0,858	0,933	1,024	1,14	1,302	1,573	1,941

Связь между показателем степени и относительным коэффициентом сопротивления аппроксимирована выражением [4]:

$$n = 1{,}812 + 0{,}1649 \cdot \ln \bar{\zeta}_{1л} - 6{,}119 \cdot 10^{-2} \cdot (\ln \bar{\zeta}_{1л})^2. \tag{6}$$

Порядок расчета следующий. Задаются начальные значения расхода воды по контурам и относительный коэффициент гидравлического сопротивления из таблицы 2 для заданной степени загрязнения. По выражению (6) определяется значение показателя степени *n*, а по

заданному $\overline{\zeta}_{1,л}$ и рассчитанному *n* рассчитывается по уравнению (5) относительный коэффициент гидравлического сопротивления $\overline{\zeta}_{c1}$. Далее решается система уравнений (3), (4) относительно заданного расхода. Полученное значение $V_{1,2}$ сравнивается с заданным на начальном этапе, при расхождении значений больше заданной точности расчет повторяется при новых значениях расхода.

В качестве объективной оценки степени загрязнения теплопередающих поверхностей секции как с воздушной, так и с водяной стороны выступает интенсивность теплопередачи, т. е. величина коэффициента теплопередачи при заданных режимных условиях.

Как известно, в процессе эксплуатации при действии эксплуатационных факторов наблюдается значительное уменьшение коэффициента теплопередачи. Такое снижение происходит по двум причинам. Первая – увеличение термического сопротивления теплоотдаче от стенок трубок и охлаждающих пластин к воздуху, обусловленное загрязняющими отложениями и нарушением контакта трубок и пластин. Вторая – снижение скорости воды в трубках (уменьшение коэффициента теплоотдачи от воды к стенке трубки) и воздуха в межтрубном пространстве (уменьшение коэффициента теплоотдачи от стенок трубок и охлаждающих пластин к воздуху).

Общее термическое сопротивление загрязняющих отложений определяется соотношением Керна [2]:

$$R_{з} = R_{з\max}\left[1-\exp(-b_{з}\cdot\tau)\right], \tag{7}$$

где $R_{з\ max}$ – асимптотическое (при максимальной толщине отложений) термическое сопротивление загрязнений, м^2·К/Вт;

$b_{з}$ – экспериментальный коэффициент, зависящий от скорости, температуры теплоносителя, материала и геометрии теплопередающей поверхности;

τ – время, ч.

Следующим этапом моделирования является решение системы линеаризованных алгебраических уравнений [3]. При составлении систем уравнений необходимо соблюдение основного правила: ни одно из содержащихся в системе уравнений не должно быть получено из комбинации любых других.

Приняв за основу основные уравнения теплового баланса, теплопередачи и проведя ряд преобразований, получили следующие системы уравнений:

для первого контура:

$$t_{11}-t_{12}=\frac{Q_{в}}{W_{в1}}; \tag{8}$$

$$\frac{e^{\beta_1'}}{e^{\beta_1'}-1}t_{12}'-\frac{1}{e^{\beta_1'}-1}t_{11}=\tau_0; \tag{9}$$

$$\frac{e^{\beta_1''}}{e^{\beta_1''}-1}t_{12}-\frac{1}{e^{\beta_1''}-1}t_{12}'=\tau_0; \tag{10}$$

$$\tau_{01}'-\frac{W_{в1}'}{W_{01}'}t_{11}+\frac{W_{в1}'}{W_{01}'}t_{12}'=\tau_0; \tag{11}$$

$$\tau_{01}''-\frac{W_{в1}''}{W_{01}''}t_{12}'+\frac{W_{в1}''}{W_{01}''}t_{12}=\tau_0; \tag{12}$$

для второго контура:

$$t_{21} - t_{22} = \frac{Q_{нв} + Q_{м}}{W_{в2}}; \quad (13)$$

$$\frac{e^{\beta'_{2л}}}{e^{\beta'_{2л}} - 1} t'_{23} - \frac{1}{e^{\beta'_{2л}} - 1} t_{21} = \tau_0; \quad (14)$$

$$\frac{e^{\beta''_{2л}}}{e^{\beta''_{2л}} - 1} t_{23} - \frac{1}{e^{\beta''_{2л}} - 1} t'_{23} = \tau_0; \quad (15)$$

$$\frac{e^{\beta'_{2п}}}{e^{\beta'_{2л}} - 1} t'_{22} - \frac{1}{e^{\beta'_{2п}} - 1} t_{21} = \tau_0; \quad (16)$$

$$\frac{e^{\beta''_{2п}}}{e^{\beta''_{2п}} - 1} t_{22} - \frac{1}{e^{\beta''_{2п}} - 1} t'_{22} = \tau_0; \quad (17)$$

$$\tau'_{02л} - \frac{W'_{в2л}}{W'_{02л}} t_{21} + \frac{W'_{в2л}}{W'_{02л}} t'_{23} = \tau_0; \quad (18)$$

$$\tau''_{02л} - \frac{W''_{в2л}}{W''_{02л}} t'_{23} + \frac{W''_{в2л}}{W''_{02л}} t_{23} = \tau_0; \quad (19)$$

$$\tau'_{02п} - \frac{W'_{в2п}}{W'_{02п}} t_{21} + \frac{W'_{в2п}}{W'_{02п}} t'_{22} = \tau_0; \quad (20)$$

$$\tau''_{02п} - \frac{W''_{в2п}}{W''_{02п}} t'_{22} + \frac{W''_{в2п}}{W''_{02п}} t_{22} = \tau_0; \quad (21)$$

$$t_{2в} - t_{22} = \frac{Q_{нв}}{W_{в2}}, \quad (22)$$

где $\beta_{in}^{j} = \frac{W_{0in}^{j}}{W_{вin}^{j}} \cdot (1-h)$, $h = \frac{1}{e^{m}}$, $m = \frac{Z_i \cdot k_{in}^{j} \cdot F^{j}}{W_{0in}^{j}}$;

$W_{0in}^{j}, W_{вin}^{j}$ – водяные эквиваленты по воздуху и воде;

i – номер контура охлаждения;

j – группа секций (′ – верхняя группа секций, ′′– нижняя группа);

n – группа секций для второго контура (л – на левой стороне шахты, п – на правой стороне шахт);

τ_0 – температура окружающего воздуха, °С;

τ_{0in}^{j} – температура воздуха после прохождения группы секций, °С;

t_i – температура воды, °С;

k_{in}^{j} – коэффициент теплопередачи, Вт/(м^2·К).

Уравнения (8), (13), (22) представляют баланс тепла по воде; (11), (12), (18) – (21) – баланс тепла по воздуху. Зависимости (9), (10), (14) – (17) составлены на основе баланса передачи тепла от воды к воздуху через поверхности охлаждения в группах секций.

Полученные системы уравнений нелинейные из-за зависимости от неизвестных значений температуры: теплофизических характеристик теплоносителей и коэффициента теплопередачи секций. Нелинейности по указанным параметрам при расчете корректируются по фактически полученной в предыдущем итерационном цикле температуре теплоносителей.

Цель следующего этапа моделирования – проверка достоверности выбора массовой скорости воздушного потока $U_{вз}$ при том или ином состоянии воздушной стороны секции и,

следовательно, соответствия результатов гидравлического и теплового расчетов совместной работы дизеля и системы охлаждения [4, 5]. При выполнении аэродинамического расчета охлаждающего устройства прежде всего необходимо учитывать внешнее загрязнение поверхности теплообмена, которому подвержены все без исключения радиаторные секции тепловоза.

В качестве объективного показателя степени загрязненности внешней теплопередающей поверхности секции, характеризующего степень уменьшения скорости воздуха в межтрубном пространстве, принят относительный коэффициент аэродинамического сопротивления секции $\overline{\zeta}_{2л}$ при массовой скорости воздуха 1 кг/(м^2·с), значения которого для водовоздушных секций с различной степенью загрязненности ее воздушной стороны приведены в таблице 3.

Первым этапом аэродинамического расчета является определение окружной скорости концов лопастей вентилятора по известной частоте вращения вентиляторного колеса и весового расхода воздуха по его заданной массовой скорости перед фронтом холодильника и геометрическим характеристикам секций.

Аэродинамическое сопротивление секций вычисляем по принятому значению относительного коэффициента аэродинамического сопротивления исследуемого эксплуатационного состояния секции и массовой скорости воздуха.

$$\Delta P_{c2} = 12{,}852\overline{\zeta}_{2л} U_2^{0{,}15\text{th}(115\cdot\overline{\zeta}_{2л}-117{,}64)+1{,}75}. \qquad (23)$$

Таблица 3 – Значения относительного коэффициента сопротивления секции и формулы для определения аэродинамического сопротивления секций с различным техническим состоянием воздушной стороны

Условный номер состояния секции	Коэффициент $\overline{\zeta}_{2л}$	Формула для определения ΔP_{c2}	Характеристика состояния и метода загрязнения воздушной стороны секции
1	0,92	$11{,}833U_2^{1{,}6}$	Исходное (чистое) состояние воздушой стороны новой секции
2	1,00	$12{,}852U_2^{1{,}6}$	Ограничительное сопротивление секции по ГОСТ 20556-75
3	1,001	$12{,}865U_2^{1{,}63}$	Первая степень загрязнения новой секции (замасливание воздушной стороны)
4	1,010	$12{,}981U_2^{1{,}66}$	Вторая степень загрязнения новой секции (напыление 0,5 кг песка)
5	1,021	$13{,}120U_2^{1{,}70}$	Третья степень загрязнения новой секции (дополнительное напыление 0,5 кг песка)
6	1,029	$13{,}231U_2^{1{,}85}$	Третья степень загрязнения новой секции и смятие 30 % пластин
7	1,558	$20{,}024U_2^{1{,}90}$	Секция в эксплуатационном состоянии после промывки воздушной стороны

Далее вычисляем статический напор вентилятора, плотность воздуха в шахте, объемный расход и осевую скорость воздуха на выходе из вентилятора, динамический и полный напор вентилятора. С использованием рассчитанных значений коэффициентов расхода и напора вычисляем значения безразмерных величин подачи и напора:

$$\overline{H}_{в} = \frac{H_n}{\rho_{ш} \cdot \upsilon^2}, \qquad (24)$$

где $\upsilon = \frac{\pi D_в n_в}{60}$ – окружная скорость внешних кромок лопаток вентиляторного колеса, м/с;

$$\overline{V} = \frac{V_{вз}}{F_в \cdot \upsilon}, \quad (25)$$

где $F_в = \frac{\pi \cdot D_в^2}{4}$ – площадь вентиляторного колеса по внешнему диаметру, м^2.

При расхождении значений больше заданной точности расчет повторяется при новом значении массовой скорости воздуха.

Итогом приведенного аэродинамического расчета является определение мощности, затрачиваемой на привод вентилятора при различном уровне загрязнения водовоздушных секций.

Мощность, потребляемую вентилятором холодильника, определяем по формуле:

$$N_в = \frac{V_{вз} \cdot H_п}{\eta_в}. \quad (26)$$

Таким образом, моделируя эксплуатационные состояния радиаторных секций, можно определить увеличение мощности на привод вентилятора. Алгоритм моделирования содержит основные этапы вычисления: гидравлический расчет, теплотехнический расчет, аэродинамический расчет [6].

Разработанная математическая модель позволяет выполнять расчет теплотехнических характеристик радиаторных секций и системы охлаждения тепловоза в целом при различных значениях показателей загрязненности [1].

Достоверность результатов моделирования подтверждена экспериментальными данными, полученными в эксплуатационном локомотивном депо Карасук при испытании пяти тепловозов серии 2ТЭ10М при различных начальных условиях.

Список литературы

1. Володин, А. И. Математическая модель процесса охлаждения воды в радиаторе тепловоза с учетом его среднеэксплуатационного состояния [Текст] / А. И. Володин, А. С. Анисимов // Методы и алгоритмы прикладной математики в технике, медицине и экономике: Материалы междунар. науч.-практ. конф. / Южно-Российский гос. техн. ун-т. – Новочеркасск, 2005. 127 с.

2. Бажан, П. И. Тепловые модели унифицированных охладителей дизелей [Текст] / П. И. Бажан // Двигателестроение. – Санкт-Петербург, 1982. – № 4. – С. 36, 37.

3. Балагин, О. В. Определение максимально допустимого количества загрязненных радиаторных секций в системе охлаждения тепловоза [Текст] / О. В. Балагин // Молодежь наука, творчество-2005: Материалы науч.-практ. конф. / Омский гос. ин-т сервиса. – Омск, 2005. – 174 с.

4. Анисимов, А. С. Постановка задачи нестационарной теплопроводности для оценки технического состояния теплообменных аппаратов тепловозов в эксплуатации [Текст] / А. С. Анисимов // Повышение надежности, экономичности и экологичности дизельного подвижного состава: Межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2004. – С. 76, 77.

5. Володин, А. И. Моделирование внешних нестационарных температурных полей технических объектов сложной конфигурации [Текст] / А. И. Володин, В. К. Фоменко // Приоритетные направления развития науки и технологий: Доклады всерос. науч.-техн. конф. / Тульский гос. ун-т. – Тула, 2008. – С. 42, 43.

6. Балагин, О. В. Разработка технологии тепловизионного контроля технического состояния секций холодильников тепловозных дизелей: дис... канд. техн. наук. – Омск, 2005. – 165 с.

References

1. Volodin A. I., Anisimov A. S. Mathematics model of process of cooling of water in a locomotive radiator taking into account its sredneekspluatatsionny state [Matematicheskaia model'

protsessa okhlazhdeniia vody v radiatore teplovoza s uchetom ego sredneekspluatatsionnogo sostoianiia]. *Metody i algoritmy prikladnoi matematiki v tekhnike, meditsine i ekonomike: Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* (Methods and algorithms of applied mathematics in equipment, medicine and economy). Novocherkassk, 2005, 127 p.

2. Bazhan P. I. Thermal models of the unified coolers of diesels [Teplovye modeli unifitsirovannykh okhladitelei dizelei]. *Dvigatelestroenie – Engine-building*, 1982, no. 4, pp. 36 – 37.

3. Balagin O. V. Definition of the most admissible quantity of the polluted radiator sections in the cooling system of a locomotive [Opredelenie maksimal'no dopustimogo kolichestva zagriaznennykh radiatornykh sektsii v sisteme okhlazhdeniia teplovoza]. *Molodezh' nauka, tvorchestvo – 2005: Materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii* (Youth science, creativity). Omsk, 2005, 174 p.

4. Anisimov A. S. A problem definition of non-stationary heat conductivity for an assessment of technical condition of heatexchange devices of locomotives in operation [Postanovka zadachi nestatsionarnoi teploprovodnosti dlia otsenki tekhnicheskogo sostoianiia teploobmennykh apparatov teplovozov v ekspluatatsii]. *Povyshenie nadezhnosti, ekonomichnosti i ekologichnosti dizel'nogo podvizhnogo sostava: Mezhvuzovskii tematicheskii sbornik nauchnykh trudov* (Increase of reliability, profitability and environmental friendliness of a diesel rolling stock). Omsk, 2004, pp. 76 – 77.

5. Volodin A. I., Fomenko V. K. Modeling of external non-stationary temperature fields of technical objects of a difficult configuration [Modelirovanie vneshnikh nestatsionarnykh temperaturnykh polei tekhnicheskikh ob"ektov slozhnoi konfiguratsii]. *Prioritetnye napravleniia razvitiia nauki i tekhnologii: Doklady vserossiiskoi nauchnno-tekhnichekoi konferentsii* (Priority directions of development of science and technologies). Tula, 2008, pp. 42 – 43.

6. Balagin O. V. *Razrabotka tekhnologii teplovizionnogo kontrolia tekhnicheskogo sostoianiia sektsii kholodil'nikov teplovoznykh dizelei* (Development technology of thermovision control technical condition of diesel engines sections refrigerators). Phd's thesis, Omsk, OSTU, 2005, 165 p.

УДК 629.45.048

О. С. Томилова, В. В. Томилов

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

В статье приведена методика расчета потерь напора воды в системе водоснабжения пассажирского вагона, оснащенного системой очистки в виде последовательно установленных двух фильтров и проточного ультрафиолетового стерилизатора шнековой конструкции. Представлены результаты расчета потерь в различных системах водоснабжения вагонов с учетом максимальных и минимальных времени заправки и напоров воды в станционной системе водоснабжения. Определены рациональные геометрические параметры камеры обеззараживания проточного ультрафиолетового стерилизатора из условий обеспечения полного заполнения бака вагона за минимальное время стоянки с минимальным напором станционной системы водоснабжения. Величина потерь напора не превышает паспортных значений типовых конструкций. Геометрия стерилизатора позволяет интегрировать устройство в вагон. Ее расчетные значения взяты для разработки макетного образца УФ-стерилизатора, успешно прошедшего испытания. Для возможности определения потерь напора воды камера обеззараживания стерилизатора шнековой конструкции представлена змеевиком с прямоугольным сечением, «намотанным» на цилиндр. Местные потери одного витка рассчитаны с использованием справочной формулы, предложенной Г. Н. Абрамовичем.

В 2015 г. АО «Федеральная пассажирская компания» (Западно-Сибирский филиал) представила следующие проблемные вопросы о состоянии системы водоснабжения в пассажирских вагонах. Качество воды при заправке вагонов в пути следования на дорогах не отвечает требованиям из-за плохого качества очистки. Имеются жалобы от потребителей на ряде

станций. Требуется обеспечение наличия установки обеззараживания воды в системе водоснабжения пассажирских вагонов. Необходимо предусмотреть дезинфекцию системы водоснабжения современными дезинфицирующими средствами, исключая раствор хлорной извести. Существующий метод дезинфекции, реализуемый в соответствии с инструкцией 1988 г. экономически нецелесообразен, так как требуются большие затраты времени на подготовку раствора и промывку после дезинфекции.

Специалисты кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПСа) занимаются решением этих вопросов с 2009 г. Анализ существующих путей повышения качества водоподготовки показал, что для обеспечения требований нормативных документов можно использовать метод ультрафиолетового (УФ) обеззараживания [1]. В ходе работы были получены пять патентов на устройства водоподготовки с применением проточных и дополнительно поверхностных УФ-стерилизаторов, интегрированных в существующую конструкцию системы водоснабжения вагонов.

В работах [1 – 6] подробно рассматриваются варианты конструкций стерилизаторов для пассажирских вагонов, рассчитывается их эффективность.

Наиболее эффективным решением является применение УФ-стерилизатора с ребрами на внутренней стенке камеры обеззараживания таким образом, что внутренний объем представляет собой сложную фигуру вращения с заданным шагом – шнек (рисунок 1).

Количество витков, их геометрия существенным образом влияют на траектории потока воды [5, 6], а задача оптимизации числа витков весьма актуальна.

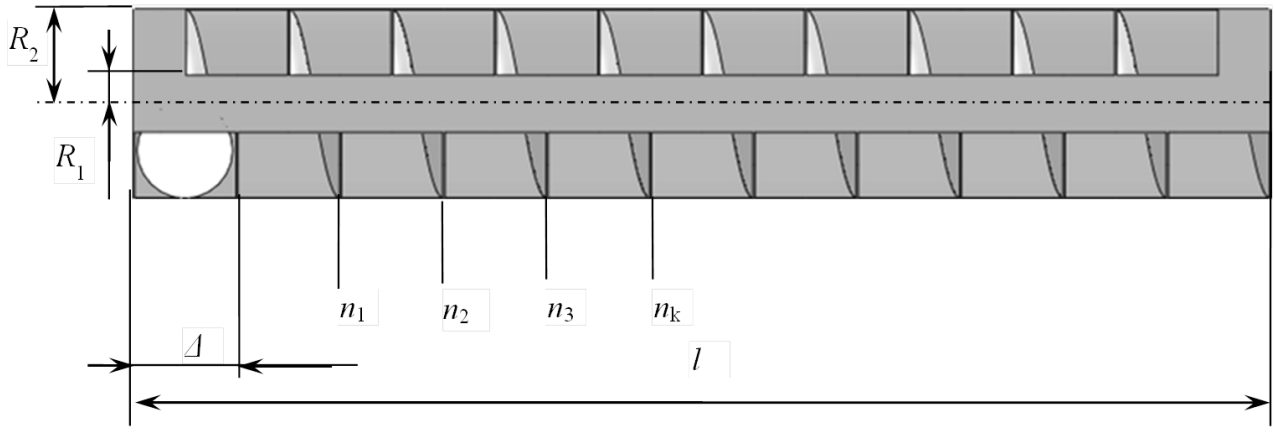


Рисунок 1 – Сечение корпуса модели модернизированного УФ-стерилизатора с оребрением

Площадь поперечного сечения витка целесообразно иметь равной входному патрубку для сохранения средней скорости течения воды, местных потерь напора, времени заправки бака пассажирского вагона. Если высота витка большая, то снижается тангенциальная составляющая. Если ширина витка большая, то снижается облучение потоков, которые расположены дальше от УФ-лампы. Если площадь витка мала, то растут местные потери сопротивления движению снижается напор воды, а следовательно, и скорость ее течения.

Конструктивно количество витков должно быть целым числом и должно соотноситься с длиной лампы l формулой:

$$n \times h + \Delta \times n = l, \tag{1}$$

где n – количество витков;

h – высота витка, м;

Δ – толщина стенки ребра (см. рисунок 1), м.

Отсюда количество витков

$$n = \frac{l}{h + \Delta}. \tag{2}$$

Внедрение УФ-стерилизатора в водоналивную систему пассажирского вагона приведет к увеличению потерь напора воды, что в свою очередь может вызвать недозаправку вагона и нехватку воды для пассажиров в пути следования. В связи с этим дается оценка потерям воды в модернизированной системе водоснабжения при различных исходных напорах централизованной системы и конфигурациях УФ-стерилизатора.

Схема замещения модернизированной водоналивной системы водоснабжения пассажирского вагона с предлагаемой конструкцией УФ-стерилизатора приведена на рисунке 2.

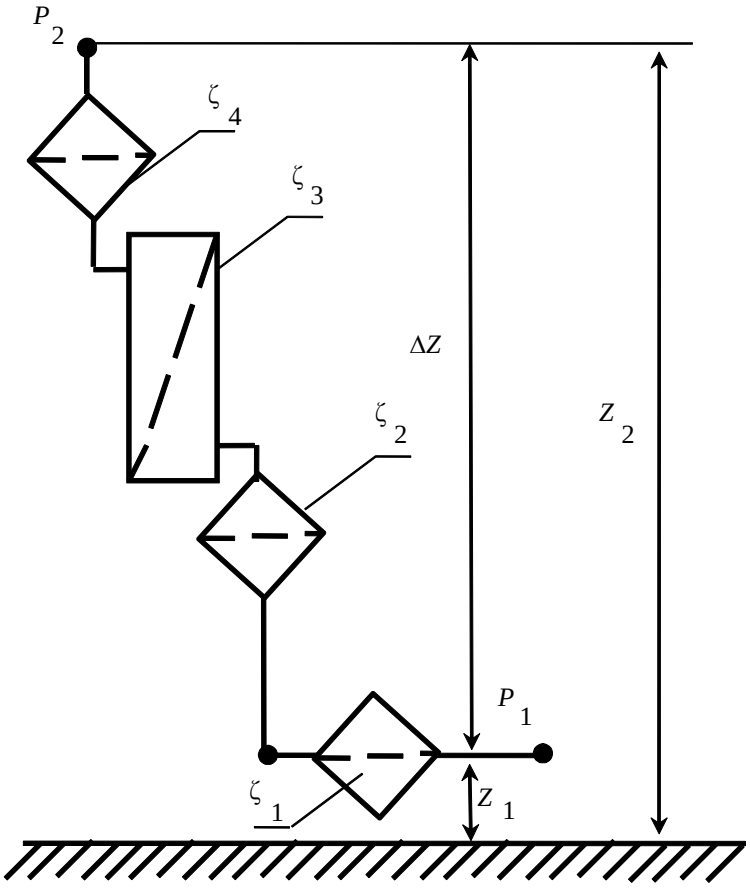


Рисунок 2 – Схема замещения водоналивного трубопровода:
ζ_3 – коэффициент потерь напора (Дарси) стерилизатора; ζ_1 – водоналивного шланга;
ζ_2 – участка трубы «заправочный кулачок – стерилизатор»;
ζ_4 – участка трубы «стерилизатор – бак холодного водоснабжения»

Уравнение Бернулли для модернизированного водоналивного трубопровода в соответствии с расчетной схемой имеет вид:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \sum h. \qquad (3)$$

Исходные данные для расчета расхода воды: давление в водоналивной колонке P = 0,2 – – 0,4 МПа [7]; длина водоналивных рукавов – 25 м, диаметр труб – 54 мм. Время заправки $t_{\text{запр}}$ = 7 – 15 мин и объем бака $V_{\text{бака}}$ = 850 – 1000 л [8, 9]. Верхний уровень расположения водоналивной трубы z_2 = 3 м. Из указанных величин расход воды для пассажирского вагона железнодорожного транспорта определяется по формуле:

$$G_{\text{запр}} = \frac{V_{\text{бака}}}{t_{\text{запр}}}. \qquad (4)$$

Минимальные и максимальные нормы времени заправки баков типовой конструкции и соответствующего им расчетного расхода воды приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Требуемый расход воды для заправки пассажирского вагона

$V_{бака}$, л	850	1000	850	1000
$t_{запр}$, мин	15	15	10	10
$G_{запр}$, л/с	0,94	1,11	1,42	1,67

Исходный напор воды определяется по формуле, м:

$$H_1 = \frac{P}{\rho g}; \tag{5}$$

$$H_1 = \frac{3 \cdot 10^5}{1000 \cdot 10} = 30 \text{ м}.$$

$$H_2 = H_1 - \Delta H, \tag{6}$$

где H_2 – напор в конце водоналивного канала, м;

ΔH – потери напора, м.

Потери напора воды

$$\Delta H = \Delta z + h_м + h_l, \tag{7}$$

где Δz – полная геометрическая высота подъема жидкости;

$h_м$ – местные потери;

h_l – линейные.

Линейные потери (на трение):

$$h_l = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}, \tag{8}$$

где λ – коэффициент потерь на трение по длине, принимаемый с учетом эквивалентной абсолютной шероховатости стенок труб $\Delta_э = 0{,}0001$ м;

l, d – длина и диаметр трубопровода;

v – скорость потока воды, м/с.

В общем случае местные потери на i-м элементе

$$h_i = \zeta_i \frac{v^2}{2g}, \tag{9}$$

откуда полные потери для расчетной схемы

$$\begin{aligned} \Delta H = \Delta z + h_l + h_м = \Delta z + (\lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} + \zeta_1 \frac{v^2}{2g} + \zeta_2 \frac{v^2}{2g} + \zeta_3 \frac{v^2}{2g} + \zeta_4 \frac{v^2}{2g}) = \\ = \Delta z + (\lambda \frac{l}{d} + \zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_3) \cdot \frac{v^2}{2g}. \end{aligned} \tag{10}$$

Потери в модернизированном стерилизаторе определяются следующим образом. Внутреннее пространство камеры обеззараживания представляет собой змеевик с прямоугольным сечением, «намотанным» на цилиндр (рисунок 3).

Каждый виток змеевика можно представить в виде отвода с поворотом на $\delta = 360^\circ$. Угол 50° – угол обмотки спирали. Общий коэффициент сопротивления отводов для удобства инженерных расчетов определяется как сумма коэффициентов местного сопротивления $\zeta_м$ и сопротивления трения $\zeta_{тр}$ поворота [10]. Для гладких стенок:

$$\zeta_{\text{тр}} = 0,017 \cdot n \cdot \delta \cdot \lambda_k \frac{R_0 \left(a_0 + b_0\right)}{2 \cdot a_0 \cdot b_0}, \qquad (11)$$

где n – число витков;

δ – угол поворота витка, град;

R_0 – радиус закругления осевой линии канала, м;

b_0, a_0 – ширина и высота канала витка (рисунок 4), м;

λ_k – коэффициент сопротивления трения криволинейных труб прямоугольного сечения для турбулентного режима (Re = 7000 – 38000), определяемый по формуле [10]:

$$\lambda_k = \left[0,136 + 8,65 \left(\frac{a_0 \cdot b_0}{R_0 \left(a_0 + b_0\right)} \right)^{1,32} \cdot \left(\frac{b_0}{a_0} \right)^{0,34} \right] \text{Re}^{-0,25}. \qquad (12)$$

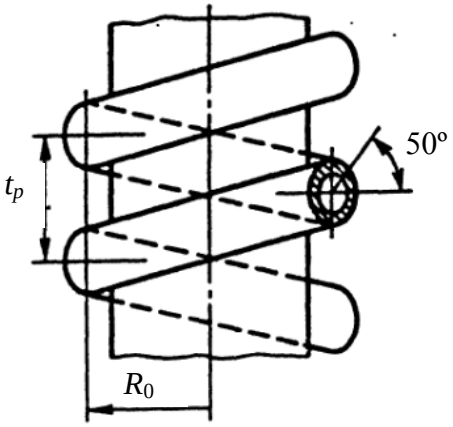


Рисунок 3 – Расчетная схема модернизированной камеры обеззараживания

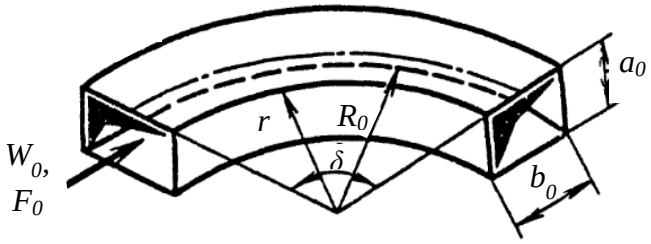


Рисунок 4 – Фрагмент витка модернизированной камеры обеззараживания

Коэффициент местного сопротивления одного витка $\zeta_{\text{м}}$ определим по формуле, предложенной Г. Н. Абрамовичем [10]:

$$\zeta_{\text{м}} = \left(0,7 + 0,35 \frac{\delta}{90} \right) \times 0,21 \left(\frac{R_0}{b_0} \right)^{-2,5} \times C_1, \qquad (13)$$

где C_1 – коэффициент, зависящий от размеров b_0, a_0:

$$C_1 = \begin{cases} 0,85 + 0,125 \dfrac{b_0}{a_0} & \text{при} \quad \dfrac{b_0}{a_0} < 4; \\ 1,115 - 0,84 \dfrac{b_0}{a_0} & \text{при} \quad \dfrac{b_0}{a_0} \geq 4. \end{cases} \qquad (14)$$

Так как высота канала a_0 (см. рисунок 4) в расчетах соизмерима с его шириной b_0, либо больше ее, то выполняется первое условие.

Итоговая формула расчета потерь напора в модернизированном стерилизаторе пассажирского вагона железнодорожного транспорта имеет вид:

$$\Delta H_{\text{уф}} = n \cdot \left(0,017 \cdot \delta \left[0,136 + 8,65 \cdot \left(\frac{a_0 \cdot b_0}{R_0 \left(a_0 + b_0\right)} \right)^{1,32} \left(\frac{b_0}{a_0} \right)^{0,34} \right] \text{Re}^{-0,25} \times \right.$$
$$\left. \times \frac{R_0 \left(a_0 + b_0\right)}{2 \cdot a_0 \cdot b_0} + \left(0,7 + 0,35 \frac{\delta}{90} \right) \times 0,21 \left(\frac{R_0}{b_0} \right)^{-2,5} \times 0,85 + 0,125 \frac{b_0}{a_0} \right) \times \frac{\text{v}^2}{2g}. \qquad (15)$$

Расчетные данные скоростей воды и чисел Рейнольдса для УФ-стерилизатора с различным числом витков для рабочего диапазона расхода (см. таблицу 1) приведены в таблице 2. Геометрические размеры камеры обеззараживания: R_1 = 0,015 м, R_2 = 0,05 м, L = 0,6 м.

Таблица 2 – Расчетное число скорости воды и чисел Рейнольдса для камеры обеззараживания с различным числом витков

Параметр	Значение параметра			
n	5			
$V_{ср}$, м/с	0,26857	0,3171	0,4057	0,4771
Re	9400	11100	14200	16700
n	10			
$V_{ср}$, м/с	0,53714	0,63429	0,81143	0,95429
Re	18800	22200	28400	33400
n	15			
$V_{ср}$, м/с	0,80571	0,95143	1,21714	1,43143
Re	28200	33300	42600	50100
n	20			
$V_{ср}$, м/с	1,07429	1,26857	1,622857	1,9085714
Re	37600	44400	56800	66800
n	25			
$V_{ср}$, м/с	1,34285	1,5857	2,0286	2,3857
Re	47000	55500	71000	83500
n	30			
$V_{ср}$, м/с	1,61143	1,902857	2,43429	2,862857
Re	56400	66600	85200	100200

Результаты расчета гидравлических потерь в УФ-стерилизаторе с различным количеством витков для водоналивной системы водоснабжения пассажирского вагона приведены на гистограмме (рисунок 5) и поверхности (рисунок 6).

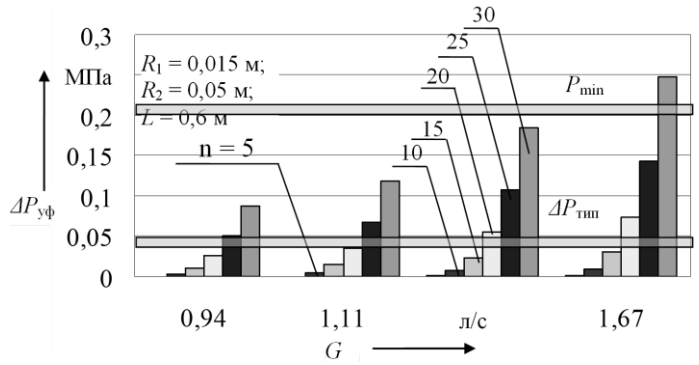


Рисунок 5 – Потери давления в УФ-стерилизаторе с различным числом витков

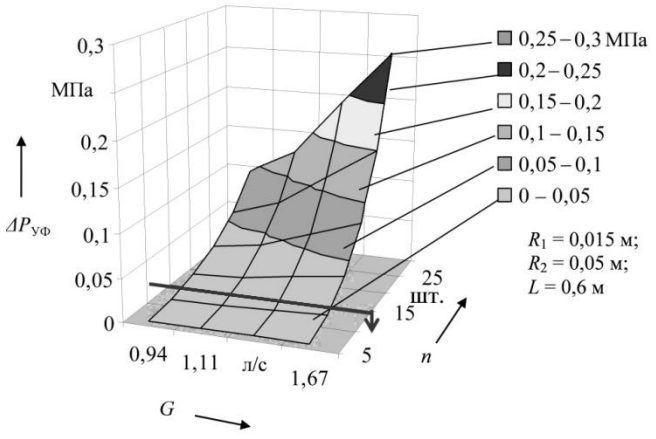


Рисунок 6 – Поверхность потерь давления в УФ-стерилизаторе

Параметры УФ-стерилизатора для определения его рациональных значений изменяются согласно данным таблицы 3.

Таблица 3 – Входные параметры и диапазон расчетных величин УФ-стерилизатора

Параметр	Обозначение параметра, ед. изм.	Диапазон расчетных величин	Шаг расчетных величин
Расход	$v_{запр}$, л/с	0,9 – 1,7	0,1
Температура воды	T, ºС	18 – 23	1
Давление	P, МПа	0,2 – 0,4	0,4
Высота УФ стерилизатора	$H_{уф}$, м	0,5 – 1,0	0,1
Ширина камеры обеззараживания	b_0, м	0,03 – 0,08	0,01
Количество витков	n, шт.	5 – 30	5
Шероховатость стенок	RMS, мкм	0,01 – 1	0,05

По результатам расчета можно сделать следующий вывод. При заданных геометрических параметрах и возможном снижении давления в заправочной колонке на железнодорожной станции до 0,2 МПа и величины потерь давления в типовых конструкциях не более 0,02 МПа максимальное количество витков в модернизированном УФ-стерилизаторе не должно превышать 15 (см. рисунок 5).

Результаты расчета общих потерь в модернизированной системе водоснабжения для различного количества витков устройства УФ-стерилизации с учетом потерь в трубе, наливном шланге и высоты установки бака приведены на рисунке 7.

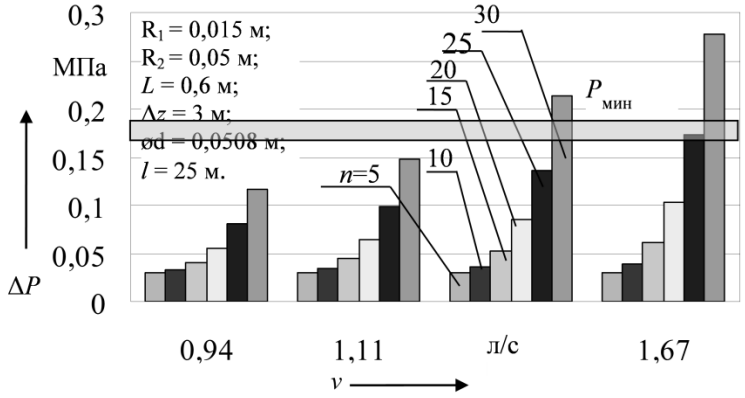


Рисунок 7 – Потери давления в системе водоснабжения пассажирского вагона с устройством УФ-стерилизации с учетом различного числа витков

Однако при 15 витках максимальные потери на УФ-стерилизаторе составляют 53 % от общих потерь, а при 10 расчетные потери давления составляют 24 % от общих потерь (рисунок 8).

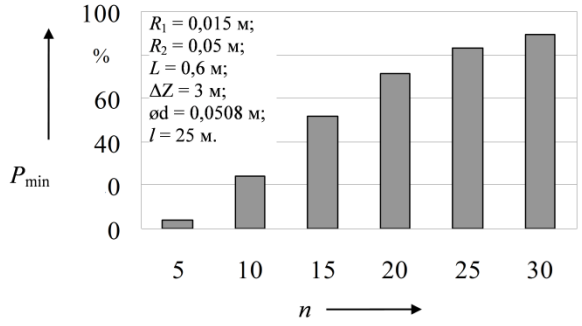


Рисунок 8 – Доля гидравлических потерь на УФ-стерилизаторе от общих в системе водоснабжения для различного числа витков

Рекомендуемая величина *n* (число витков) равна 10 из условий гарантирования заправки вагона за отведенное время и удовлетворительная величина потерь давления от общих потерь в типовых конструкциях УФ-стерилизатора.

Результаты расчета гидравлических потерь в УФ-стерилизаторе с 10 витками различной высоты для водоналивной системы водоснабжения пассажирского вагона приведены на рисунке 9, согласно которому минимум гидравлических потерь приходится на высоту 0,6 м. Данное значение принято за высоту макетного образца УФ-стерилизатора с оребрением, разработанного в ОмГУПСе и успешно прошедшего испытания.

Анализ гидравлического расчета показывает, что снижение давления из-за поперечных ребер в модернизированном УФ-стерилизаторе с концентрично установленными патрубками будет выше, чем без ребер, что скажется на снижении скорости (как максимума, так и ее среднего значения). Это привет к увеличению времени заправки и снижению интенсивности перемешивания. Величина потерь напора определяется расчетным путем и верифицируется экспериментально. Рекомендуемая величина витков из условий гарантирования заправки водой пассажирского вагона равна 10, при этом расчетные потери давления составляют 24 % от общих потерь.

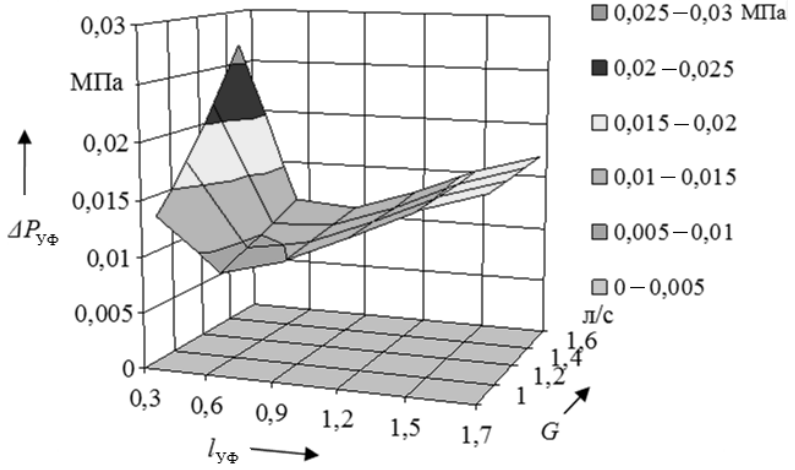


Рисунок 9 – Поверхность распределения потерь в УФ-стерилизаторе с 10 витками в зависимости от расхода воды и высоты

Разработанная модель расчета потерь напора воды в модернизированном стерилизаторе может применяться и при других расходах воды, а также при других конструкциях для различных отраслей народного хозяйства.

Список литературы

1. Томилова, О. С. Расчет эффективности УФ-стерилизатора модернизированной системы водоснабжения пассажирского вагона [Текст] / О. С. Томилова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2012. – № 3. – С. 47 – 54.

2. Матяш, Ю. И. Устройства по предотвращению появления вторичного загрязнения питьевой воды в пассажирских вагонах дальнего следования [Текст] / Ю. И. Матяш, О. С. Томилова // Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2010. – С. 115 – 122.

3. Матяш, Ю. И. Устройство для обеззараживания воды в пассажирских поездах дальнего следования [Текст] / Ю. И. Матяш, О. С. Томилова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2010. – № 4. – С. 23 – 27.

4. Матяш, Ю. И. Применение ультрафиолетовых стерилизаторов для обеззараживания воды в пассажирских поездах дальнего следования [Текст] / Ю. И. Матяш, О. С. Томилова // Инновации для транспорта / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – Ч. 2. – С. 176 – 180.

5. Матяш, Ю. И. Моделирование процессов протекания жидкости в ультрафиолетовом стерилизаторе модернизированной системы водоснабжения пассажирского вагона [Текст] / Ю. И. Матяш, О. С. Томилова, В. В. Томилов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2011. – № 2. – С. 16 – 21.

6. Моделирование течений жидкости в УФ-стерилизаторе модернизированной системы водоснабжения пассажирского вагона железнодорожного транспорта [Текст] / Ю. И. Матяш, О. В. Гателюк и др. // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2013. – № 1. – С. 18 – 27.

7. Организация железнодорожных пассажирских перевозок [Текст] / А. А. Авдовский, А. С. Бадаев и др. – М.: Академия, 2008. – 256 с.

8. Акимов, О. В. Водоснабжение и водоотведение на железнодорожном транспорте: Учебное пособие [Текст] / О. В. Акимов, Ю. М. Акимова, А. Н. Ганус / Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения. – Хабаровск, 2010. – 34 с.

9. Акимов, О. В. Водоснабжение железнодорожной станции [Текст] / О. В. Акимов, А. Н. Ганус / Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения. – Хабаровск, 2004. – 24 с.

10. Справочник по гидродинамическим сопротивлениям [Текст] / Под ред. И. Е. Идельчика. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.

References

1. Tomilova O. S. Calculation UV sterilizer of the efficiency to modernize the system for passenger car [Raschet effectivnosti UF-sterilisatora modernisirovannoy sistemy vodosnabzheniya passazhirskogo vagona]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2012, no. 3, pp. 47 – 54.

2. Matyash, Y. I., Tomilova O. S. *Devices for water disinfection of secondary pollution in long-distance passenger cars* [Ustroystva po predotvrascheniyu poyavleniya vtorichnogo sagryazneniya pitevoy vody v passazhirskih vagonah dalnego sledovaniya]. *Innovatsionnye proekty i novye tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte – Innovative projects and new technologies in education, industry and transport*, 2010, pp. 115 – 122.

3. Matyash, Y. I., Tomilova O. S. D*evices for water disinfection in long-distance passenger cars* [Ustroystva dlya obbezzarazhivaniya vody v passazhirskih vagonah dalnego sledovaniya]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2010, no. 4, pp. 23 – 27.

4. Matyash, Y. I., Tomilova O. S. *Using of Ultraviolet sterilizers for water disinfection in passenger long-distance trains* [Primenenie ultrafioletovyh sterilizatorov dlya obezzarazhivaniya vody v passazhirskih poezdah dalnego sledovaniya]. *Innovatsii dlia transporta – Innovations for Transport*, 2010, Part 2, pp. 176 – 180.

5. Matyash, Y. I., Tomilova O. S., Tomilov V. V. Modeling of fluid flow in the ultraviolet sterilizer in the modern water system of passenger car [Modelirovanie processov protekaniya zhidkosti v ultrafioletovom sterilizatore modernisirovannoy sistemy vodosnabzheniya passazhirskogo vagona]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2011, no. 2, pp. 16 – 21.

6. Matyash, Y. I., Tomilova O. S., Tomilov V. V., Gatelyuk O. V. Flow modeling in UV sterilizer modern water systems in rail transport [Modelirovanie techeniy zhidkosti v UF-sterilizatore modernisirovannoy sistemy vodosnabzheniya passazhirskogo vagona zhelesnodorozhnogo transporta]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2013, no. 1, pp 18 – 27.

7. Avdovsky A. A. *Organizaciya zhelesnodorozhnyh passazhirskih perevosok* [Organization of rail passenger transport]. Moscow: Publishing center «Academy», 2008, 256 p.

8. Akimov O. V. Vodosnabzhenie i vodootvedenie na zhelesnodorozhnom transporte: Uchebnoe posobie [Water supply and drainage in railway transport: Textbook]. Khabarovsk: DVGUPS, 2010, 34 p.

9. Akimov O. V. *Vodosnavzhenie zhelesnodorozhnoy stancii: Metodicheskoe posobie po vypolneniyu raschetno-graficheskih* [Water in railway station: Toolkit for the implementation of the settlement and graphic works]. Khabarovsk: DVGUPS, 2004, 24 p.

10. Idelchik I. E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam* [Reference hydrodynamic resistance]. Moscow: Engineering, 1992, 672 p.

УДК 621.333:621.314.26:621.313.33:621.317

В. В. Харламов, Д. И. Попов, А. В. Литвинов

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТРЕБЛЯЕМОЙ МОЩНОСТИ ВО ВРЕМЯ ИСПЫТАНИЙ АСИНХРОННЫХ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МЕТОДОМ ВЗАИМНОЙ НАГРУЗКИ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ИХ ПИТАНИЯ

В статье предлагается использование косвенного метода определения мощности, потребляемой (генерируемой) асинхронными тяговыми двигателями, в процессе их испытаний методом взаимной нагрузки и с учетом особенностей их питания от преобразователей частоты, что позволяет отказаться от использования сложных аппаратно-программных комплексов в пользу стандартных общепромышленных электроизмерительных приборов.

Существующие схемы испытаний асинхронных тяговых двигателей методом взаимной нагрузки имеют в своем составе преобразователи частоты, являющиеся источником несинусоидального напряжения и переменной частоты [1 – 3]. Следовательно, для определения мощности, потребляемой асинхронными тяговыми двигателями во время испытаний, необходимо проводить измерения в трехфазных несинусоидальных цепях с частотой тока, которая может отличаться от 50 Гц. Для непосредственного измерения этой мощности требуется применение специальных приборов и схем измерения электрической мощности.

В настоящее время известно несколько способов измерения электрической мощности в несинусоидальных цепях переменного тока [4 – 6]. Приведенные способы характеризуются использованием специальных датчиков, микросхем, наличием сложного программного обеспечения, что приводит к усложнению и повышению стоимости измерительной схемы.

Таким образом, индивидуально для каждой из упомянутых выше схем испытаний разработаны методики определения мощности, потребляемой асинхронными тяговыми двигателями, учитывающие их питание от преобразователей частоты.

1. Методика определения мощности, потребляемой асинхронными тяговыми двигателями в процессе их испытаний методом взаимной нагрузки, с использованием одного преобразователя частоты для питания схемы.

На рисунке 1 показаны схема испытаний асинхронных тяговых двигателей методом их взаимной нагрузки и подключенные к схеме измерительные приборы. На схеме обозначены следующие элементы: 1 – частотный преобразователь; 1.1 – управляемый выпрямитель-инвертор; 1.2 – звено постоянного тока; 1.3 – управляемый выпрямитель-инвертор; АМ1, АМ2 – испытуемые асинхронные тяговые двигатели; 2 – механическая связь валов асинхронных двигателей, обеспечивающая равенство частот вращения; 3 – 6 – контакторы для подключения одного из двигателей к частотному преобразователю или сети; 7, 9 – трехфазные общепромышленные ваттметры; 8 – трехфазный измеритель мощности.

Определение электрической мощности, потребляемой асинхронными двигателями при испытании их методом взаимной нагрузки, проводится в два этапа.

На первом этапе выполняют следующие действия:

подачей питания на частотный преобразователь 1 обеспечивают питание асинхронных тяговых двигателей АМ1 и электродвигателя АМ2 от сети;

осуществляется запуск обеих машин – АМ1, АМ2 – на холостом ходу при номинальной частоте напряжения, питающего двигатели;

при неизменной частоте напряжения, питающего двигатель АМ2, уменьшается частота напряжения, питающего двигатель АМ1, за счет чего АМ1 нагружается в режиме генератора, а АМ2 – в режиме двигателя; проводится измерение мощности двумя трехфазными ваттметрами – 7, 9 – и трехфазным измерителем мощности 8, по измеренным значениям мощности определяют зависимость потерь в частотном преобразователе 1 от мощности, возвращаемой в сеть $P_{c1}{}^{г}$:

$$\Delta P_{\text{пч}}\,(P_{\text{с1}}{}^{\text{г}}) = P_{\text{АМ1}}{}^{\text{г}} - P_{\text{с1}}{}^{\text{г}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{АМ1}}{}^{\text{г}}$ – измеренное значение мощности, вырабатываемой генератором АМ1;

$P_{\text{с1}}{}^{\text{г}}$ – измеренное значение мощности, возвращаемой в сеть;

при неизменной частоте напряжения, питающего АМ2, увеличивается частота напряжения, питающего АМ1, за счет чего АМ1 нагружается в режиме двигателя, а АМ2 – в режиме генератора; проводится измерение мощности двумя трехфазными ваттметрами 7, 9 и трехфазным измерителем мощности 8, по измеренным значениям мощности определяют зависимость потерь в частотном преобразователе 1 от мощности, потребляемой из сети:

$$\Delta P_{\text{пч}}\,(P_{\text{с1}}{}^{\text{д}}) = P_{\text{с1}}{}^{\text{д}} - P_{\text{АМ1}}{}^{\text{д}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{с1}}{}^{\text{д}}$ – измеренное значение мощности, потребляемой из сети;

$P_{\text{АМ1}}{}^{\text{д}}$ – измеренное значение мощности, потребляемой двигателем АМ1.

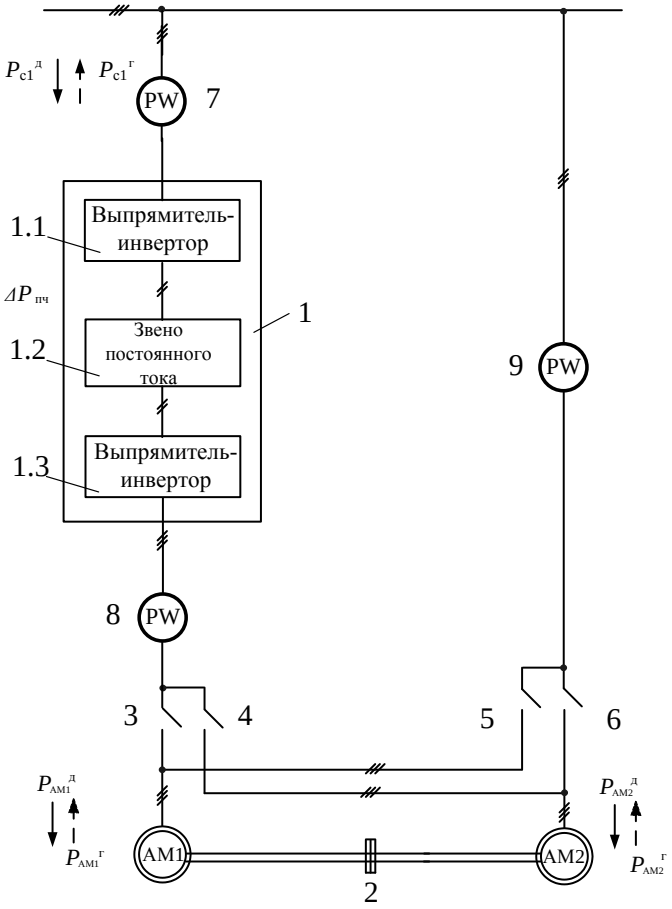


Рисунок 1 – Схема для испытания асинхронных тяговых двигателей методом их взаимной нагрузки с использованием одного преобразователя частоты и комплектом электроизмерительных приборов

Второй этап проводится следующим образом. Измеритель мощности 8 на данном этапе не требуется. При некотором установившемся режиме измеряются значения РАМ2д или РАМ2г и $P_{\text{с1д}}$ или $P_{\text{с1г}}$, после этого выражаются и находятся следующие величины: определяются РАМ1г из зависимости (1) –РАМ1д из зависимости (2).

2. Методика определения мощности, потребляемой асинхронными тяговыми двигателями в процессе их испытаний методом взаимной нагрузки, с использованием двух преобразователей частоты для питания схемы.

На рисунке 2 показаны схема испытаний асинхронных тяговых двигателей методом их взаимной нагрузки и подключенные к схеме измерительные приборы [7]. На рисунке 2 обозначены следующие элементы: АМ1, АМ2 – испытуемые асинхронные двигатели; 1, 2 – преобразователи частоты; 1.1, 2.1 – неуправляемые выпрямители первого и второго частотных

преобразователей; 1.2, 2.2 – звенья постоянного тока первого и второго частотных преобразователей; 1.3, 2.3 – управляемые выпрямитель-инверторы первого и второго частотных преобразователей; 3 – механическая связь валов двигателей АМ1 и АМ2, вращающихся с одинаковой угловой частотой; 4 – общая шина постоянного тока; 5, 6 – контакторы; 7, 8 – трехфазные общепромышленные ваттметры; 9 – трехфазный измеритель мощности; 10 – амперметр постоянного тока; 11 – вольтметр постоянного тока.

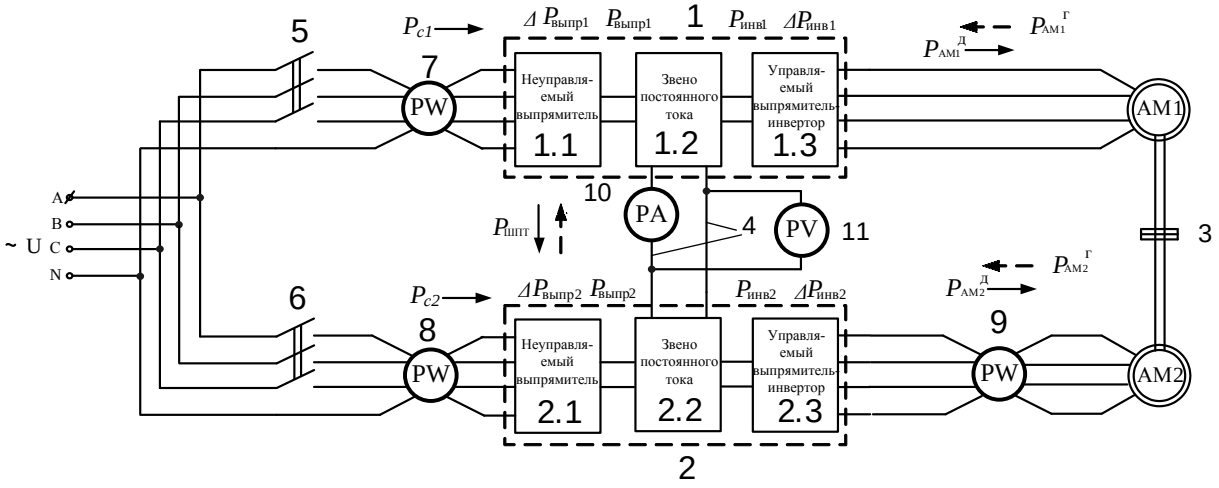


Рисунок 2 – Схема для испытания асинхронных тяговых двигателей методом их взаимной нагрузки с использованием двух преобразователя частоты и комплектом электроизмерительных приборов (второй измерительный этап)

Определение электрической мощности, потребляемой асинхронными двигателями при испытании их методом взаимной нагрузки. На первом этапе собирается схема, приведенная на рисунке 3.

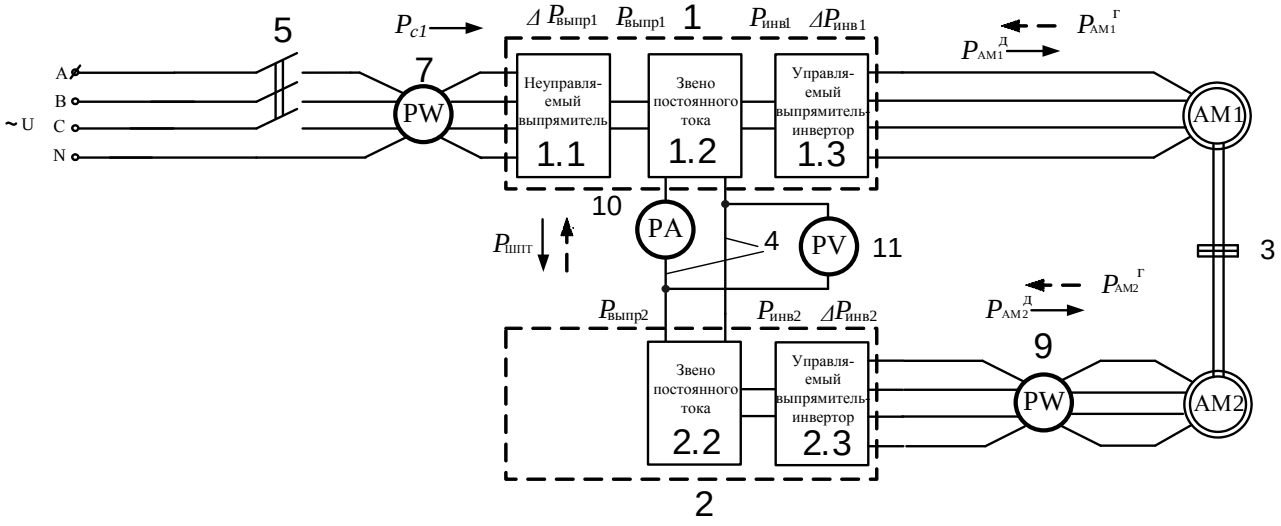


Рисунок 3 – Схема для испытания асинхронных двигателей методом их взаимной нагрузки с использованием двух преобразователей частоты и комплектом электроизмерительных приборов (первый измерительный этап)

На первом этапе проводят действия в следующей последовательности:

подается питание из сети на неуправляемый выпрямитель 1.1 первого преобразователя: осуществляется запуск обеих машин – АМ1, АМ2 – на холостом ходу при номинальной частоте напряжения, питающего двигатели;

при неизменной частоте напряжения, питающего АМ2, уменьшается частота напряжения, питающего АМ1, за счет чего АМ1 нагружается в режиме генератора, а АМ2 – в режиме двигателя; проводятся измерения мощности, передаваемой через шину постоянного тока 4, и

мощности, подаваемой на двигатель АМ2 от управляемого выпрямителя-инвертора 2.3, по разности которых определяется зависимость потерь в управляемом выпрямителе-инверторе 2.3 от мощности, потребляемой двигателем АМ2:

$$\Delta P_{\text{инв2}}\,(P_{\text{АМ2}}{}^{\text{Д}}) = P_{\text{шпт}}\,(P_{\text{АМ2}}{}^{\text{Д}}) - P_{\text{АМ2}}{}^{\text{Д}}; \quad (3)$$

при неизменной частоте напряжения, питающего АМ2, увеличивается частота напряжения, питающего АМ1, за счет чего АМ2 нагружается в режиме генератора, а АМ1 – в режиме двигателя; проводятся измерения мощности, передаваемой через шину постоянного тока 4, и мощности, вырабатываемой генератором АМ2, по разности которых определяется зависимость потерь в управляемом выпрямителе-инверторе 2.3 от мощности, вырабатываемой генератором АМ2 и передаваемой от него в звено постоянного тока:

$$\Delta P_{\text{инв2}}\,(P_{\text{АМ2}}{}^{\text{Г}}) = P_{\text{АМ2}}{}^{\text{Г}} - P_{\text{шпт}}\,(P_{\text{АМ2}}{}^{\text{Г}}); \quad (4)$$

определяется зависимость мощности, подводимой к выпрямителю-инвертору 2.3 второго частотного преобразователя 2, от мощности, потребляемой двигателем АМ2:

$$P_{\text{инв2}}\,(P_{\text{АМ2}}{}^{\text{Д}}) = \Delta P_{\text{инв}}(P_{\text{АМ2}}{}^{\text{Д}}) + P_{\text{АМ2}}{}^{\text{Д}}; \quad (5)$$

рассчитывается зависимость мощности, передаваемой от выпрямителя-инвертора 2.3 второго частотного преобразователя 2 в общую шину постоянного тока 4, от мощности, вырабатываемой генератором АМ2:

$$P_{\text{инв2}}\,(P_{\text{АМ2}}{}^{\text{Г}}) = P_{\text{АМ2}}{}^{\text{Г}} - \Delta P_{\text{инв}}(P_{\text{АМ2}}{}^{\text{Г}}). \quad (6)$$

Используя зависимости (5) и (6), получаем:

$$\Delta P_{\text{инв.}}{}^{\text{Д}} = f\,(P_{\text{инв}}\,(P_{\text{АМ2}}{}^{\text{Д}})); \quad (7)$$

$$\Delta P_{\text{инв.}}{}^{\text{Г}} = f\,(P_{\text{инв}}\,(P_{\text{АМ2}}{}^{\text{Г}})). \quad (8)$$

На втором этапе определяются потери в неуправляемом выпрямителе.

Измерения на втором этапе проводятся по схеме, приведенной на рисунке 2, отличительная особенность которой состоит в том, что электрическая энергия от сети в звенья постоянного тока 1.2 и 2.2 передается по обоим неуправляемым выпрямителям 1.1 и 2.1 преобразователей частоты 1 и 2 одновременно. Измерения проводятся при тех же режимах работы асинхронных тяговых машин, что и на первом этапе.

В результате измерений получают следующие зависимости:

мощность на выходе неуправляемого выпрямителя 2.1 второго частотного преобразователя 2 от мощности, потребляемой двигателем АМ2:

$$P_{\text{выпр2}}(P_{\text{АМ2}}{}^{\text{Д}}) = P_{\text{инв2}}(P_{\text{АМ2}}{}^{\text{Д}}) - P_{\text{шпт}}(P_{\text{АМ2}}{}^{\text{Д}})\,, \quad (9)$$

где $P_{\text{инв2}}(P_{\text{АМ2}}{}^{\text{Д}})$ определяется по выражению (5);

мощность на выходе неуправляемого выпрямителя 2.1 второго частотного преобразователя 2 от мощности, вырабатываемой генератором АМ2:

$$P_{\text{выпр2}}(P_{\text{АМ2}}{}^{\text{Г}}) = P_{\text{шпт}}(P_{\text{АМ2}}{}^{\text{Г}}) - P_{\text{инв2}}(P_{\text{АМ2}}{}^{\text{Г}}), \quad (10)$$

где $P_{\text{инв2}}(P_{\text{АМ2}}{}^{\text{Г}})$ определяется по выражению (6);

потери мощности в неуправляемом выпрямителе 2.1 второго частотного преобразователя 2 от мощности, передаваемой им в звено постоянного тока при работе машины АМ2 как в двигательном, так и в генераторном режиме:

$$\Delta P_{\text{выпр2}}\,(P_{\text{выпр2}}(P_{\text{АМ2}}{}^{\text{Д}})) = P_{\text{с2}}\,(P_{\text{АМ2}}{}^{\text{Д}}) - P_{\text{выпр2}}(P_{\text{АМ2}}{}^{\text{Д}}); \quad (11)$$

$$\Delta P_{\text{выпр2}}\,(P_{\text{выпр2}}(P_{\text{АМ2}}{}^{\text{Г}})) = P_{\text{с2}}\,(P_{\text{АМ2}}{}^{\text{Г}}) - P_{\text{выпр2}}(P_{\text{АМ2}}{}^{\text{Г}}), \quad (12)$$

где $P_{\text{с2}}$ – мощность, потребляемая вторым частотным преобразователем 2 из сети.

Второй этап завершается определением зависимости потерь мощности в неуправляемом выпрямителе 2.1 от подводимой к нему мощности из сети:

$$\Delta P_{\text{выпр}}{}^{\text{д}} = f\,(P_{\text{с}}\,(P_{\text{АМ2}}{}^{\text{д}})); \quad (13)$$

$$\Delta P_{\text{выпр}}{}^{\text{г}} = f\,(P_{\text{с}}\,(P_{\text{АМ2}}{}^{\text{г}})). \quad (14)$$

Необходимо выполнить действия в соответствии с формулами (3) – (14) как для первого, так и для второго частотного преобразователя.

Составляющие $P_{\text{с}}$, $P_{\text{АМ2}}{}^{\text{д}}$, $P_{\text{АМ2}}{}^{\text{г}}$, $P_{\text{шпт}}$ получены по результатам измерений. Первые два этапа проводятся только один раз. Цель первых двух этапов – получение зависимостей (3) – (14) для их дальнейшего многократного использования.

Третий этап проводится следующим образом. Измеритель мощности 9 на данном этапе не требуется. При некотором установившемся режиме измеряются величины $P_{\text{с1}}$, $P_{\text{с2}}$, $P_{\text{шпт}}$, после чего выражаются и определяются следующие величины:

– $\Delta P_{\text{выпр1}}$, $\Delta P_{\text{выпр2}}$ определяются из уравнений (13), (14);

– $P_{\text{выпр1}}$, $P_{\text{выпр2}}$ определяются из (11) и (12);

– $P_{\text{инв1}}$, $P_{\text{инв2}}$ определяются из (9) и (10);

– $\Delta P_{\text{инв1}}$, $\Delta P_{\text{инв2}}$ определяются из (7), (8);

– $P_{\text{АМ}}{}^{\text{д}}$ и $P_{\text{АМ}}{}^{\text{г}}$ определяются из (5) и (6).

В случае, если поставляемые частотные преобразователи имеют в своем комплекте тормозные модули и реостаты [7], то возможно определение мощности, потребляемой асинхронными тяговыми двигателями в процессе их испытания методом взаимной нагрузки и с учетом особенностей питания схемы от двух преобразователей частоты с использованием следующей методики.

Схема испытаний (рисунок 4) отличается от схемы, представленной на рисунке 2, наличием следующих элементов: 11 – тормозной модуль; 12 – вольтметр постоянного тока; 13 – амперметр постоянного тока; 14 – тормозной реостат. Определение мощности, потребляемой асинхронными тяговыми двигателями в процессе их испытаний методом взаимной нагрузки с учетом особенностей питания схемы от двух преобразователей частоты и комплектом тормозного электрооборудования, проводится в три этапа.

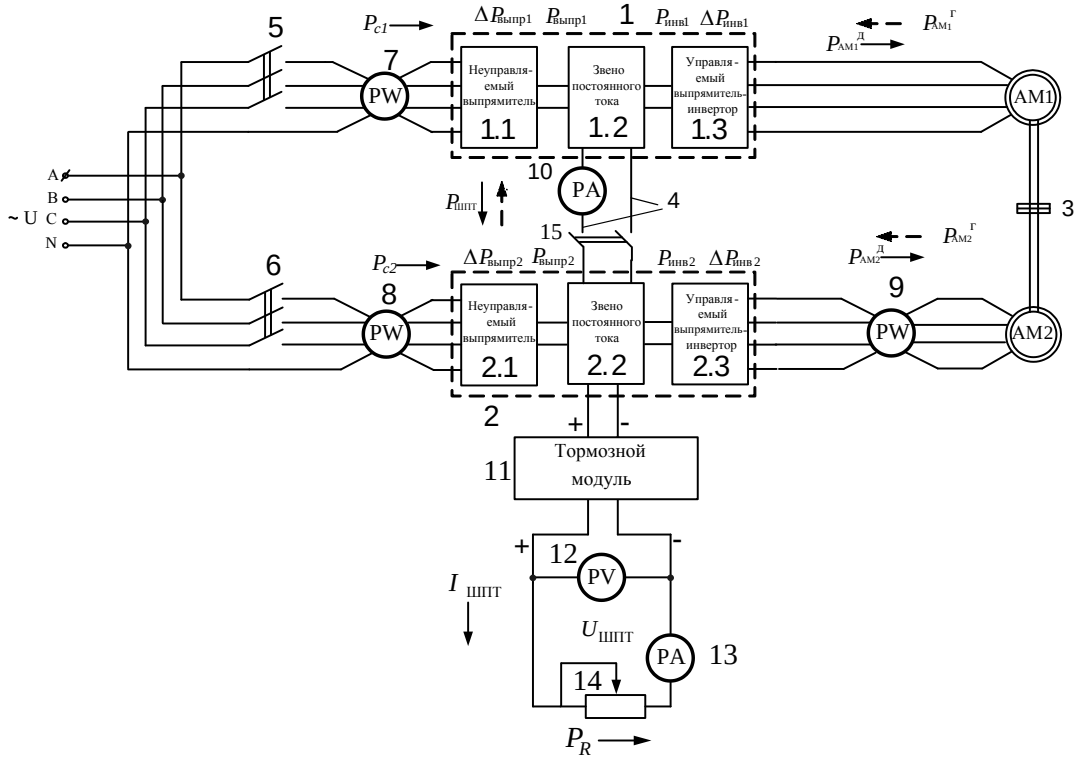


Рисунок 4 – Схема для испытания асинхронных тяговых двигателей методом их взаимной нагрузки с использованием двух преобразователей частоты, комплектом электроизмерительных приборов и тормозным электрооборудованием

Первый этап проводится в следующей последовательности:

разорвать электрическую связь между частотными преобразователями с помощью контактора 15;

подключить тормозной модуль 11 к звену постоянного тока 2.2 второго частотного преобразователя, что обеспечит подключение тормозного реостата 14 к звену постоянного тока 2.2 и регулированием сопротивления нагрузочного реостата 14 изменять величину мощности $P_{\text{шпт}}$ на выходе из неуправляемого выпрямителя 2.1, фиксировать результаты измерений мощности $P_{\text{шпт}}$ при каждом значении сопротивления пускового реостата 14 и одновременно вести учет потребляемой преобразователем частоты мощности $P_{\text{с2}}$ из сети. По разности измеренных мощностей определяется зависимость потерь в неуправляемом выпрямителе 2.1 от мощности, потребляемой из сети:

$$\Delta P_{\text{выпр2}}\,(P_{\text{с2}}) = P_{\text{с2}} - P_{\text{шпт}}\,(P_{\text{с2}}), \tag{15}$$

где $P_{\text{шпт}}$ – мощность, передаваемая по звену постоянного тока (на выходе неуправляемого выпрямителя 2.1):

$$P_{\text{шпт}} = P_R = I_{\text{шпт}} \cdot U_{\text{шпт}}, \tag{16}$$

где P_R – потери мощности на нагрузочном реостате 14;

$I_{\text{шпт}}$ – ток, потребляемый нагрузочным реостатом 14;

$U_{\text{шпт}}$ – напряжение на нагрузочном реостате 14.

На втором этапе определяются потери в управляемом выпрямителе-инверторе 1.3. Необходимо провести следующие действия:

подключить измеритель мощности 9 в цепь питания асинхронной машины АМ1;

разорвать электрическую связь первого частного преобразователя с сетью, разомкнув контактор 5;

установить электрическую связь между частотными преобразователями с помощью контактора 15;

подать питание из сети на неуправляемый выпрямитель 2.1 частотного преобразователя 2, осуществить запуск обеих машин – АМ1, АМ2 – на холостом ходу при номинальной частоте напряжения, питающего двигатели;

при неизменной частоте напряжения, питающего АМ1, уменьшается частота напряжения, питающего АМ2, за счет чего АМ2 нагружается в режиме генератора, а АМ1 – в режиме двигателя; проводятся измерения мощности, передаваемой через шину постоянного тока 4, и мощности, подаваемой на двигатель АМ1 от управляемого выпрямителя-инвертора 1.3, по разности которых определяется зависимость потерь в управляемом выпрямителе-инверторе 1.3 от мощности, потребляемой двигателем АМ1:

$$\Delta P_{\text{инв1}}\,(P_{\text{АМ1}}{}^{\text{д}}) = P_{\text{шпт}}\,(P_{\text{АМ1д}}) - P_{\text{АМ1д}}; \tag{17}$$

при неизменной частоте напряжения, питающего АМ1, увеличивается частота напряжения, питающего АМ2, за счет чего АМ1 нагружается в режиме генератора, а АМ2 – в режиме двигателя; проводятся измерения мощности, передаваемой через шину постоянного тока 4, и мощности, вырабатываемой генератором АМ1, по разности которых определяется зависимость потерь в управляемом выпрямителе-инверторе 1.3 от мощности, вырабатываемой генератором АМ1 и передаваемой от него в звено постоянного тока 4:

$$\Delta P_{\text{инв1}}\,(P_{\text{АМ1}}{}^{\text{г}}) = P_{\text{АМ1}}{}^{\text{г}} - P_{\text{шпт}}\,(P_{\text{АМ1}}{}^{\text{г}}); \tag{18}$$

определяется зависимость мощности, подводимой к выпрямителю-инвертору 1.3 первого частотного преобразователя 1, от мощности, потребляемой двигателем АМ1:

$$P_{\text{инв1}}\,(P_{\text{АМ1}}{}^{\text{д}}) = \Delta P_{\text{инв}}(P_{\text{АМ1}}{}^{\text{д}}) + P_{\text{АМ1}}{}^{\text{д}}; \tag{19}$$

определяется зависимость мощности, подводимой к выпрямителю-инвертору 1.3 первого частотного преобразователя 1, от мощности, вырабатываемой генератором АМ1:

$$P_{\text{инв1}}\,(P_{\text{АМ1}}{}^{\text{г}}) = P_{\text{АМ1}}{}^{\text{г}} - \Delta P_{\text{инв}}(P_{\text{АМ1}}{}^{\text{г}}). \tag{20}$$

Используя зависимости (19) и (20), получаем:

$$\Delta P_{\text{инв}}{}^{\text{д}} = f\left(P_{\text{инв}}\left(P_{\text{АМ1}}{}^{\text{д}}\right)\right); \quad (21)$$

$$\Delta P_{\text{инв}}{}^{\text{г}} = f\left(P_{\text{инв}}\left(P_{\text{АМ1}}{}^{\text{г}}\right)\right). \quad (22)$$

Составляющие $P_{\text{с1}}$, $P_{\text{с2}}$, $P_{\text{АМ1}}{}^{\text{г}}$, $P_{\text{АМ1}}{}^{\text{д}}$, $P_{\text{шпт}}$ получены по результатам измерений. Последовательность действий, выполненных для первого частотного преобразователя, необходимо провести и для второго частного преобразователя. Первые два этапа проводятся только один раз. Цель первых двух этапов – получение зависимостей (15) – (22) для их дальнейшего многократного использования.

Третий этап проводится следующим образом. Измеритель мощности 9 на данном этапе не требуется. При некотором установившемся режиме измеряются величины $P_{\text{с1}}$, $P_{\text{с2}}$, $P_{\text{шпт}}$, после чего из следующих имеющихся зависимостей выражаются и находятся следующие величины:

– из выражения (15) определяются $\Delta P_{\text{выпр1}}$, $\Delta P_{\text{выпр2}}$;

– из (16) определяются $P_{\text{выпр1}}$, $P_{\text{выпр2}}$ или $P_{\text{шпт}}$;

– из (19) и (20) определяются $P_{\text{инв1}}$, $P_{\text{инв2}}$;

– из (21), (22) определяются $\Delta P_{\text{инв1}}$, $\Delta P_{\text{инв2}}$;

– из (17) и (18) определяются $P_{\text{АМ1}}{}^{\text{д}}$ и $P_{\text{АМ1}}{}^{\text{г}}$.

3. Методика определения мощности, потребляемой асинхронными тяговыми двигателями в процессе их испытаний методом взаимной нагрузки с использованием нестандартного преобразователя частоты для питания схемы.

На рисунке 5 показаны схема испытаний асинхронных двигателей и подключенные к схеме измерительные приборы, где обозначены следующие элементы: 1 – нестандартный преобразователь частоты, состоящий из 1.1 – неуправляемый выпрямитель; 1.2 – звено постоянного тока; 1.3.1, 1.3.2 – управляемые выпрямители-инверторы для питания первого и второго двигателей; АМ1, АМ2 – испытуемые асинхронные тяговые двигатели; 2 – механическая связь, обеспечивающая равенство угловых частот вращения асинхронных двигателей; 3 – общая шина постоянного тока; 5, 6 – амперметры постоянного тока; 4 – вольтметр постоянного тока; 7 – трехфазный измеритель мощности; 8 – трехфазный общепромышленный ваттметр.

Определение электрической мощности, потребляемой асинхронными двигателями при испытании их методом взаимной нагрузки, для принятой схемы стенда (см. рисунок 5) проводится в три этапа.

На первом этапе необходимо выполнить следующие действия:

от источника электрической энергии подается питание на общий неуправляемый выпрямитель 1.1, осуществляется запуск обеих машин АМ1, АМ2 на холостом ходу при номинальной частоте напряжения, питающего двигатели;

при неизменной частоте напряжения, питающего АМ1, уменьшается частота напряжения, питающего АМ2, за счет чего АМ2 нагружается в режиме генератора, а АМ1 – в режиме двигателя; проводится определение мощности, передаваемой по общей шине постоянного тока 3, как произведение величины постоянного тока, потребляемого управляемым выпрямителем-инвертором 1.3.1, напряжения в общей шине постоянного тока, и мощности, которая подается на двигатель АМ1 от управляемого выпрямителя-инвертора 1.3.1; по разности полученных мощностей определяется зависимость потерь в управляемом выпрямителе-инверторе 1.3.1 от мощности, потребляемой двигателем АМ1:

$$\Delta P_{\text{инв1}}\left(P_{\text{АМ1}}{}^{\text{д}}\right) = P_{\text{шпт1}}\left(P_{\text{АМ1}}{}^{\text{д}}\right) - P_{\text{АМ1}}{}^{\text{д}}, \quad (23)$$

где $\Delta P_{\text{инв}}\left(P_{\text{АМ1}}{}^{\text{д}}\right)$ – зависимость потерь в инверторе от мощности, потребляемой асинхронным двигателем, Вт;

$P_{шпт1}$ ($P_{АМ1}^{Д}$) – измеренное значение мощности, передаваемой по общей шине постоянного тока на испытуемый двигатель, которое определяется следующими параметрами, Вт:

$$P_{шпт1}\ (P_{АМ1}^{Д}) = P_{шпт2}\ (P_{АМ1}^{Г}) + I_{шпт} \cdot U_{шпт}, \quad (24)$$

где $P_{шпт2}$ ($P_{АМ1}^{Г}$) – измеренное значение мощности, передаваемой по общей шине постоянного тока, Вт;

$I_{шпт}$ – общий ток, поступающий в шину постоянного тока, А;

$P_{АМ1}^{Д}$ – значение мощности, потребляемой асинхронным двигателем, Вт.

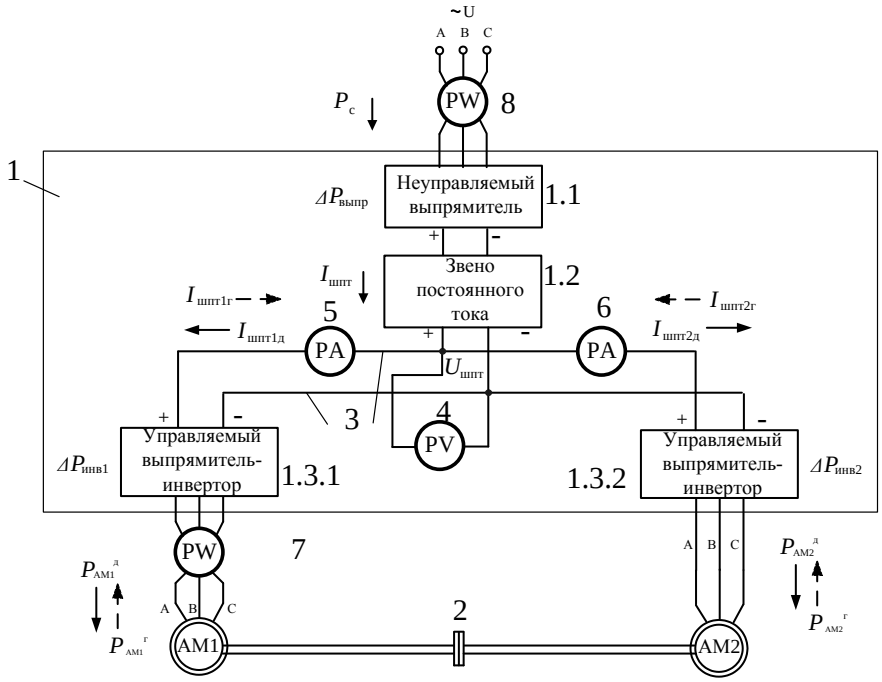


Рисунок 5 – Схема для испытания асинхронных тяговых двигателей методом их взаимной нагрузки с использованием нестандартного преобразователя частоты и комплекта электроизмерительных приборов

Мощность, передаваемая по общей шине постоянного тока, на разных участках определяется следующими выражениями:

$$P_{шпт1}\ (P_{АМ1}^{Д}) = I_{шпт1д} \cdot U_{шпт}; \quad (25)$$

$$P_{шпт1}\ (P_{АМ1}^{Г}) = I_{шпт1г} \cdot U_{шпт}; \quad (26)$$

$$P_{шпт2}\ (P_{АМ1}^{Д}) = I_{шпт2д} \cdot U_{шпт}; \quad (27)$$

$$P_{шпт2}\ (P_{АМ1}^{Г}) = I_{шпт2г} \cdot U_{шпт}; \quad (28)$$

$$P_{шпт}(P_{с1}) = I_{шпт} \cdot U_{шпт}; \quad (29)$$

$$I_{шпт} = I_{шпт1д} + I_{шпт2д},; \quad (30)$$

$$I_{шпт} = I_{шпт1г} + I_{шпт2г}; \quad (31)$$

при неизменной частоте напряжения, питающего АМ1, увеличивается частота напряжения, питающего АМ2, за счет чего АМ1 нагружается в режиме генератора, а АМ2 – в режиме двигателя; проводятся измерения мощности, передаваемой через шину постоянного тока 3, и мощности, вырабатываемой генератором АМ1, по разности которых определяется зависимость потерь в управляемом выпрямителе-инверторе 1.3.1 от мощности, вырабатываемой генератором АМ1 и передаваемой от него в звено постоянного тока:

$$\Delta P_{инв}\ (P_{АМ1}^{Г}) = P_{АМ1}^{Г} - P_{шпт1}\ (P_{АМ1}^{Г}), \quad (32)$$

где $P_{АМ1}^{Г}$ – значение мощности, вырабатываемой асинхронным генератором, Вт;

$P_{шпт1}$ ($P_{АМ1г}$) – измеренное значение мощности, передаваемой по общей шине постоянного тока от асинхронного генератора, которое определяется следующими параметрами, Вт:

$$P_{шпт1}\ (P_{АМ1}{}^{г}) = P_{шпт2}\ (P_{АМ2}{}^{д}) - I_{шпт} \cdot U_{шпт}; \quad (33)$$

определяется зависимость мощности, передаваемой инвертором 1.3.1 от мощности, вырабатываемой генератором АМ1:

$$P_{шпт1}\ (P_{АМ1г}) = \Delta P_{инв}\ (P_{АМ1г}) + P_{АМ1г}; \quad (34)$$

определяется зависимость мощности, подводимой к инвертору 1.3.1 от мощности, потребляемой двигателем АМ1:

$$P_{шпт1}\ (P_{АМ1}{}^{д}) = P_{АМ1}{}^{д} - \Delta P_{инв}\ (P_{АМ1}{}^{г}); \quad (35)$$

используя зависимости (34), (35), получаем зависимости:

$$\Delta P_{инв}\ (P_{АМ1}{}^{д}) = f(P_{шпт1}\ (P_{АМ1}{}^{д})); \quad (36)$$

$$\Delta P_{инв}\ (P_{АМ1}{}^{г}) = f(P_{шпт1}\ (P_{АМ1}{}^{г})). \quad (37)$$

Необходимо выполнить действия в соответствии с формулами (23) – (37) как для первого 1.3.1, так и для второго управляемого выпрямителя-инвертора 1.3.2.

Второй этап заключается в определении потерь мощности в неуправляемом выпрямителе 1.1. Для этого необходимо произвести следующие действия:

установить на испытуемых двигателях те же режимы испытаний, которые соответствовали первому этапу при определении потерь в управляемых выпрямителях-инверторах;

при каждом установившемся режиме нагрузки фиксировать значения P_c и определять величину $P_{шпт}$ по формуле (29);

определить зависимость потерь в неуправляемом выпрямителе 1.1 от подведенной к нему мощности из сети по выражению:

$$\Delta P_{выпр}\ (P_c) = P_{шпт}(P_{c1}) - P_c. \quad (38)$$

Составляющие $I_{шпт1}$, $I_{шпт2}$, $U_{шпт}$, $P_{АМ1}{}^{д}$, $P_{АМ1}{}^{г}$, P_c получены по результатам измерений. Приведенная последовательность действий повторяется только один раз для получения зависимостей (36) – (38) и их дальнейшего многократного использования.

Третий этап проводится следующим образом. Измеритель мощности 7 на данном этапе не требуется. При некотором установившемся режиме измеряются величины $I_{шпт1}$, $I_{шпт2}$, $U_{шпт}$, после чего выражаются и рассчитываются следующие величины:

– $P_{шпт1}$, $P_{шпт2}$, $P_{шпт}$ определяются из уравнений (25) – (29) в зависимости от режима работы асинхронной машины;

– $\Delta P_{инв1}$, $\Delta P_{инв2}$, $\Delta P_{выпр}$ определяются из выражений (36) – (38);

– $P_{АМ}{}^{д}$, $P_{АМ}{}^{г}$ определяются из формул (23), (32).

Практическая ценность представленных схемных решений и методик для определения мощности заключается в том, что при номинальной частоте напряжения испытываемых двигателей, равной 50 Гц, все измерения требуют применения измерительных приборов, рассчитанных на эту же частоту напряжения, что значительно упрощает и удешевляет измерительную схему.

Список литературы

1. Пат. 140678 Российская Федерация, МПК G01R 31/34 (2006.01) Схема испытаний асинхронных двигателей методом их взаимной нагрузки [Текст] / Авилов В. Д., Попов Д. И., Литвинов А. В.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – № 2013147519/28; заявл. 24.10.2013; опубл. 20.05.2014, Бюл. № 14.

2. Пат. 145998 Российская Федерация, МПК G01R 31/34 (2006.01) Схема испытаний асинхронных двигателей методом их взаимной нагрузки [Текст] / Авилов В. Д., Харламов

В. В., Попов Д. И., Литвинов А. В.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – № 2014112920/07; заявл. 02.04.2014; опубл. 27.09.2014, Бюл. № 27.

3. Пат. 143348 Российская Федерация, МПК G01R 31/00 (2006.01) Устройство для испытания асинхронных двигателей методом их взаимной нагрузки [Текст] / Авилов В. Д., Попов Д. И., Литвинов А. В.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – № 2014112919/28; заявл. 02.04.2014; опубл. 20.07.2014, Бюл. № 20.

4. Пат. 2229723 Российская Федерация, МПК G01R 31/00 (2006.01) Способ измерения активной мощности нагрузки в электрических цепях переменного тока [Текст] / Михотин В. Д., Чернецов В. И.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – № 2002114571/28; заявл. 03.06.2002; опубл. 27.05.2004, Бюл. № 15.

5. Бейерлейн, Е. В. Анализ схем испытания асинхронных тяговых двигателей [Текст] / Е. В. Бейерлейн, А. Б. Цукублин // Современные техника и технологии: Материалы X междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых: В 2 т. / Томский политехн. ун-т. – Томск, 2004. – Т.1. – С. 215 – 217.

6. Пат. 2296338 Российская Федерация, МПК G01R 21/06 (2006.01) Способ измерения активной мощности нагрузки в электрических цепях переменного тока [Текст] / Алейников Н. М., Алейников А. Н.; заявитель и патентообладатель Воронежский гос. ун-т. – № 2005133352/28; заявл. 28.10.2005; опубл. 27.03.2007, Бюл. № 9.

7. Авилов, В. Д. Методика определения потерь в двухзвенных преобразователях частоты в составе стенда для испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки [Текст] / В. Д. Авилов, Д. И. Попов, А. В. Литвинов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – 2014. – № 1 (17). – С. 2 – 8.

References

1. Avilov V. D., Popov D. I., Litvinov A. V. Patent RU 140678, 2013.

2. Avilov V. D., Harlamov V. V., Popov D. I., Litvinov A. V. Patent RU 145998, 2014.

3. Avilov V. D., Popov D. I., Litvinov A. V. Patent RU 143348, 2014.

4. Mihotin V. D., Chernecov V. I. Patent RU 2229723, 2004.

5. Beyerlein E. V., Tzucublin A. B. Analysis of the test set-up of asynchronous traction engines [Analiz shem ispitanii asinhronnih tiagovih dvigatelei]. *Materiali X Mezhdunarodnoi nauchno-practicheskoi konferentsii «Sovremennaai tehnika i tehnologii» (Materials of the X Int. conference «Modern equipment and technologies»).* – Tomsk, 2004, pp. 215 – 217.

6. Aleynikov N. M., Aleynikov A. N. Patent RU 2296338, 2007.

7. Avilov V. D., Popov D. I., Litvinov A. V. Method of determining the losses in two-tier frequency converters as part of test bench for asynchronous motors by mutual load [Metodika opredelenia poter' v dvuhzvennih preobrazovateliah chastoti v sostave stenda dlia ispitania asinhronnih dvigatelei metodom vzaimnoi nagruzki]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2014, no. 1 (17), pp. 2 – 8.

УДК 621.2.082.18

С. Г. Шантаренко, М. Ф. Капустьян, А. В. Обрывалин

ОЦЕНКА ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В УЗЛАХ ЭКИПАЖНОЙ ЧАСТИ ЭЛЕКТРОВОЗОВ

В статье предложены методики оценки потерь мощности в моторно-осевых подшипниках, буксовых узлах, тяговой зубчатой передаче. Выявлены зависимости между потерями мощности, диаметром бандажа колесной пары и скоростной характеристикой колесно-моторного блока. Полученные результаты могут быть использованы для оценки технического состояния и энергетической эффективности тягового подвижного состава железных дорог.

В настоящее время уделяется значительное внимание вопросам повышения энергетической эффективности и энергосбережения. Энергосбережение и повышение энергетической эффективности рассматривается как один из основных источников будущего экономического роста страны. Государственная программа РФ «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года», состоящая из ряда подпрограмм, одной из которых является «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на транспорте», задает основные пути развития в этом направлении и подчеркивает его приоритетность как для транспорта в целом, так и для железнодорожного транспорта в частности. Одной из задач в рамках «Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года» является внедрение инновационных материалов, технических средств и технологий в области эксплуатации и ремонта инфраструктуры и подвижного состава, обеспечивающих снижение стоимости жизненного цикла подвижного состава и повышение надежности его эксплуатации [1]. Таким образом, одним из важнейших показателей качества ремонта является энергоэффективность отремонтированного электровоза.

В данной работе рассматривается вопрос об оценке потерь мощности в узлах экипажной части электровозов как наиболее нагруженных в эксплуатации. Суммарные потери мощности в экипажной части электровоза складываются из потерь мощности в следующих узлах и передачах: моторно-осевом подшипнике, буксовом узле, зубчатой передаче, а также потери мощности из-за разности скоростных характеристик колесно-моторных блоков и уменьшения диаметра колеса.

Оценка потерь мощности в подшипниках скольжения.

Потери мощности на трение при условии, что подшипник скольжения находится под воздействием постоянной по величине и направлению нагрузки, а скорость относительного перемещения поверхностей в номинальном режиме неизменна (стационарная задача гидродинамической теории смазки), определяются по формуле (1):

$$N = \frac{\left(l \cdot d^2 \cdot \omega^2 \cdot \mu\right)}{2\psi} \xi, \tag{1}$$

где l – длина вкладыша подшипника, м;

d – диаметр шейки вала, м;

ω – угловая скорость, 1/с;

μ – динамическая вязкость, Па с;

ψ – относительный зазор,

$$\psi = 2\frac{\Delta}{d}, \tag{2}$$

где Δ – радиальный зазор в подшипнике, м;

ξ – безразмерный коэффициент гидродинамических потерь в осевом подшипнике, который определяется с учетом отношения $\frac{l}{d}$ и χ по диаграмме коэффициентов сопротивления шипа вращению с учетом трения в нерабочей части зазора для подшипника с цилиндрической расточкой [2, с. 85].

Относительный эксцентриситет χ определяется по диаграмме коэффициентов нагруженности для подшипника с цилиндрической расточкой [2, с. 74] исходя из значений $\frac{l}{d}$ и коэффициента нагруженности ζ, который определяется по формуле:

$$\zeta = \frac{W \cdot \psi^2}{l \cdot d \cdot \mu \cdot \omega}, \tag{3}$$

где W – нагрузка на подшипник, Н.

Исходные данные к расчету принимались с учетом усредненных данных эксплуатационных параметров электровозов ВЛ10 и ВЛ80, они приведены в таблице 1. Среди приведенных данных переменной величиной выступает радиальный зазор Δ, который является регламентируемым и контролируемым параметром при выходе электровоза из ремонта.

Таблица 1 – Исходные данные для расчета потерь мощности в моторно-осевом подшипнике (МОПе) электровозов серий ВЛ-10 и ВЛ-80

Параметр	l, м	d, м	ω, 1/с	μ, Па с	Δ, мм	W, Н
Значение параметра	0,304	0,205	163	0,06	0,1 – 1,0	12500

Выполненные по формулам (1) – (3) расчеты в среде MathCAD позволили получить данные по потерям мощности на трение в моторно-осевом подшипнике, приведенные в таблице 2.

Таблица 2 – Расчетные значения по потерям мощности на трение в моторно-осевом подшипнике

Радиальный зазор, мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Потери мощности N, КВт	12,4	10,96	9,69	8,54	7,55	6,64	5,89	5,26	4,765	4,4

По результатам расчетов построена зависимость потерь мощности в моторно-осевом подшипнике от радиального зазора (рисунок 1).

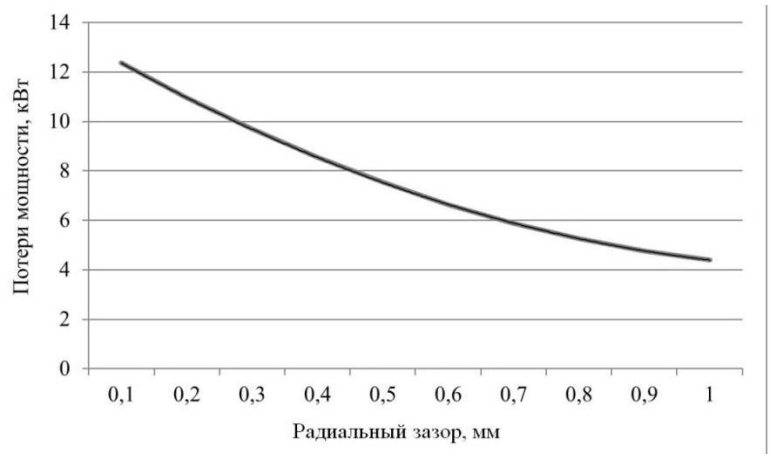


Рисунок 1 – Потери мощности в моторно-осевом подшипнике электровозов серий ВЛ-10 и ВЛ-80

Аппроксимируя зависимость (см. рисунок 1), получим выражение для определения потерь мощности на трение в моторно-осевом подшипнике:

$$\Delta P_{\text{МОП}} = 6,5\Delta^2 - 16\Delta + 13,9. \quad (4)$$

Оценка потерь мощности в подшипниках качения.

При вращении деталей подшипников качения в местах контактов всегда возникают трение качения и трение скольжения. Каждая составляющая потерь на трение сложным образом зависит от условий эксплуатации (частоты вращения, нагрузки, температурного режима и смазки) и конструктивного исполнения, определяющего контактные взаимодействия.

В инженерной практике момент трения $M_{\text{тр}}$ (Н·мм) в подшипнике качения определяют по формуле:

$$M_{\text{тр}} = 0,5 \cdot f_{\text{усл}} \cdot F_r \cdot d, \quad (5)$$

где $f_{\text{усл}} = 2,92k(D_T + D_1)/(D_T \cdot d)$ – условный коэффициент трения для роликовых подшипников [3];

k – коэффициент трения качения, 0,015;

D_T – диаметр тела качения, мм;

D_1 – диаметр беговой дорожки внутреннего кольца подшипника, мм;

F_r – радиальная нагрузка, Н;

d – диаметр внутреннего кольца, мм.

Приняв, что в процессе эксплуатации подвергаются износу тела качения, и выразив этот износ через радиальный зазор, получим уравнение для определения $f_{усл}$:

$$f_{усл} = 2,92k\left(\frac{0,6(D-d)-\Delta}{2}+D_1\right)/\left(\frac{0,6(D-d)-\Delta}{2}\right)\cdot d, \quad (6)$$

где D – диаметр наружного кольца подшипника, мм;

Δ – радиальный зазор в подшипнике, мм;

D_1 – диаметр беговой дорожки внутреннего кольца подшипника, мм,

$$D_1 = d + 0,2(D-d). \quad (7)$$

Таким образом, можно определить изменение величины момента трения в зависимости от изменения величины радиального зазора, а соответственно оценить изменение потерь мощности в узле при установившемся режиме работы N (Вт) [3]:

$$N = \frac{M_{тр}\cdot n}{9550}, \quad (8)$$

где n – частота вращения подшипника, об/мин.

Исходные данные к расчету потерь мощности в буксовых узлах электровозов серий ВЛ80 и ВЛ10 в зависимости от их технического состояния приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Данные о техническом состоянии подшипников качения буксового узла

Наименование узла	Параметры, ед. измер.				
	D, мм	d, мм	Δ, мм	F_r, Н	n, об/мин
Подшипник буксового узла	320	180	0,08 – 0,37	60000	995

После подстановки значений из таблицы 2 в выражения (5) – (8) были определены значения потерь мощности и построена соответствующая зависимость, представленная на рисунке 2, аппроксимация которой позволила получить выражение для определения потерь мощности в буксовых узлах тягового подвижного состава:

$$\Delta P_{бп} = 0,045 + 0,81\cdot\Delta. \quad (9)$$

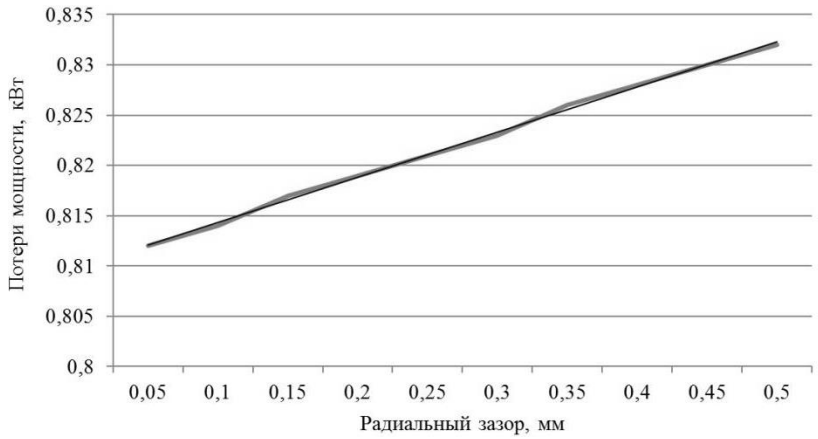


Рисунок 2 – Потери мощности в буксовом узле электровозов серий ВЛ-10 и ВЛ-80

Оценка потерь мощности в зубчатой передаче.

При взаимном перекатывании со скольжением профилей зубьев часть энергии, подводимой к ведущему элементу, затрачивается на преодоление трения скольжения и качения. Тре-

нием качения в силовых зубчатых передачах пренебрегают ввиду его малости. Таким образом, мощность $\Delta P_{зп}$, теряемая на трение в зубчатом зацеплении, будет равна мощности, теряемой на трения скольжение $N_{ск}$ [4]:

$$\Delta P_{зп} = N_{ск} = F_n \cdot f \cdot l \cdot \omega_1 \left(1 + \frac{z_1}{z_2}\right), \quad (10)$$

где f – коэффициент трения скольжения, 0,06;

ω_1 – угловая скорость ведущего колеса, $с^{-1}$;

z_1 и z_2 – число зубьев ведущего и ведомого колес;

F_n – нормальная сила в зацеплении, Н, определяемая по формуле:

$$F_n = \frac{2T}{d \cos\alpha \cos\beta}, \quad (11)$$

где T – крутящий момент, Н·м;

α – угол зацепления;

β – угол наклона зубьев;

d – делительный диаметр, мм;

$$T = \frac{P}{\omega_1}, \quad (12)$$

где P – мощность на валу ТЭД в длительном режиме, кВт;

l – расстояние от контактной точки зацепления до полюса, мм, определяется по выражению:

$$l = \frac{0{,}5\pi m}{2} \cos\alpha + \Delta, \quad (13)$$

где m – модуль, мм;

Δ – общий боковой зазор в зубчатой передаче, мм.

Исходные данные для расчета потерь мощности в зубчатой передаче в зависимости от общего бокового зазора для электровозов серий ВЛ80 и ВЛ10 приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Исходные данные для расчета потерь мощности в зубчатой передаче

Серия электровоза	Параметры, ед. измер.					
	z_1	z_2	m, мм	Δ, мм	β,°	P, кВт
ВЛ80	21	88	10	0,44 – 4,5	24	770
ВЛ10	21	88	10	0,44 – 4,5	24	575

Выполненные по формулам (10) – (13) расчеты позволили построить графики изменения потерь мощности на трение в зубчатом зацеплении для электровозов серий ВЛ10 и ВЛ80, которые приведены на рисунке 3.

Аппроксимируя зависимости, приведенные на рисунке 3, получаем выражения для определения потерь мощности на трение в зубчатых передачах:

для ВЛ80 – $$\Delta P_{ЗП}(\Delta) = 0{,}3\Delta + 2{,}4; \quad (14)$$

для ВЛ10 – $$\Delta P_{ЗП}(\Delta) = 0{,}25\Delta + 1{,}65. \quad (15)$$

Оценка потерь мощности из-за изменения диаметра колеса и разности скоростных характеристик колесно-моторных блоков.

Ввиду того, что в процессе эксплуатации электровоза происходит износ бандажа колеса колесной пары, будут наблюдаться потери мощности. Определить эти потери мощности из-за изменения диаметра колеса можно путем расчета по формулам:

$$N_{П} = N_{\max} - N_i, \tag{16}$$

где $N_{\max}$ – максимальная мощность, выдаваемая на одну колесную пару с максимально возможным диаметром колеса (новое), кВт;

N_i – мощность, выдаваемая на одну колесную пару с i-м диаметром колеса в связи с его износом или механической обработкой, кВт.

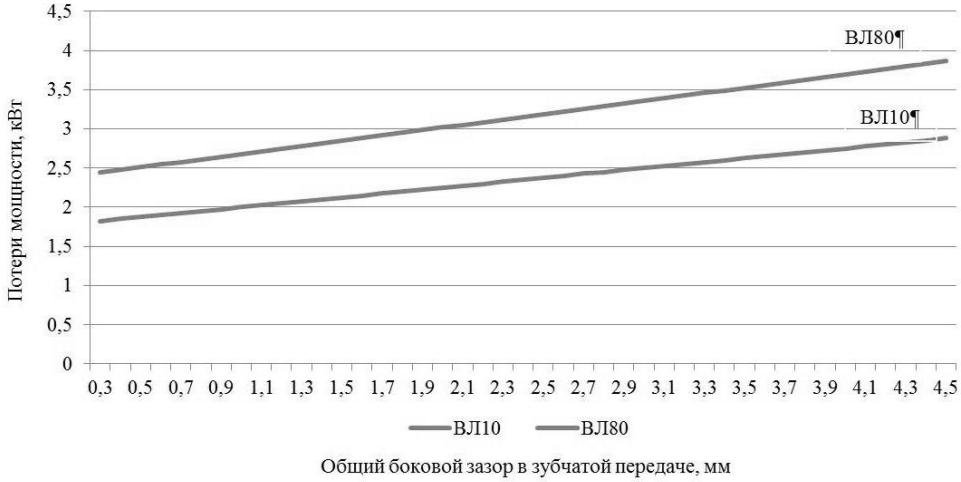


Рисунок 3 – Потери мощности в зубчатой передаче электровозов серий ВЛ-10 и ВЛ-80 в зависимости от общего бокового зазора

$$N = \frac{2\pi \cdot M \cdot n}{60}, \tag{17}$$

где M – крутящий момент на колесе, кН·м;

n – число оборотов колесной пары, об/мин,

$$M = F \cdot R_к \tag{18}$$

где F – тяговое усилие на оси колесной пары, кН;

$R_к$ – радиус колеса, м.

Потери мощности из-за разности скоростных характеристик колесно-моторных блоков (КМБ) определяются по формуле:

$$P_i = \frac{N_{\text{ТЭД}}}{k} \frac{0,5 \cdot CX}{100\,\%}, \tag{19}$$

где $N_{\text{ТЭД}}$ – мощность на валах ТЭД в длительном режиме, кВт;

k – количество осей;

CX – скоростная характеристика КМБ, %.

Процесс эксплуатации тягового подвижного состава сопровождается изнашиванием рассмотренных выше узлов и передач, что приводит к изменению размеров радиальных и боковых зазоров, уменьшению диаметра бандажей колесных пар, изменению скоростной характеристики. Предложенные методики определения потерь мощности можно применять для оценки технического состояния и энергетической эффективности тягового подвижного состава.

Список литературы

1. Авилов, В. Д. Оценка энергетической эффективности применения метода взаимной нагрузки при испытании асинхронных тяговых двигателей [Текст] / В. Д. Авилов, Д. И. Попов, А. В. Литвинов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2013. – № 3 (15). – С. 2 – 6.

2. Воскресенский, В. А. Расчет и проектирование опор скольжения: Справочник [Текст]/ В. А. Воскресенский, В. И. Дьяков. – М.: Машиностроение, 1980. – 224 с.

3. Перель, Л. Я. Подшипники качения [Текст]: Расчет, проектирование и обслуживание опор: Справочник / Л. Я. Перель, А. А. Филатов. – М.: Машиностроение, 1992. – 608 с.

4. Гинзбург, Е. Г. Зубчатые передачи [Текст]: Справочник / Е. Г. Гинзбург, Н. Б. Фирун и др. – Л.: Машиностроение, 1980. – 416 с.

References

1. Avilov, D. V. Evaluation of the energy efficiency of application of the method of mutual load when testing asynchronous traction motors [Ocenka energeticheskoi effektivnosti primeneniy metoda vzaimnoi nagruzki pri ispitanii asinhronnih tygovih dvigatelei]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2013, no. 3 (15), pp. 2 – 6.

2. Voskresensky, V. A., *Raschet i proektirovanie opor skolgeniy* (Calculation and design of sliding). Moscow, 1980, 224 p.

3. Perel, J. L. *Podshipniki kacheniy* (Bearings). Moscow, 1992, 608 p.

4. Ginzburg, E. G. *Zubchatie peredachi* (Gear). Leningrad, 1980, 416 p.

УДК 620.98:62-682

С. В. Глухов, В. Ф. Тарута, М. В. Глухова

УТИЛИЗАЦИЯ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РЕОСТАТНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Реостатные испытания в обязательном порядке проводятся после ремонтов тепловозов. В качестве реостата используется комплекс оборудования с помещением обслуживающего персонала, размещаемый на определенном расстоянии от административных зданий. Для отопления помещения обслуживающего персонала используется централизованное отопление, себестоимость которого значительна, и транзитные тепловые потери часто соизмеримы с полезным потреблением отапливаемого помещения. В работе рассмотрена возможность использования вторичных энергетических ресурсов (ВЭР) на цели отопления станции реостатных испытаний. Отмечено, что в отдельных депо мероприятия по утилизации тепловой энергии от нагрузочных реостатов внедрены, но распространения не получили. Указаны внешние сдерживающие факторы, ограничивающие внедрение утилизационных установок, в том числе технические и организационные. Предложены основные мероприятия, которые целесообразно рассматривать при возможном внедрении утилизационных установок. Произведен расчет выработки тепловой энергии на реостате при типовых испытаниях тепловозов ТЭМ2 и величины нагрева теплоносителя в типовых нагрузочных водяных реостатах. Предложена схема использования ВЭР в низкотемпературных системах отопления. Отмечены преимущества использования низкотемпературных систем отопления. Произведен расчет требуемой выработки тепловой энергии утилизационной установкой за каждый месяц в течение года на примере депо ст. Омск. Отмечено, что требуемое количество испытаний для компенсации тепловых потерь совпадает с графиками работы станций реостатных испытаний большинства депо и делается вывод о применимости указанного способа испытаний. Рассчитан экономический эффект от внедрения мероприятий с учетом капитальных затрат на сооружения быстровозводимого здания над открытым реостатным баком.

В комплекс устройств, сооружаемых на территории локомотивного депо, входят установки для послеремонтных нагрузочных (реостатных) испытаний (РИ) тепловозов на специально оборудованных позициях, которые размещаются на открытых площадках, отдаленных от производственных и жилых объектов.

На реостатных испытаниях производятся обкатка, доводка, регулировка дизель-генераторной установки (ДГУ) под нагрузкой, регулировка и доводка электрической схемы с одновременной проверкой качества монтажа и работы всех сборочных единиц, размещенных на тепловозе.

Для реостатных испытаний выделяется, как правило, открытая площадка с управлением из закрытого, отапливаемого и вентилируемого помещения для обслуживающего персонала – станция реостатных испытаний, которая по условиям допустимого уровня шума должна располагаться на расстоянии не ближе 300 м от административных зданий.

Для обеспечения жизнедеятельности станции РИ требуется организация систем водо-, тепло- и электроснабжения, а также канализационных стоков.

Значительное удаление станции РИ от источников энергоснабжения создает определенные проблемы, в частности, снижает эффективность использования централизованного теплоснабжения.

В частности, теплоснабжение станции РИ на территории локомотивного эксплуатационного депо ст. Омск организовано от существующей мазутной котельной по транзитным теплопроводам 2хДу 200 общей протяженностью 250 м в однотрубном исполнении (рисунок 1). При расчетной тепловой нагрузке здания станции РИ на уровне 0,062 Гкал/ч (по данным Омского участка Западно-Сибирской дирекции тепловодоснабжения) среднегодовые тепловые потери транзитных трубопроводов составляют 0,021 Гкал/ч с годовыми потерями порядка 112,9 Гкал. При этом годовое потребление тепловой энергии (ТЭ) зданием станции вполне соизмеримо с потерями по трассе и составляет 163,35 Гкал.

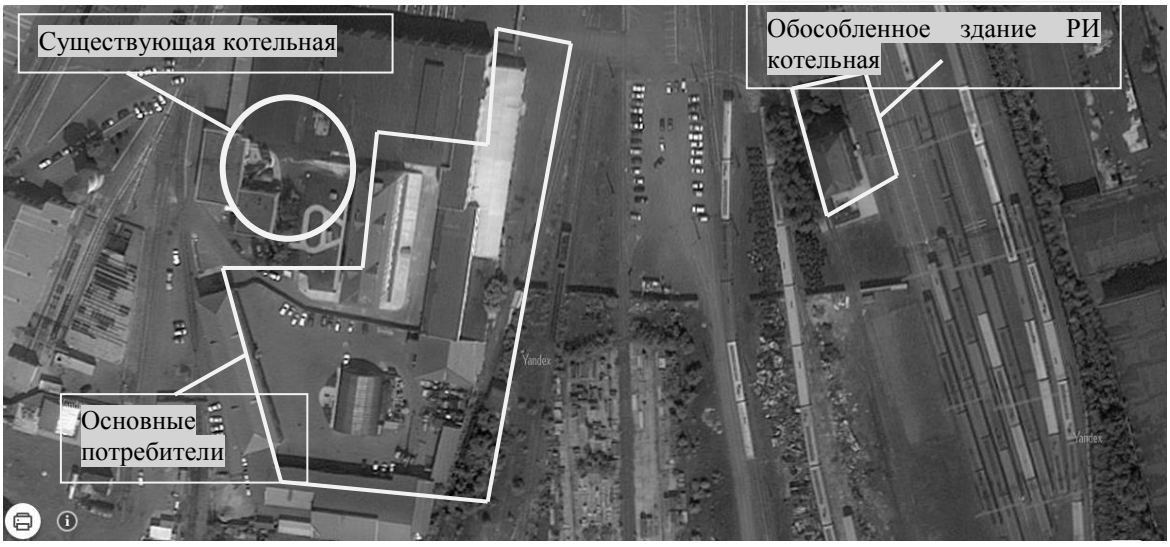


Рисунок 1 – Расположение станции РИ по отношению к котельной на ст. Омск

Вместе с тем станция РИ является источником вторичных энергоресурсов. Некоторыми авторами [1] предлагается в летнее время на водяных реостатах использовать для понижения температуры и повышения сопротивления организацию протока водопроводной воды с дальнейшим сбросом в канализацию. Также для снижения габаритов нагрузочного бака при реализации токов большой нагрузки предлагается применение вспомогательного бака-охладителя с организацией циркуляции электролита двумя циркуляционными насосами [2]. Однако данные организационные мероприятия увеличивают совокупные затраты энергоресурсов на выполнение испытаний и по сути являются энергорасточительными.

Авторам известен ряд примеров утилизации теплоты реостатных станций на нужды вентиляции промышленных цехов и отопления оранжерей на примыкающих производственных территориях в сочетании с использованием теплоты от централизованных источников, однако распространения данные мероприятия не получили.

Потенциал энергосбережения при проведении РИ можно оценить на основе таблиц режимов обкаточных и сдаточных испытаний тепловозов [3]. В таблицу 1 сведены результаты расчета технического эффекта энергосбережения при утилизации ВЭР при проведении РИ тепловозов ТЭМ2 с учетом величины потребления ТЭ на собственные нужды помещения реостата порядка 20 %.

Таблица 1 – Расчет потенциала энергосбережения с учетом потребления на собственные нужды

Положение рукоятки контроллера машиниста	Нагрузка, кВт	Продолжительность, мин	Потенциал энергосбережения, Гкал
II	25	10	0,0029
III	85	10	0,0097
IV	130	15	0,0224
V	230	20	0,0527
VI	350	25	0,1003
VII	490	40	0,2247
VIII	620	60	0,4265
VI	750	50	0,4299
VII	490	5	0,0281
VIII	620	15	0,1066
Итого		230	1,7418

При использовании стандартной нагрузочной емкости объемом 24 м^3 величина подогрева исходной воды составит около 75 °С (до 80 °С), что вполне пригодно для использования в системах низкотемпературного отопления.

В настоящее время в структурных подразделениях ОАО «РЖД» происходит активное внедрение энергосберегающих мероприятий в рамках реализации Энергетической стратегии холдинга «РЖД» до 2015 года и на перспективу до 2030 года и мероприятий по результатам энергетического обследования подразделений, однако внедрение ВЭР от нагрузочных реостатов станций РИ сдерживается рядом факторов:

1) организационными – по причине раздробленности юридических лиц, занимающихся поставкой тепловой энергии (ТЭ), эксплуатацией производственных зданий депо и эксплуатацией станции РИ. Полученный энергетический эффект будет синергетическим, тогда как затраты, как правило несет собственник станции РИ;

2) техническими – по причине случайности во время проведения испытаний (зависящего от пробега, количества внеплановых ремонтов и пр.) и, как следствие, несовпадения во времени выработки ВЭР и пиков использования ТЭ на коммунальные и промышленные нужды.

Технология использования ВЭР в каждом конкретном случае должна быть определена по результатам энергетических обследований или при разработке перспективной схемы теплоснабжения железнодорожного узла с расчетом окупаемости мероприятия, но в целом можно выделить следующие направления использования теплоты:

1) для предпускового подогрева двигателей тепловозов;

2) поддержание температуры воды в баках-аккумуляторах ГВС;

3) предварительный нагрев приточного воздуха в промышленных цехах;

4) применение как горячего источника для тепловых насосов с последующим использованием теплоты на цели отопления, вентиляции и ГВС;

5) подогрев исходной подпиточной воды котельных;

6) в системах низкотемпературного отопления.

Для использования теплоты ВЭР от реостатных станций диагностики ст. Омск предлагается использование низкотемпературного отопления здания по технологической схеме, приведенной на рисунке 2.

В качестве низкотемпературной системы отопления можно использовать систему «теплый пол», плинтусное отопление или отопительные стеновые панели с рабочей температурой теплоносителя в пределах 35 °С, это позволит эффективно использовать теплоту рабочей емкости при ее разрядке при условии ее использования как теплоаккумулятора. Для минимизации воздействия электрокоррозии предлагается использовать запорную арматуру 2 с диэлектрическими вставками и электроприводом открытия (закрытия). В случае разрядки рабочей емкости (теплоаккумулятора) предлагается использовать резервный электрокотел 3.

Низкотемпературные системы отопления являются малоинерционными, позволяют поддерживать оптимальную температуру воздуха в рабочей зоне оператора и работать с пони-

женной температурой теплоносителя в отличие от традиционных радиаторных систем, теплоотдача которых снижается в четыре – пять раз при понижении температуры теплоносителя до 35 – 40 °С.

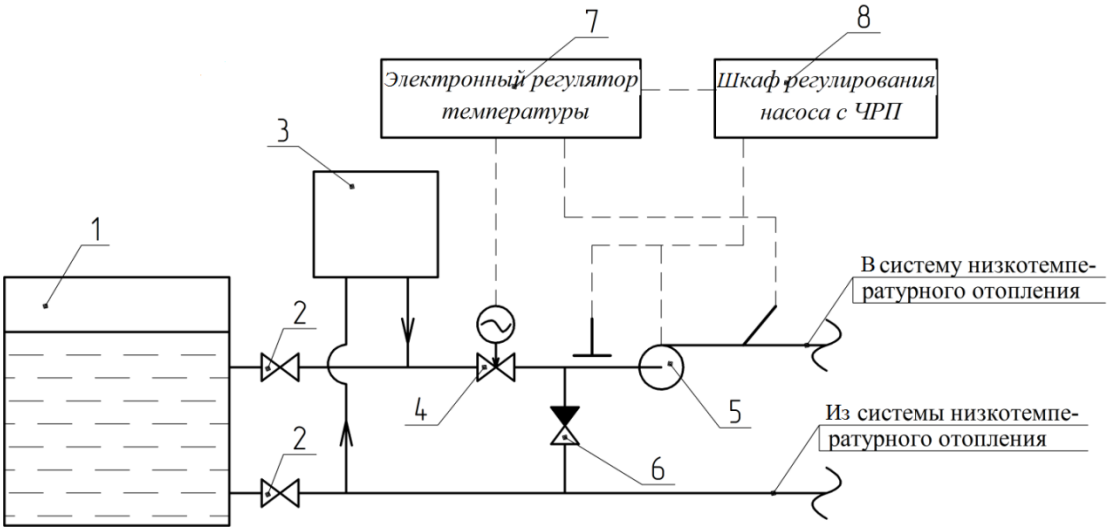


Рисунок 2 – Схема использования ВЭР реостатной станции диагностики в низкотемпературной системе отопления: 1 – нагрузочная емкость реостатной станции; 2 – отсекающая запорная арматуры с электроприводом; 3 – пиковый (резервный) электрокотел; 4 – регулирующий клапан; 5 – смесительный насос; 6 – обратный клапан; 7 – электронный регулятор температуры; 8 – шкаф регулирования насосов с ЧРП

В таблице 2 сведены данные о величине требуемой ТЭ для целей отопления здания станции реостатной диагностики, расположенной на ст. Омск, помесячно с указанием минимального требуемого количества испытаний для компенсации теплопотерь с помощью ВЭР.

Таблица 2 – Месячное потребление тепловой энергии на отопление здания станции РИ и минимально требуемое количество испытаний

Период	Требуемая величина тепловой энергии на цели отопления, Гкал	Минимально требуемое количество испытаний, шт.
Январь	30,35	18
Февраль	26,83	16
Март	22,82	14
Апрель	13,00	8
Май	0,88	1
Июнь	–	–
Июль	–	–
Август	–	–
Сентябрь	1,24	1
Октябрь	14,81	9
Ноябрь	21,54	13
Декабрь	27,76	16
Всего	159,22	18

Расчет произведен на основе климатических данных о величине стояния наружной температуры в г. Омске [4] на основе расчета экономической эффективности, приведенного в таблице 1. В летний период можно рассмотреть возможность использования теплоты ВЭР на душевые, мойки, подогрев воды бассейнов административно-бытовых корпусов и т. п. с учетом возможного вывода в резерв основных источников тепловой энергии.

Анализ данных о фактической величине реостатных испытаний по станциям РИ свидетельствует о том, что среднемесячные показатели находятся в пределах 18 – 22 штук, что покрывает требуемое количество испытаний в пиковый период.

При переводе здания станции испытаний на отопление по предложенной схеме годовой экономический эффект составит 620 тыс. р. с учетом тарифа существующей мазутной ко-

тельной. Затраты на строительство быстровозводимого здания для укрытия нагрузочной емкости с реконструкцией системы отопления и утеплением пола составляют порядка 800 тыс. р. Дисконтированный срок окупаемости мероприятия с учетом работы электрокотла в пиковом режиме на протяжении 10 суток в год составляет 1,8 года.

На основании изложенного можно сделать выводы:

1) при оценке технического и экономического потенциала использования ВЭР от станций реостатной диагностики необходимо учитывать совокупный эффект для теплоснабжающей организации, полученный за счет сокращения нерациональных потерь в тепловых сетях при выводе из эксплуатации подводящих теплопроводов и для эксплуатирующей организации станции РИ, сокращающей затраты на приобретение сторонних энергоресурсов;

2) при внедрении предлагаемых мероприятий следует учитывать возможное снижение надежности теплоснабжения ВЭР, вызванное экономическими факторами при уменьшении количества испытаний;

3) тепловую энергию эффективно использовать в низкотемпературных системах отопления, вентиляции и ГВС с пиковым догревом от местных или централизованных источников теплоты;

4) потенциал использования ВЭР на станциях РИ может быть увеличен также за счет использования рекуперации теплоты отходящих дымовых газов дизельных двигателей тепловозов.

Список литературы

1. Денисова, Т. В. Ремонт электрооборудования тепловозов [Текст] / Т. В. Денисова. – М.: Транспорт, 1980. – 295 с.

2. Пат. 103915 Российская Федерация, G 01 M15 00. Жидкостный нагрузочный реостат [Текст] / Ежевская Л. А., Пестрякова Н. С., Григорович Д. Н. и др. (Россия); заявитель и патентообладатель ОАО «ВНИИЖТ». – № 2010145235/28; опубл. 08.11.2010.

3. Тепловоз ТЭМ2У: Руководство по эксплуатации и обслуживанию. – М.: Транспорт, 1988. – 254 с.

4. СП 131.13330.2012 Строительная климатология. Актуализированная версия СНиП 23-01-99*. М.: Энас, 2014. – 109 с.

References

1. Denisova T. V. *Remont electrooborudovania teplovozov* (Electrical equipment repair of diezel locomotive). Moscow: Transport, 1980, 295 p.

2. Ezhevskaya L. A., Pestriakova N. S., Grigorovich D. N. et al. *Patent RU 103915*, 08.11.2010.

3. *Teplovoz TEM2U. Rukovodstvo po ekspluatacii I obsluzivaniju* (diezel locomotive TEM2. Servicing and operating manual). Moscow: Transport, 1988, 254 p.

4. *SP 131.13330.2012 Stroitelnaja klimatologija. Aktualizirovannaja versija SNIP 23-01-99** (SP 131.13330.2012 Building climatology). Moscow: SC «Enas», 2014, 109 p.

УДК 621.331

В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, А. А. Кушов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЯГОВЫХ СЕТЕЙ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ

Предложена методика параметрической идентификации тяговой сети железной дороги переменного тока. Методика позволяет получать параметры тяговой сети, которые при наличии погрешностей измерений векторов напряжений и токов, не превышающих 0,5 %, 0,5°, дают достаточно высокую точность расчета режимов систем тягового электроснабжения, обеспечивающую корректное решение многих практических

задач. Компьютерное моделирование показало, что погрешности определения режима однородной тяговой сети по напряжениям не превышают 0,4 % и 0,2º, по токам – 0,9 %, 1,3º.

Точность расчетов режимов систем тягового электроснабжения (СТЭ) ограничивается двумя существенными факторами: во-первых, статистическим характером тяговой нагрузки, зависящим от масс поездов и скоростей их движения, состояния подвижного состава, от квалификации машинистов; во-вторых, сложностью корректного задания параметров, характеризующих элементы тяговой и внешней сети. Первичная информация о тяговой сети (ТС) обычно задается на основе справочных данных по известным маркам проводов контактной подвески и рельсов, по длине участков ТС. Ввиду наличия зигзагов и выносов контактная сеть имеет длину, превышающую расстояние, определяемое по пикетам пути. Неопределенность и сезонные изменения электрических свойств грунта приводят к ошибкам определения собственных и взаимных сопротивлений контактных подвесок и рельсов. Износ контактных проводов увеличивает их активное сопротивление, проводимость «рельсы – земля» зависит от погодных условий. Поэтому традиционный способ задания параметров может приводить к заметным погрешностям. Преодолеть указанное затруднение можно на основе методов параметрической идентификации [1 – 4], использующих инструментальные измерения токов, напряжений и мощностей. Следует отметить, что периодический контроль параметров тяговой сети может служить основой для решения задач технического диагностирования СТЭ.

Существующие методы параметрической идентификации разработаны применительно к трехфазным сетям общего назначения и используют однолинейное представление элементов электроэнергетических систем [1, 2], что резко ограничивает их применение для СТЭ. Особенности систем электроснабжения железных дорог [5] требуют применения при идентификации фазных координат. Методика параметрической идентификации линий электропередачи и трансформаторов в фазных координатах, основанная на применении синхронизированных векторных измерений PMU-WAMS, предложена в работах [3, 4]. В зарубежных публикациях [8 – 10] используется подход в симметричных составляющих.

В настоящей статье предлагаются способы идентификации параметров тяговой сети, где в общем случае использование симметричных составляющих неприемлемо. Основные сложности при решении этой задачи создают резко изменяющиеся во времени и перемещающиеся в пространстве тяговые нагрузки. Преодоление этих сложностей возможно двумя путями: а) использование при измерениях ситуаций с отсутствием поездов в межподстанционной зоне (МПЗ); б) оснащение электроподвижного состава средствами измерений и передачи данных по модулям и фазам токов и напряжений. Ситуация «а» затруднена тем, что на тяговых подстанциях отсутствует информация о наличии или отсутствии поездов в МПЗ. Для снятия этого затруднения можно использовать технологии глобального позиционирования, например, ГЛОНАСС. Ситуация «б» усложняет определение параметров смежных линий, поскольку измерение токов и напряжений на смежной ЛЭП в месте нахождения ЭПС невозможно. В большинстве случаев, однако, влияние смежных ЛЭП на тяговую сеть мало, и можно ограничиться рассмотрением только тяговой сети без учета влияния смежных ЛЭП. В этом случае алгоритмы идентификации «а» и «б» не отличаются друг от друга.

Более точная идентификация возможна при наличии поста секционирования или пункта параллельного соединения, оснащенного средствами измерений и передачи данных. При отсутствии таких средств идентификация будет возможной только при целом ряде упрощающих предположений.

Ограниченная точность измерений напряжений и токов приводит к появлению ошибок идентификации. Наиболее распространенные измерительные преобразователи имеют класс точности 0,5, обеспечивая погрешности по модулям и фазам не более, соответственно, 0,5 % и 0,5º. Учет этого фактора выполнен путем искажения одного из «точных» векторов напряжений или токов на указанные величины. Включение в рассматриваемую модель рельсовых нитей существенно усложняет задачу идентификации, требуя к тому же измерения токов и потенциалов рельсов. Целесообразно исключить рельсы из явного рассмотрения, используя

традиционный подход с эквивалентным сопротивлением тяговой сети в схеме замещения при нулевом потенциале рельсов.

В качестве рабочего инструмента для исследования использован программный комплекс (ПК) Fazonord-Качество, основанный на идеях работ [6, 7]. Расчетная схема комплекса служила эталоном для получения режима и сравнения со схемой, полученной в результате идентификации.

Параметрическая идентификация однородной тяговой сети. Случай с тяговой сетью без тяговой нагрузки или с нагрузкой, приложенной по концам участка, является простейшим. Решетчатая схема замещения, совпадающая с обычной электрической схемой, приведена на рисунке 1, где $\underline{z}_1$ – сопротивление ТС и $\underline{y}_{10}$ – половина емкостной проводимости ТС.

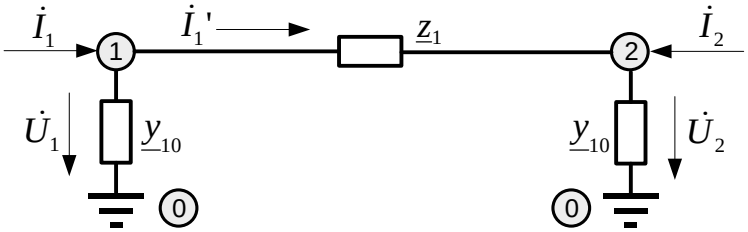


Рисунок 1 – Схема модели однопутной тяговой сети

Емкостный ток контактной сети участка типичной длины l = 50 км составляет примерно 2 А. Для корректного определения продольного сопротивления необходимо наличие уравнительного тока порядка 10…15 А, что обычно имеет место. Уравнения по законам Кирхгофа для схемы рисунка 1 могут быть записаны так:

$$\underline{z}_1(\dot{I}_1 - \underline{y}_{10}\dot{U}_1) = \dot{U}_1 - \dot{U}_2;\ \underline{z}_1(-\dot{I}_2 + \underline{y}_{10}\dot{U}_2) = \dot{U}_1 - \dot{U}_2;\ \underline{y}_{10} = \frac{\dot{I}_1 + \dot{I}_2}{\dot{U}_1 + \dot{U}_2};\ \underline{z}_1 = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_2}{\dot{I}_1 - \underline{y}_{10}\dot{U}_1}. \qquad (1)$$

Возможность применения формул (1) в условиях неточного определения векторов напряжения или тока проверена на расчетной схеме, приведенной на рисунке 2. Схема отвечает однопутному участку железной дороги переменного тока, электрифицированной по системе 1×25 кВ. Участок имеет две межподстанционные зоны длиной по 50 км каждая. Его электроснабжение производится от линии 220 кВ, выполненной проводом АС-240, с длинами, указанными на рисунке 2. Тяговая сеть включает контактную подвеску ПБСМ-95+МФ-100, питание которой осуществляется от трансформаторов 40000-230/27,5 кВ. Каждая МПЗ разделена на два участка, нагрузки по 10+*j*8 МВ·А сосредоточены в узлах 23 и 31. *RL*-элементы на схеме имеют сопротивления 0,01 Ом и установлены для увеличения гибкости модели и удобства отсчетов режимных параметров.

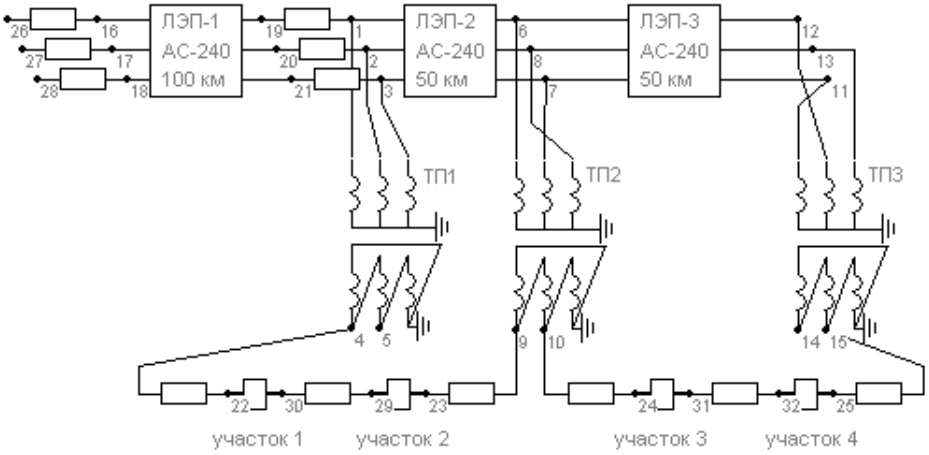


Рисунок 2 – Расчетная схема однопутного участка в ПК Fazonord

В таблице 1 представлены параметры режима эталонной расчетной схемы и определенные на их основе параметры тяговой сети. Фазы токов отвечают направлению тока в узел элемента. Первые две строки таблицы соответствуют режиму с нагрузкой в узле 31, следующие две строки соответствуют режиму без тяговой нагрузки с уравнительным током порядка 10 А. Все четыре участка имеют практически одинаковые идентифицированные сопротивления и проводимости, отличающиеся друг от друга не более чем на 1,1 % по емкостной проводимости и не более чем на 0,03 % по продольному сопротивлению.

Таблица 1 – Параметры режима исходной схемы и результаты идентификации

Узел	U, кВ	U, º	I, А	I, º	$\underline{y}_{10}$, мкСм	$\underline{z}_1$, Ом
32	21,927	53,402	306,55	–169,55	–	–
25	25,450	56,664	305,09	10,72	j 43,31	5,130+j11,209
32	27,460	57,578	9,960	45,47	–	–
25	27,373	57,385	10,720	–147,20	j 43,84	5,158+ j11,213

Подстановка в расчетную схему *RL*-элементов и шунтов (т. е. резистивно-емкостных элементов, включенных между узлом и точкой нулевого потенциала) в узлах по данным таблицы 1 вместо моделей участков тяговой сети приводит к практически тем же напряжениям в узлах (модули и фазы отличаются на тысячные доли процента от исходной схемы); по модулям и фазам токов отличия достигают 0,2 % и – 0,7º.

Расчеты показали очень небольшие различия результатов, полученных при больших и малых токах контактной сети. Однако практическое использование малых токов ограничивается увеличенными погрешностями измерительных трансформаторов при токах в единицы ампер. Технологии дистанционного контроля напряжений и токов позволяют получать синхронизированные значения напряжений и токов в узлах сети с погрешностью 0,5S или даже 0,2S. В связи с этим возникает задача оценки влияния погрешностей измерений векторов токов и напряжений на точность расчета режима по идентифицированным параметрам тяговой сети. При этом достаточно определить изменения параметров идентифицированных режимов при вариациях на 0,5 % (или на 0,5 º) по каждой из переменных (модули, а также фазы токов и напряжений). Такие вычисления проведены для участка 4 схемы, приведенной на рисунке 2, параметры остальных участков и нагрузки не менялись.

Результаты вычислений погрешностей определения параметров режима приведены в таблице 2. Каждый столбец таблицы представляет собой погрешности величины, указанной в названии строки, при изменении величины, указанной в заголовке столбца. Индекс 1 отвечает узлу 32, индекс 2 – узлу 25. При указанной точности измерений погрешности определения режима не превышают 0,4 % по модулям напряжений, 0,9 % по модулям токов, 0,2º по фазам напряжений и 1,3º по фазам токов, что вполне приемлемо для практики. Для параметрической идентификации точность измерения напряжений более критична по сравнению с точностью задания токов. Кроме того, погрешности задания исходных величин разнонаправлены, что может приводить к их компенсации.

Таблица 2 – Погрешности восстановления режима участка 4 при изменениях модулей напряжений и токов на +0,5 % и углов напряжений и токов на +0,5º

Параметр	U_1	U_2	φ_{1U}	φ_{2U}	I_1	I_2	φ_{1I}	φ_{2I}
1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\frac{\Delta U_1}{U_1}$, %	0,3	-0,4	0,1	-0,1	0,1	0,0	-0,1	0,1
$\frac{\Delta U_2}{U_2}$, %	0,0	0,0	0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,1
$\Delta\varphi_{1U}$, º	0,0	0,0	0,2	-0,2	0,0	0,0	0,0	0,0

Окончание таблицы 2.

Параметр	U_1	U_2	φ_{1U}	φ_{2U}	I_1	I_2	φ_{1I}	φ_{2I}
1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Delta\varphi_{2U}$, °	0,0	0,0	-0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
$\frac{\Delta I_1}{I_1}$, %	0,6	-0,8	0,8	-0,9	0,1	0,0	-0,1	0,1
$\frac{\Delta I_2}{I_2}$, %	0,6	-0,8	0,8	-0,9	-0,2	0,0	0,4	-0,4
$\Delta\varphi_{1I}$, °	-0,3	0,3	1,1	-1,3	-0,1	0,0	0,2	0,0
$\Delta\varphi_{2I}$, °	-0,3	0,3	1,1	-1,3	0,1	-0,1	-0,1	0,3

Приведенные в таблице 2 результаты позволяют оценить погрешности определения режимных параметров при множественных неточностях результатов измерений.

Параметрическая идентификация неоднородной тяговой сети. Неоднородности тяговой сети, которые обычно имеют место при ее усилении на части межподстанционной зоны, приводят к усложнению задачи. Однозначная идентификация параметров отдельных однородных участков на основе режимных измерений невозможна. Имеющаяся информация о структуре тяговой сети обычно включает в свой состав данные о наборе проводов и длине однородных участков, поэтому задача идентификации может быть переформулирована в направлении уточнения этой информации по данным режимных измерений. Алгоритм решения этой задачи состоит из следующих этапов.

1. По имеющейся информации о параметрах однородных участков вычисляются их емкостные проводимости $y^{\text{с}}_{10i}$ и продольные сопротивления $z^{\text{с}}_{1i}$. Эти вычисления целесообразно проводить с использованием ПК Fazonord, поскольку справочные данные имеются только для ограниченного числа случаев.

2. По измеренным значениям векторов напряжений и токов по формулам (1) вычисляются емкостные проводимости $\underline{y}_{10}$ и продольные сопротивления $\underline{z}_1$ всего неоднородного участка.

3. Полученные в п. 2 значения делятся по однородным участкам пропорционально вычисленным в п. 1 проводимостям и сопротивлениям:

$$y_{10i} = \frac{y^{\text{с}}_{10i}}{y^{\text{с}}_{10\Sigma}} y_{10};\ \underline{z}_1 = \frac{\underline{z}^{\text{с}}_{1i}}{\underline{z}^{\text{с}}_{1\Sigma}} \underline{z}_1, \qquad (2)$$

где $y^{\text{с}}_{10\Sigma} = \sum_{i-1}^{n} y^{\text{с}}_{10i}$; $\underline{z}^{\text{с}}_{1\Sigma} = \sum_{i-1}^{n} \underline{z}^{\text{с}}_{1i}$; n – количество однородных участков. Емкостные проводимости используются по модулю, продольные сопротивления – как комплексные числа.

Погрешности определения режима по результатам идентификации в случае неоднородного участка оценены на основе достаточно типичной схемы усиления МПЗ ТП2 – ТП3, приведенной на рисунке 3, в которой участки 3 и 5 длиной 10 км выполнены с контактной подвеской ПБСМ-95+МФ-100, а участок 4 длиной 30 км усилен проводом А-185. Тяговая нагрузка 10+*j*8 МВА расположена в узлах 23 и 25. Объектом идентификации является тяговая сеть МПЗ ТП2 – ТП3.

В таблице 3 представлены параметры режима исходной расчетной схемы и рассчитанные с помощью ПК Fazonord параметры участков тяговой сети. Одинаковость токов в различных точках МПЗ Т2 – Т3 и их небольшая величина по сравнению с таблицей 1 обусловлены нахождением нагрузки в узле 25 – практически в точке подключения фидера ТП3.

По результатам идентификации в расчетную схему рисунка 3 вместо элементов ТС в МПЗ ТП2 – ТП3 были установлены *RL*-элементы и шунты в соответствии с данными таблицы 3. Проведенные расчеты показали, что режим идентифицированной расчетной схемы не

отличается от режима исходной схемы. Результаты вычислений погрешностей определения параметров режима МПЗ ТП2 – ТП3 при искажении результатов измерений в узлах 24, 25 на +0,5% или на +0,5º приведены в таблице 4. Индекс 1 соответствует узлу 24, индекс 2 – узлу 25. В столбцах представлены величины погрешностей, отвечающих изменению величины в заголовке столбца.

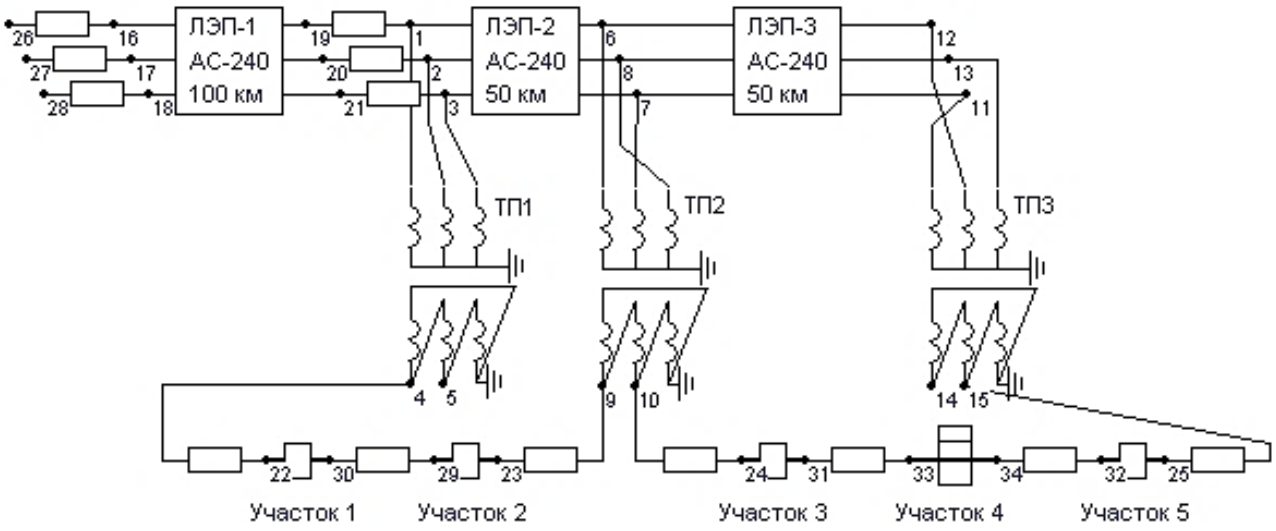


Рисунок 3 – Расчетная схема однопутного участка неоднородной МПЗ

Таблица 3 – Параметры режима исходной схемы и исходные параметры участков тяговой сети

Узел	U, кВ	U, º	I, А	I, º	$\underline{y}_{10}$, мкСм	$\underline{z}_1$, Ом
24	25,839	58,908	80,59	52,91	–	–
31	25,637	58,146	80,68	–127,73	17,54	2,053+*j*4,484
33	25,637	58,146	80,68	52,27	–	–
34	25,249	56,381	81,10	–130,39	74,12	3,697+*j*10,156
32	25,248	56,382	81,10	49,61	–	–
25	25,040	55,602	81,20	–131,00	17,54	2,053+*j*4,484

Таблица 4 – Погрешности восстановления режима МПЗ при изменениях модулей напряжений и токов на +0,5 %, углов напряжений и токов на +0,5º

Параметр	U_1	U_2	φ_{1U}	φ_{2U}	I_1	I_2	φ_{1I}	φ_{2I}
1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\frac{\Delta U_1}{U_1}$, %	0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\frac{\Delta U_2}{U_2}$, %	-0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1
$\Delta\varphi_{1U}$, º	0,0	0,0	0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
$\Delta\varphi_{2U}$, º	0,0	0,0	-0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
	2	3	4	5	6	7	8	9
$\frac{\Delta I_1}{I_1}$, %	-2,0	0,3	-8,0	9,3	0,2	0,2	0,0	0,3
$\frac{\Delta I_2}{I_2}$, %	-2,3	0,6	-7,7	9,0	0,2	0,2	0,1	0,0
$\Delta\varphi_{1I}$, º	2,7	-3,0	-1,9	2,0	0,0	0,0	0,0	-0,2
$\Delta\varphi_{2I}$, º	2,6	-3,0	-2,2	2,3	0,0	0,0	0,0	1,3

Погрешности определения режима не превышают 0,1 % по модулям напряжений, но достигают 9,3 % по модулям токов, причем критичными являются фазы исходных напряжений. Фазовые погрешности напряжений идентифицированного режима не превышают 0,1º, угловые погрешности токов – не выше 3º. Как и в предыдущем случае, наиболее важной является точность измерения напряжений.

Если тяговые нагрузки представить в виде шунтов и разнести их по краям анализируемого однородного участка тяговой сети, то задача идентификации может быть решена по формулам (1), в которых вместо емкостной проводимости будет присутствовать комплексная проводимость, эквивалентирующая нагрузку.

Предложенная методика идентификации параметров тяговых сетей переменного тока для однопутных участков позволяет получать решетчатые схемы замещения тяговых сетей, которые в условиях погрешностей измерений векторов напряжений и токов, не превышающих 0,5 %, 0,5º, дают погрешности определения режима по напряжениям не более 0,4 % и 0,2º, по токам – не более 0,9 %, 1,3º. При неоднородной тяговой сети однопутного участка токовые погрешности могут достигать 9 % и 3º.

Предложенная методика может быть обобщена на более сложные случаи двухпутных участков тяговой сети.

Список литературы

1. Файбисович, В. А. Определение параметров электрических систем: новые методы экспериментального определения [Текст] / В. А. Файбисович, В. Д. Лордкипанидзе. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 120 с.

2. Шелюг, С. Н. Методы адаптивной идентификации параметров схемы замещения элементов электрической сети [Текст] / С. Н. Шелюг: автореф. дисс. канд. техн. наук / уральский гос. техн. ун-т. – Екатеринбург, 2000. – 23 с.

3. Закарюкин, В. П. Параметрическая идентификация линий электропередачи и трансформаторов [Текст] / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, М. С. Шульгин / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2012. – 96 с.

4. Крюков, А. В. Параметрическая идентификация линий электропередачи на основе фазных координат [Текст] / А. В. Крюков, В. П. Закарюкин, М. С. Шульгин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркуск, 2011. – № 1 (29). – С. 140 – 147.

5. Бардушко, В. Д. Принципы построения систем электроснабжения железнодорожного транспорта [Текст] / В. Д. Бардушко, В. П. Закарюкин, А. В. Крюков. – М.: Теплотехник, 2014. – 166 с.

6. Закарюкин, В. П. Сложнонесимметричные режимы электрических систем [Текст] / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков / Иркутский гос. ун-т. – Иркутск, 2005. – 273 с.

7. Закарюкин, В. П. Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока [Текст] / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2011. – 170 с.

8. Joe Chow Synchrophasor data and their application in power system control, 49th IEEE Conference on Decision and Control Workshop Smart Grids: New Challenges for Control System Society,12/14/2010.

9. C. Borda, A. Olarte, H. Diaz, PMU-based Line and Transformer parameter estimation. 978-1-4244-3811-2/09. 2009 IEEE.

10. D. Shi1, D. J. Tylavsky, K. M. Koellner, N. Logic, D. E. Wheeler, Transmission line parameter identification using PMU measurements. European Transactions on Electrical Power, 11.2010.

References

1. Faybisovich V A., Lordkipanidze V. D. *Opredelenie parametrov elektricheskih sistem: novye metody eksperimental'nogo opredeleniya* [Determination of electric systems parameter: new methods of experimental definition]. Moscow: Energoatomizdat, 1982, 120 p.

2. Shelug S. N. *Metody adaptivnoj identifikacii parametrov shemy zamescheniya `elementov*

`elektricheskoj seti (Methods of parameters adaptive identification of electric network equivalent circui). The abstract of the Ph. D. thesis, Yekaterinburg, UGTU(UPI), 2000, 23 p.

3. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V., Shulgin M. S. *Principy postroeniya sistem `elektrosnabzheniya zheleznodorozhnogo transporta* (Railway transport power supply system's principles). Irkutsk, 2014. 166 p.

4. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Shulgin M. S. Identification of power lines and transformers parameters [Parametricheskaya identifikaciya linij `elektroperedachi i transformatorov]. Irkutsk: ISTU – IrGUPS, 2012. 96 p.

5. Bardushko V. D., Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. Identification of power lines parameters on the phase coordinates basis [Parametricheskaya identifikaciya linij `elektroperedachi na osnove faznyh koordinat]. *Modern technologies. System analysis. Modeling. – Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie*, 2011, no. 1 (29), pp. 140 – 147.

6. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. *Slozhnonesimmetrichnye rezhimy `elektricheskih sistem* (Asymmetrical modes of electric systems). Irkutsk: ISU, 2005, 273 p.

7. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. *Metody sovmestnogo modelirovaniya sistem tyagovogo i vneshnego `elektrosnabzheniya zheleznyh dorog peremennogo toka* (Methods of traction and external power supply system's modeling of alternating current railroads). Irkutsk: ISTU, 2011, 170 p.

8. Joe Chow**.** Synchrophasor Data and Their Application in Power System Control, 49th IEEE Conference on Decision and Control Workshop "Smart Grids: New Challenges for Control System Society,12/14/2010.

9. C. Borda, A. Olarte, H. Diaz, PMU-based Line and Transformer parameter estimation. 978-1-4244-3811-2/09. 2009 IEEE.

10. D. Shi1, D. J. Tylavsky, K. M. Koellner, N. Logic, D. E. Wheeler, Transmission line parameter identification using PMU measurements. European Transactions on Electrical Power, 11.2010.

УДК 621.331:621.311.4:621.314

Е. Ю. Салита, Т. В. Ковалева, А. В. Никонов

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ СИЛОВЫХ ВЕНТИЛЕЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

На тяговых подстанциях электрических железных дорог эксплуатируются различные преобразователи, в состав вентильных конструкций которых входят силовые вентили штыревого и таблеточного типа. При таком разнообразии вентильных конструкций становится актуальной проблема несоответствия объемов и качества информации о характеристиках и диагностических параметрах силовых полупроводниковых вентилей требованиям надежной работы системы электроснабжения. Для возможного прогнозирования нормальной работы диодов и тиристоров необходимы новые приборы и простые технологии профилактического диагностирования, соответствующие государственным и отраслевым стандартам и инструкциям. Одним из наиболее точных методов, позволяющих не только определить исправность вентилей, но и дать прогноз по сроку их службы, является метод диагностирования по повторяющемуся импульсному обратному току. Этот метод положен в основу создания прибора для измерения импульсных обратных токов (ПОИТ), который применяется на Западно-Сибирской железной дороге. С помощью этого прибора проведена диагностика около 30 тысяч вентилей, по результатам которой осуществлена отбраковка неисправных вентилей, спрогнозировано состояние вентилей на перспективу. Анализ статистики проведенных исследований позволил определить ряд мероприятий для повышения надежности работы преобразователей тяговых подстанций.

Широкомасштабное внедрение средств технического диагностирования устройств электроснабжения, в том числе силовых вентилей преобразователей тяговых подстанций, является одним из инновационных технических решений, на которые ориентирована железнодорожная энергетика в соответствии с Федеральным законом № 261-ФЗ от 23.11.2009 и Энергетической стратегией ОАО «РЖД» [1, 2].

На тяговых подстанциях электрических железных дорог постоянного тока Российской Федерации эксплуатируется более 2030 выпрямителей и 48 инверторов и выпрямительно-инверторных преобразователей. В составе преобразователей используются вентильные конструкции типа УВКЭ, ПВКЕ, ПВЭ, ТПЕД, В-ТПЕД, ТПДЕ-Ж, В-МПП-Д, В-ТПП, БП1, ВИПЭ, И-ПТП, В-ПТЕ, БП2 и другие, созданные с использованием силовых вентилей (диодов и тиристоров) различных типов и классов. Модернизация и перевод преобразователей на двенадцатипульсовые схемы выпрямления ведется в основном на базе силовых диодных блоков типа БСЕ, выпускаемых опытным заводом Всероссийского электротехнического института (ВЭИ) [3 – 5].

При таком разнообразии вентильных конструкций и преобразовательных агрегатов тяговых подстанций становится актуальной проблема несоответствия объемов и качества информации о характеристиках и диагностических параметрах силовых полупроводниковых вентилей требованиям надежной работы системы электроснабжения. Дистанции электроснабжения часто не имеют необходимого комплекса аппаратуры для определения параметров и проведения испытаний полупроводниковых вентилей, а имеющиеся приборы не всегда обеспечивают необходимую точность измерений. Для возможного прогнозирования нормальной работы диодов и тиристоров необходимы новые приборы и простые технологии профилактического диагностирования [6].

Технологии диагностических испытаний должны соответствовать государственным и отраслевым стандартам и инструкциям. В соответствии со стандартом СТО РЖД 12.003-2011 и изменениями к нему от 01.10.2013 штыревые вентили должны проверяться по тепловому сопротивлению, а таблеточные – по импульсному обратному току I_{RRM}. При этом в соответствии с ГОСТ 24461-80 проверке по току I_{RRM} подлежат силовые вентили, не подразделяемые на штыревые и таблеточные.

Согласно упомянутым стандартам и инструкции по техническому обслуживанию и ремонту оборудования тяговых подстанций (ЦЭ-936) одним из основных параметров-критериев годности таблеточных вентилей является повторяющийся импульсный обратный ток. Значение импульсного обратного тока соответствует мгновенному значению обратного тока в момент времени, который соответствует амплитуде максимально допустимого повторяющегося импульсного обратного напряжения. Формы импульсов подаваемого напряжения и измеряемого тока, обусловленные указанным ГОСТом, представлены на рисунке 1.

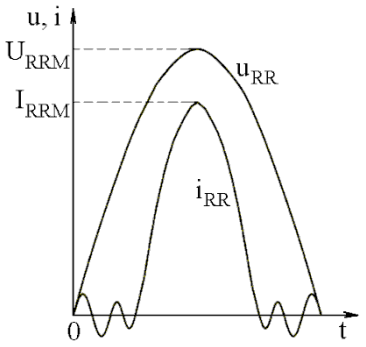


Рисунок 1 – Формы импульсов подаваемого напряжения и измеряемого тока

Существующие в настоящее время методы контроля состояния вентилей полупроводниковых преобразователей тяговых подстанций (проверка распределения тока между параллельными ветвями диодов или тиристоров, обратного напряжения между последовательно соединенными вентилями), регламентируемые инструкцией ЦЭ-936 и стандартом СТО РЖД 12.003-2011, не позволяют спрогнозировать их надежность.

Срок службы и надежная работа преобразователей зависят от величины и цикличности нагрузок. Использование подвижного состава нового типа и рост грузоперевозок приводят к увеличению и неравномерности тяговых нагрузок. Вследствие этого в преобразователях возрастает число отказов штыревых диодов из-за их перегрева («теплового старения»). Внутреннее тепловое сопротивление штыревых диодов начинает возрастать после пяти – шести лет эксплуатации, поэтому измерение внутреннего теплового сопротивления штыревых вентилей является актуальной задачей. Для преобразователей тяговых подстанций предусмотрена диагностика штыревых диодов по тепловому сопротивлению в соответствии с указанными выше инструкцией и стандартом. Приборы для измерения тепловых сопротивлений

вентилей ИТСВ-1 были изготовлены в 1978 г. Московским электромеханическим заводом. В настоящее время количество приборов ИТСВ-1 значительно сократилось вследствие старения. Методики поверки приборов нет, поэтому отсутствует объективная оценка теплового контроля вентилей и, как следствие, определение их предотказного состояния. Например, на Западно-Сибирской железной дороге (ЗСЖД) в наличии имеется 11 приборов ИТСВ-1, из которых пять находятся в нерабочем состоянии, а шесть – не поверены.

На применяемых в настоящее время вентильных конструкциях В-ТПЕД, ТПДЕ-Ж, В-МПП-Д и силовых блоках БСЕ количество таблеточных диодов в последовательной цепи сведено к минимуму из-за использования вентилей высокого класса. Величина повторяющегося импульсного обратного тока является показателем вентильной прочности силового полупроводникового прибора. Способы функционального диагностирования полупроводниковых преобразователей (в том числе основанные на инфракрасном излучении) позволяют определить неисправность преобразователя лишь при полном пробое вентиля. В то же время потеря вентилем класса ведет к увеличению обратного напряжения, приходящегося на включенные последовательно с ним вентили, и, соответственно, к более интенсивному их старению. Своевременное выявление увеличения импульсного обратного тока вентилей позволит повысить надежность преобразователей на разных стадиях эксплуатации.

В 1997 г. по рекомендации сотрудников ОмГУПСа и работников ЗСЖД электрические параметры вентилей силовых блоков БСЕ и методика контроля импульсного обратного тока I_{RRM} были внесены предприятием-изготовителем в инструкцию по эксплуатации блоков и групповой паспорт диодов. Данные значения, измеренные при температуре (25±10) ˚С, не должны превышать: для диодов ДЛ133-500-14 I_{RRM} = 2 мА; для диодов ДЛ123-320-12 и ВЛ7-320-12 при напряжении U_R = 1,0 кВ I_R = 200 мкА; для диодов Д453-2000-24 при напряжении U_R = 1,5 кВ I_R = 1,5 мА, а при напряжении U_{RRM} = = 2,4 кВ I_{RRM} = 5 мА; для диодов ДЛ153-2000-20 при напряжении U_R = 2,0 кВ I_{RRM} = 5 мА (20 мА при температуре 140 ˚С).

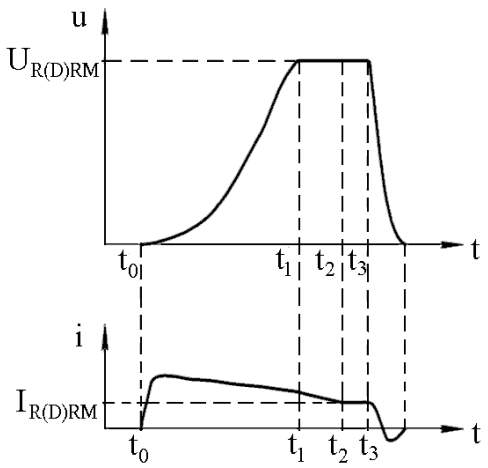


Рисунок 2 – Испытательный импульс напряжения и кривая тока, формируемые установкой АДИП

В Омском государственном университете путей сообщения было разработано и изготовлено переносное устройство для измерения импульсных обратных токов силовых вентилей УИИОТСВ. Основным недостатком устройства является устаревшая элементная база, из-за чего оно является тяжелым и громоздким, а использование аналоговых измерительных приборов неудобно при наличии нескольких пределов измерения [7].

Переносная установка серии АДИП (автоматический диагностический измеритель параметров), выпускаемая НПЦ «Альфа-Ритм», позволяет производить испытания вентилей от 4 до 32 классов по напряжению и измерять значения токов от 0,1 до 70 мА. Погрешность измерений данной установки составляет ± 10 %. По принципу действия установка очень сложна. Форма импульса, подаваемого на испытуемый вентиль, приведена на рисунке 2 и определяется согласно ТУ завода-изготовителя, что не запрещено ГОСТ 24461-80.

Для диагностирования обратной ветви вольт-амперной характеристики вентилей департаментом электрификации и электроснабжения Министерства путей сообщения было рекомендовано устройство диагностики преобразователя типа УДП-1. Способ диагностирования данным устройством заключается в том, что на вентиль подается обратная полуволна импульсного напряжения, амплитуда которой составляет 80 % напряжения класса испытуемого вентиля. Полупроводниковый прибор считается выдержавшим испытание, если в процессе

проверки показания устройства не отличаются от указанного значения более чем на 10 %. Результат диагностирования по такой методике заключается только в определении целостности вентиля. Информацию, позволяющую осуществлять прогнозное диагностирование, т. е. по результатам периодических измерений фиксировать значения параметров, определять характер и тенденции их изменения, получить в данном случае невозможно. Кроме того, описываемый метод диагностирования не соответствует требованиям ГОСТ 24461-80. Вследствие неэффективности диагностирования вентилей устройство УДП-1 в настоящее время практически не используется.

Таким образом, используемые устройства для определения импульсного обратного тока диодов и тиристоров либо сконструированы на устаревшей элементно-технической базе, либо не полностью отвечают требованиям, изложенным в инструкции ЦЭ-936 и ГОСТ 24461-80. В связи с этим департаментом электроснабжения ОАО «Российские железные дороги» была поставлена задача выполнить работы по созданию прибора для диагностики диодов и тиристоров, отвечающего следующим требованиям:

ручная плавная установка напряжения класса силового диода (тиристора) – в пределах от 8 до 40;

индикация напряжения на трехразрядном цифровом индикаторе, погрешность установки напряжения класса – не более ± 15 %;

формирование на силовом диоде (тиристоре) испытательного импульса напряжения с амплитудой, соответствующей установленному напряжению класса U_{RRM} (U_{DRM});

измерение импульсных токов в обратном (I_{RRM}) и закрытом (I_{DRM}) состоянии вентиля в следующих пределах:

I диапазон – от 0,1 до 0,99 мА;

II диапазон – от 1 до 9,99 мА;

III диапазон – от 10 до 70 мА;

индикация тока I_{RRM} (I_{DRM}) на трехразрядном цифровом индикаторе с погрешностью измерения не более 10 %;

защита от пробоя силовых диодов и тиристоров при превышении импульсного обратного тока более:

I и II диапазоны – 12,5 мА;

III диапазон – 75 мА.

В 2006 г. сотрудниками Дорожной электротехнической лаборатории (ДЭЛ) ЗСЖД и кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПСа был изготовлен макетный образец прибора для диагностики диодов и тиристоров, а впоследствии – и сам прибор для измерения импульсных обратных токов (ПОИТ), и разработана инструкция по его эксплуатации [6]. Прибор создан на современной микроэлектронной элементной базе, отличается низкой стоимостью, простотой в применении, имеет небольшие габариты (410×130×360 мм), массу не более пяти килограммов. Методика измерения обратных токов вентилей этим прибором не отличается от методики, разработанной для устройства УИИОТСВ, т. е. диагностирование проводится в соответствии с требованиями инструкции ЦЭ-936 и ГОСТ 24461-80. В конструкции прибора предусмотрены регулятор напряжения, повышающий трансформатор, формирователь импульсов, блок управления и защиты, микроконтроллер, многоканальный АЦП, измерительные делитель и шунты, индикационное табло и клавиатура. Для работы прибора требуется выносной ЛАТР-2М и высоковольтный трансформатор типа ОЛ-0,63/6У1.

Проведенные калибровочные испытания прибора для диагностирования диодов и тиристоров показали, что относительная погрешность измерений устройства в диапазоне от 500 до 3000 В составляет не более 1,6 %.

Метод диагностирования исправного состояния вентилей путем измерения импульсных обратных токов имеет высокую эффективность. Диагностические испытания с использованием прибора ПОИТ, проведенные на тяговых подстанциях ЗСЖД, позволили своевременно выявить диоды с тенденцией к повышению импульсного обратного тока и повысить эксплуатационную надежность выпрямителей.

В 2013 г. изготовлен второй экземпляр прибора ПОИТ, который используется для диагностики силовых вентилей преобразовательных агрегатов в дистанциях электроснабжения без привлечения работников ДЭЛ ЗСЖД.

По состоянию на начало 2015 г. на тяговых подстанциях постоянного тока ЗСЖД эксплуатируется 326 выпрямительных и 10 выпрямительно-инверторных преобразователей (ВИПов). Основной схемой выпрямления на дороге является двенадцатипульсовая. По этой схеме работает 225 преобразователей, что составляет 67 % от их общего числа. Из 110 преобразователей, выполненных по шестипульсовой схеме, 50 имеют сложную нулевую схему, а 60 – мостовую. На тяговой подстанции Омск установлен один двадцатичетырехпульсовый преобразователь. При этом в 170 преобразователях использованы вентильные конструкции на штыревых, а в 166 – на таблеточных вентилях.

В составе эксплуатируемых выпрямительных преобразователей находятся морально и физически устаревшие вентильные конструкции УВКЭ-1, ПВКЕ-2, ПВЭ-3 и ПВЭ-5, выполненные на штыревых диодах типа ВЛ200. Вентильные конструкции УВКЭ-1 и ПВЭ-3 имеют принудительное воздушное охлаждение. Замена указанных конструкций на современные, такие как В-ТПЕД, ТПДЕ-Ж, В-МПП-3,15к и блоки БСЕ, в состав которых входят таблеточные вентили, позволила бы значительно снизить потери электроэнергии и трудозатраты на их техническое обслуживание. Таблеточные вентили характеризуются следующими преимуществами перед штыревыми: меньшие масса и габариты, высокая циклостойкость без старения контактов, оптимальный температурный режим за счет двухстороннего теплоотвода, стабильность теплового сопротивления, механическая устойчивость конструкции и контактов при электродинамических и термических воздействиях сверхтоков короткого замыкания.

В вентильных конструкциях типа ТПЕД и В-ТПЕД используются лавинные вентили, основное преимущество которых перед нелавинными заключается в большей устойчивости к перенапряжениям. Лавинные вентили имеют защитное (охранное) кольцо, предотвращающее поверхностный пробой.

Из 10 эксплуатируемых на ЗСЖД ВИПов восемь – на штыревых вентилях (ВИПЭ-1 и ВИПЭ-2) и два – на таблеточных (И-ПТП-2,4к-4к). По срокам эксплуатации ВИПы распределяются следующим образом: со сроком службы 30 и более лет – 7 шт., менее 30 лет – 3 шт. Выпрямительная часть преобразователя ВИПЭ-2 состоит из вентильных конструкций типа ПВЭ-3.

Срок службы 260 преобразователей (77,4 % от их общего числа) превысил нормативное значение. Выпрямительные агрегаты на некоторых тяговых подстанциях эксплуатируются более трех нормативных сроков. В настоящее время наблюдаются недостаточные темпы обновления выпрямителей (в течение последних пяти лет замена выпрямителей вообще не производилась). Все это может привести к существенным негативным последствиям.

За последние 15 лет было заменено и модернизировано всего лишь 35 (10,4 % от их общего числа) преобразовательных агрегатов. Большая часть вентильных конструкций преобразователей на штыревых вентилях (90 %) эксплуатируется более двух нормативных сроков. Темпы старения преобразователей на таблеточных вентилях значительно ниже. Только 55,4 % преобразователей превысили нормативный срок эксплуатации.

За период с 2006 по 2014 г. проведено испытание по току I_{RRM} около 30 тысяч вентилей преобразователей тяговых подстанций ЗСЖД. Результаты испытаний показали: наибольший процент отбракованных вентилей имеют вентильные блоки типа БСЕ (7,7 %) и конструкции ТПДЕ-Ж (9,2 %). В их составе используются нелавинные вентили типа Д453-2000 и отсутствуют защитные RC-цепи, подключаемые к выводам вентильных обмоток трансформатора. Нелавинные диоды в отличие от лавинных не выдерживают даже кратковременных импульсов перенапряжений, выходящих за пределы регламентированных для них значений (основной их недостаток).

Результаты проверки силовых вентилей по току I_{RRM} подтверждают преимущество ла-

винных вентилей над нелавинными.

Штыревые лавинные диоды ВЛ200 при длительной эксплуатации имеют низкий процент отказов (1,5 %). В настоящее время они не производятся, что вызывает их дефицит и не позволяет производить своевременную замену при повреждении диодов в эксплуатируемых преобразователях. Высокую надежность показали вентили ДЛ153-2000 (отбраковано 0,3 %). Из 720 вентилей лишь два не прошли испытания по току I_{RRM}. Несмотря на конструкцию, вентили ДЛ133-500 имеют высокую повреждаемость (4,1 %). Влиять на результаты проверки могут как условия работы преобразователя, так и климатические факторы, поэтому чем больше вентилей проверено, тем объективнее результаты испытаний.

По итогам оценки состояния вентильных конструкций преобразователей тяговых подстанций ЗСЖД необходимо выполнение следующего ряда мероприятий.

1. Продолжить перевод преобразователей с шести- на двенадцатипульсовую схему.

2. Вентильные конструкции УВКЭ-1, ПВКЕ-2, ПВЭ-3 как не отвечающие современным требованиям модернизировать с использованием блоков БСЕ.

3. Вентильные конструкции ПВЭ-5 и ТПЕД-3150 переводить на двенадцатипульсовые схемы с использованием вентилей, предусмотренных конструкцией и прошедших диагностические испытания по значению тока I_{RRM} согласно требованиям ГОСТ 24461-80, либо с использованием блоков БСЕ.

4. Высвободившиеся после модернизации вентильных конструкций блоками БСЕ исправные штыревые диоды использовать для замены диодов, отбракованных в других преобразователях.

5. В случае применения в вентильных конструкциях нелавинных вентилей параллельно ОПН следует включать защитные RC-цепи без предохранителей.

6. Для замены вентилей ВЛ200 в вентильных конструкциях ПВЭ-5 можно использовать штыревые вентили типа ДЛ161-200, цена которых без учета НДС в ценах 2015 г. составляет 1980 р. за штуку. Это будет в 1,5 – 2 раза дешевле (в зависимости от схемы выпрямления), чем приобретение блоков БСЕ (без учета потерь электроэнергии и затрат на техническое обслуживание).

7. Управлению электрификации и электроснабжения Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО РЖД:

рассмотреть вопрос о включении проверки штыревых диодов по току I_{RRM} в стандарт СТО РЖД 12.003-2011;

обеспечить дистанции электроснабжения приборами для измерения тока I_{RRM} и внутреннего теплового сопротивления (ИТСВ) силовых вентилей на современной элементной базе;

приобретать вентильные конструкции на лавинных вентилях.

Список литературы

1. Черемисин, В. Т. Основные направления реализации Федерального закона № 261-ФЗ от 23.11.09 «Об энергосбережении…» в холдинге «Российские железные дороги» [Текст] / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2010. – № 2 (2). – С. 119 – 123.

2. Гапанович, В. А. Энергетическая стратегия и электрификация российских железных дорог [Текст] / В. А. Гапанович, С. Н. Епифанцев, В. А. Овсейчук; Под ред. Г. П. Кутового. – М.: Эко-Пресс, 2012. – 196 с.

3. Повышение эффективности систем тягового электроснабжения переменного и постоянного тока и сокращение потерь электрической энергии в них: Научная монография [Текст] / В. Т. Черемисин, В. А. Кващук и др. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2015. – 145 с.

4. Силовые преобразователи тяговых подстанций и электроподвижного состава: Учебное пособие [Текст] / Е. Ю. Салита, Г. С. Магай и др. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2013. – 131 с.

5. Черемисин, В. Т. Оценка потенциала повышения энергетической эффективности системы тягового электроснабжения [Текст] / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2013. – № 2 (14). – С. 75 – 84.

6. Прибор для диагностирования силовых вентилей преобразователей тяговых подстанций [Текст] / Е. Ю. Салита, Т. В. Ковалева и др. // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте: Материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2013. – С. 69 – 75.

7. Диагностика силовых вентилей преобразователей тяговых подстанций [Текст] / Е. Ю. Салита, В. А. Кващук и др. // Электроснабжение железных дорог: Межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2007. – С. 19 – 23.

References

1. Cheremisin V. T., Nikiforov M. M. The main directions of the implementation of the Federal Law № 261-FZ of 23.11.09 «Concerning energy saving ...» in the holding «Russian Railways» [Osnovnye napravleniya realizatsii Federal'nogo Zakona № 261-FZ ot 23.11.09 «Ob ehnergosberezhenii…» v kholdinge «Rossijskie zheleznye dorogi»]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2010, no. 2 (2), pp. 119 – 123.

2. Gapanovich V. A., Epifantsev S. N., Ovseychuk V. A. *Ehnergeticheskaya strategiya i ehlektrifikatsiya rossijskikh zheleznykh dorog* (Energy Strategy and the electrification of the Russian railroads). Moscow: Eco-Press, 2012, 196 p.

3. Cheremisin V. T., Kvaschuk V. A., Kondratiev U. V., Salita E. U., Komyakova T. V., Kovaleva T. V. *Povyshenie ehffektivnosti sistem tyagovogo ehlektrosnabzheniya peremennogo i postoyannogo toka i sokrashhenie poter' ehlektricheskoj ehnergii v nikh* (Increasing the efficiency of the traction power supply of AC and DC power and the reduction of electric power losses in it). Omsk: OSTU, 2015, 145 p.

4. Salita E. U., Magay G. S., Komyakova T. V., Kovaleva T. V. *Silovye preobrazovateli tyagovykh podstantsij i ehlektropodvizhnogo sostava* (Power converters of electric traction substations and of the railway stock). Omsk: OSTU, 2013, 131 p.

5. Cheremisin V. T., Nikiforov M. M. Assessing the potential of energy efficiency of the traction power supply system [Otsenka potentsiala povysheniya ehnergeticheskoj ehffektivnosti sistemy tyagovogo ehlektrosnabzheniya]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2013, no. 2 (14), pp. 75 – 84.

6. Salita E. U., Kovaleva T. V., Redchits N. V., Kosenko E. S., Kvaschuk V. A., Lapenko N. M. Pribor dlya diagnostirovaniya silovykh ventilej preobrazovatelej tyagovykh podstantsij [The device for diagnosing the traction substation power rectifiers converters]. *Materialy vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* (Materials of Russian scientific and technical conference with international participation). – Omsk, 2013, pp 69 – 75.

7. Salita E. U., Kvaschuk V. A., Lapenko N. M., Shmygin N. N. Diagnostika silovykh ventilej preobrazovatelej tyagovykh podstantsij [The diagnostics of traction substation power rectifiers converters]. *Mezhvuzovskii tematicheskii sbornik nauchnykh trudov «Elektrosnabzhenie zheleznykh dorog»* (Interuniversity thematic collection of scientific works «Railways power supply»). – Omsk, 2007, pp. 19 – 23.

УДК 621.397.4:519.6

Н. Г. Ананьева, В. В. Петров

ПРИМЕНЕНИЕ КЛАСТЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ И ВИДЕОРЕГИСТРАЦИИ НА ТЕРРИТОРИАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ОБЪЕКТАХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Выполнен анализ особенностей территориально распределенных объектов железнодорожного транспорта для реализации систем видеонаблюдения и видеорегистрации. Предложена трехэтапная методика раз-

работки таких систем, в основе которой лежит разделение всей системы на зоны видеонаблюдения, зоны видеорегистрации и информационные кластеры, обеспечивающая оптимизацию системы по критерию минимальных затрат.

В настоящее время эффективность работы железнодорожного транспорта существенно зависит от внедрения новых информационных технологий, в том числе и систем постоянного видеонаблюдения и видеорегистрации, которые существенно повышают безопасность эксплуатации подвижного состава и эффективность охранных мероприятий на территориях ответственных объектов железнодорожного транспорта. Постоянное совершенствование и снижение цены различного оборудования для реализации охранных систем позволяет использовать системы видеорегистрации и на территориях подразделений железнодорожного транспорта. Основные документы, которыми следует руководствоваться при внедрении систем видеонаблюдения и видеорегистрации, представлены в источниках [1, 2]. Эти нормативные акты выдвигают требования к реализации подобных систем, а рекомендации помогают найти экономически обоснованные технические решения и создать эффективно функционирующую структуру. Однако они не учитывают основные особенности предприятий железнодорожного транспорта – большие и протяженные территории, на которых имеются многочисленные ответственные объекты, требующие постоянного контроля за происходящими на них событиями с помощью современных систем видеонаблюдения и видеорегистрации. В данной работе предложена соответствующая методика разработки и внедрения таких систем, учитывающая перечисленные особенности территориально распределенных объектов на железнодорожном транспорте.

В процессе выбора оборудования и разработки систем видеорегистрации следует учитывать реальные условия их установки и эксплуатации на конкретном объекте, а при разработке задания на проектирование системы видеонаблюдения следует руководствоваться нормативной базой железнодорожного транспорта и конкретными пожеланиями соответствующих специалистов в этой области. Целью данной работы является предложение трехуровневой методики для разработки оптимизированной системы видеорегистрации с применением кластерной технологии, позволяющей минимизировать затраты на ее реализацию с использованием методов линейного программирования. Применение предлагаемой методики демонстрируется на примере реализации системы видеонаблюдения и видеорегистрации на территории локомотивного депо.

На первом этапе разработки систем видеонаблюдения и видеорегистрации для обеспечения требуемого качества видеозаписи и последующей беспроблемной идентификации подозрительных объектов следует рассчитать по известным методикам необходимое количество уличных видеокамер и фиксировать места их расположения на территории конкретного предприятия.

Локомотивное депо состоит из многочисленных корпусов, рассредоточенных на большой территории с высоким уровнем индустриальных помех, поэтому беспроводная система видеонаблюдения, основанная на применении IP-камер или GSM-камер малоэффективна, если даже оборудована системой шифрования и защиты конфиденциальной видеоинформации от возможного ее перехвата, т. е. приводит к излишним материальным затратам и не способна обеспечить достаточную надежность. Следует также учитывать, что специализированные генераторы помех способны полностью блокировать работу беспроводных систем видеонаблюдения и видеорегистрации.

Учитывая особенности объектов железнодорожного транспорта, можно сформулировать набор основных требований к системам видеонаблюдения и видеорегистрации, устанавливаемых на предприятиях железнодорожного транспорта:

– высокая надежность системы и алгоритмов оптимизации;

– простота монтажа, настройки и обслуживания системы;

– унификация блоков, узлов и деталей аппаратуры с установленными ранее системами;

– обеспечение бесперебойной работы при отсутствии внешнего питания, воздействия на аппаратуру вибраций, пыли, влаги, температуры, агрессивных газов.

Перечисленные требования необходимо реализовать при минимальном вмешательстве в работу уже существующих информационных систем и всех подразделений предприятия, а минимизацию затрат осуществить за счет использования уже имеющейся в депо инфраструктуры: серверного помещения, сетевых коммутаторов, кабель-каналов, сетей электропитания и помещений, подходящих для размещения цифровых видеорегистраторов. С целью реализации описанных требований наиболее подходящий вариант системы по критерию «цена – качество» может включать в себя уличные аналоговые камеры с фиксированным объективом и коаксиальные кабели с совмещенной шиной питания достаточной длины для подключения к автономному видеорегистратору, который осуществляет цифровую обработку видеосигнала, автономное архивирование, передачу на центральный сервер для оперативного видеонаблюдения и дублирования видеоархива.

Современные цифровые видеорегистраторы характеризуются высокой скоростью записи, широкой функциональностью, различным числом входных аналоговых видеоканалов, эффективным алгоритмом сжатия цифрового аудио и видео, большим объемом записываемой информации до следующего цикла перезаписи, возможностью подключения IP-видеокамер и внешнего сетевого оборудования по каналам Ethernet и, что особенно важно, имеют дополнительную собственную защиту от несанкционированного доступа к архивам видеоинформации. Таким образом, на первом этапе разработки системы видеорегистрации устанавливаются уличные видеокамеры, а видеорегистраторы монтируются в подходящих помещениях, соблюдая все технические требования и рекомендации по применению и используя имеющуюся инфраструктуру предприятия.

На втором этапе разработки распределенных систем территория предприятия разбивается на несколько зон видеорегистрации, которые включают в себя ближайшие видеорегистраторы и установленные на первом этапе уличные камеры видеонаблюдения. Для конкретизации методики в данной статье рассмотрен пример с пятью видеорегистраторами (общим числом входных каналов равным 34) и пятью зонами видеорегистрации, включающими в себя 34 видеокамеры. На взаимное расположение зон видеорегистрации с уличными видеокамерами внутри каждой зоны и видеорегистраторами, находящимися в помещениях предприятия, накладываются определенные ограничения технического характера:

расстояние между любой камерой видеонаблюдения и видеорегистратором в каждой зоне видеорегистрации не должно превышать 100 м, что определяется техническими параметрами коаксиального кабеля и видеокамер;

помещения, в которых находятся видеорегистраторы, должны располагаться на расстоянии не более 100 м от имеющихся в депо сетевых коммутаторов корпоративной сети Интернета.

На рисунке 1 представлен примерный план территории локомотивного депо с указанием выбранных мест расположения уличных видеокамер и видеорегистраторов в подходящих для них помещениях. Зоны видеорегистрации отмечены пунктирными окружностями, радиус каждой из которых не превышает 100 м.

На третьем этапе разработки системы для каждого видеорегистратора формируется оптимальный информационный кластер видеокамер на основе применения методов линейного программирования, который может включать в себя камеры из различных взаимно пересекающихся зон видеорегистрации в отличие от установленных на первом этапе зон видеонаблюдения, которые были сформированы в соответствии с требованиями охранных структур (отвечающих за идентификацию подозрительных объектов).

На рисунке 1 отмечены пять видеорегистраторов и пять зон видеорегистрации, которые частично перекрываются и обеспечивают возможность вариативного выбора из возможных многочисленных вариантов схем подключения камер и реализации баланса числа каналов видеорегистраторов и числа видеокамер для оптимизации затрат в каждом информационном кластере системы. В серверное помещение заводятся кабели, соединяющие цифровые видеорегистраторы с центральным сервером системы видеонаблюдения и видеорегистрации с

помощью имеющегося в локомотивном депо активного сетевого оборудования. На плане локомотивного депо и схеме информационных потоков серверное помещение обозначено как «Центральный сервер системы».

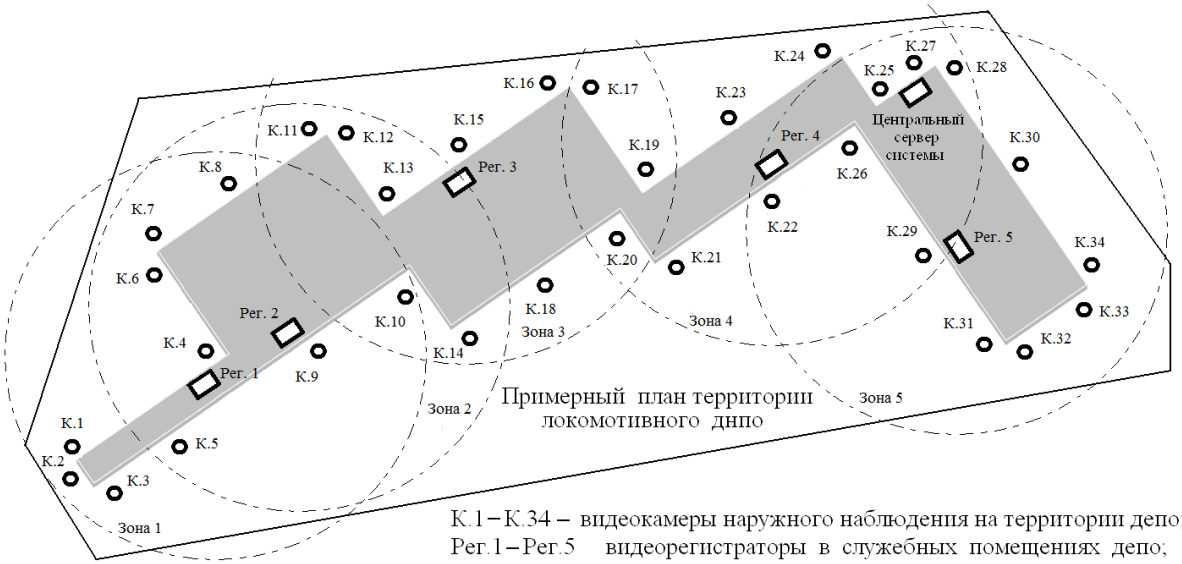


Рисунок 1 – План локомотивного депо с расположением видеорегистраторов и зонами максимально возможного удаления от них уличных видеокамер

В предлагаемой методике задача оптимизации заключается в определении схемы кроссировки между уличными видеокамерами, расположенными в соседних взаимно перекрывающихся зонах видеорегистрации, и конкретными входами видеорегистраторов, которые формируют соответствующий информационный кластер системы, для обеспечения минимума затрат на общую длину коаксиального кабеля между видеокамерами и конкретным видеорегистратором. Это позволяет осуществить обоснованный объективный подход (исключить субъективный человеческий фактор) к формированию оптимальных информационных кластеров видеокамер в пределах соседних зон доступа к видеорегистраторам. Очевидно, что данная постановка задачи может быть решена на основе методов линейного программирования – раздела математики, посвященного решению экстремальных задач, задаваемых системами линейных уравнений и неравенств. При постановке классической транспортной задачи [3, 4] выделяют два основных критерия: достижение минимума затрат на перевозку груза (критерий минимума расстояний перевозки грузов) и минимальное время доставки груза (критерий минимума времени перевозки грузов).

Для постановки задачи оптимизации составим условную графическую схему информационных потоков между видеокамерами, находящимися в соответствующих зонах доступности видеорегистраторов и возможными информационными кластерами системы, которая представлена на рисунке 2.

На рисунке 2 можно увидеть, что число доступных видеорегистратору камер видеонаблюдения больше, чем у него имеется входных каналов. Это позволяет осуществлять оптимальный выбор схемы подключения каналов связи между видеокамерами и видеорегистраторами на основе постановки и решения оптимизационной задачи. Основной причиной применения метода линейного программирования в предложенной методике являются его простота и наглядность для подтверждения возможности реализации этой методики на конкретном объекте с использованием критерия оптимизации по минимуму затрат.

Общей (стандартной) задачей линейного программирования называется задача нахождения минимума линейной целевой функции вида

$$C_{\min} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} C_{ij} x_{ij} = \min . \qquad (1)$$

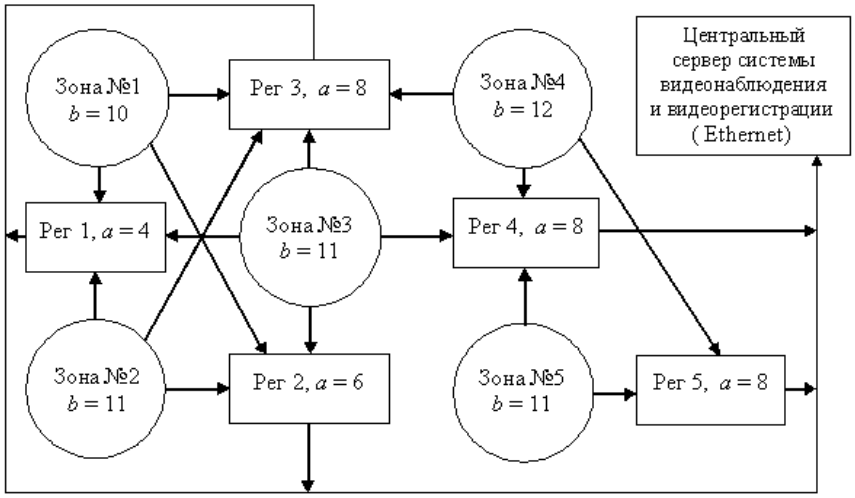


Рисунок 2 – Схема информационных потоков между видеокамерами в зонах максимально возможного доступа к видеорегистраторам в пределах возможных информационных кластеров системы

Применительно к решению задачи оптимизации систем видеорегистрации аргументы этой функции имеют следующий смысл:

$i_{\max} = n$ – число видеорегистраторов в информационной системе, которые выполняют роль поставщиков каналов, где a_i – число каналов в каждом видеорегистраторе (обычно от четырех до шестнадцати);

$j_{\max} = m$ – число камер видеонаблюдения, которые выполняют роль потребителей каналов, где $b_j = 1$ – число каналов, необходимых для работы каждой конкретной камеры видеонаблюдения;

C_{ij} – затраты на организацию канала связи от i-го регистратора до j-й камеры (практически стоимость кабеля и работ на его прокладку);

x_{ij} – количество каналов связи между i-м регистратором и j-й камерой видеонаблюдения, которые могут принимать значения: 1 – при необходимости организации канала связи внутри кластера и 0 – при неперспективности прокладки кабеля с экономической точки зрения между некоторой камерой и видеорегистратором, хотя технические средства и возможности для этого имеются в каждом конкретном случае.

Переменные x_{ij} должны удовлетворять следующим требованиям:

ограничению «по запасам», т. е. число видеокамер, подключенных к конкретному регистратору внутри кластера, не должно превышать числа каналов регистратора в этом кластере, а общее число камер видеонаблюдения в системе не должно превышать общего числа всех каналов видеорегистраторов во всей системе

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

ограничению «по потребностям», т. е. к каждой видеокамере должен быть организован хотя бы один канал, а общее число камер видеонаблюдения в каждом кластере не должно превышать общего числа каналов каждого видеорегистратора в соответствующем кластере

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ij} \ge b_j , \ j = \overline{1,m} ; \qquad (3)$$

условию «неотрицательности», т. е. видеокамера не может быть поставщиком каналов (с технической точки зрения это означает, что камера не может выполнять функцию коммутатора каналов):

$$x_{ij} \geq 0;\ i = \overline{1,m};\ \ j = \overline{1,n}. \qquad (4)$$

Таким образом, поставлена классическая задача линейного программирования, которую можно отнести к классу транспортных задач. Специфика этого типа задач в том, что в математике разработаны и детально описаны эффективные алгоритмы их решения на основе применения средств вычислительной техники. Задача линейного программирования будет иметь канонический вид, если в основной задаче вместо системы неравенств имеет место система уравнений с ограничениями в форме равенства.

Для решения транспортной задачи симплекс-методом можно воспользоваться онлайн-сервисом [5] со следующими исходными данными, взятыми из рисунка 1:

– число видеорегистраторов $n = 5$ ($a_{\max}$);

– число камер видеонаблюдения $m = 34$ ($b_{\max}$);

– число каналов в каждом регистраторе (поставщики каналов a_i): $a_1 = 4$, $a_2 = 6$, $a_3 = 8$, $a_4 = 8$, $a_5 = 8$;

– число линий связи между наружными камерами видеонаблюдения и видеорегистраторами (потребители каналов b_j): $b_1 = 1$, $b_2 = 1$, . . . , $b_{33} = 1$, $b_{34} = 1$;

– данные о «транспортных» расходах C_{ij} для организации канала от i-го видеорегистратора к j-й камере представлены в таблице 1 (в матрице транспортных расходов).

Транспортная задача считается сбалансированной, если соблюдается условие

$$\sum_{i=1}^{n} a_i = \sum_{j=1}^{m} b_j\ , \qquad (5)$$

которое в данном случае выполняется, т. е. $\Sigma a_i = 4 + 6 + 8 + 8 + 8 = 34$, а сумма каналов Σb_j=1+1+1+1+1+1+1+1+1+1+1+1+1+1+1+1+1+1+1+1+1+1+1+1+1+1+1+1+1+1+1+1+1+1+1+1+1+1=34.

Для приведения системы ограничений к каноническому виду вводят в каждое условие искусственные переменные r и дополнительные элементы в строку M, элементы которой рассчитываются как сумма соответствующих элементов условий – равенств (тех которые после приведения к каноническому виду содержат искусственные переменные R) с противоположным знаком, а в строку F симплекс-таблицы заносят коэффициенты целевой функции, в столбец S – свободный член.

Таблица 1 – Матрица затрат на организацию каналов

$(C_{i,j})_{m\times n} =$

j \ i	1	2	…	5
1	49	99	…	195
2	51	95	…	155
3	59	96	…	190
4	19	52	…	182
5	11	48	…	171
6	74	76	…	132
7	75	77	…	168
8	91	97	…	193
9	61	8	…	251
10	98	47	…	190
…	…	…	…	…
33	247	233	…	51
34	253	239	…	56

Используя указанные в таблице 1 данные системы, можно составить исходную симплекс-таблицу 2.

Таблица 2 – Исходная симплекс-таблица (в сокращенном виде)

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	…	x_{170}	S
F	49	51	59	19	11	74	75	91	61	98	…	59	0
r_1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	…	0	4
r_2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	…	0	6
r_3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	…	0	8
r_4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	…	0	8
r_5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	…	0	8
r_6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	…	0	1
r_7	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	…	0	1
r_8	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	…	0	1
r_9	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	…	0	1
r_{10}	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	…	0	1
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
r_{33}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	…	0	1
r_{34}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	…	1	1
r_{35}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	…	0	1
r_{36}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	…	0	1
r_{37}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	…	0	1
r_{38}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	…	0	1
r_{39}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	…	1	1
M	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	…	-2	-68

В ходе последовательных преобразований симплекс-таблицы можно получить окончательный оптимальный результат, обеспечивающий минимальные затраты на организацию каналов связи между камерами видеонаблюдения и регистраторами, на основе которого и сформировать оптимальный план разделения системы на информационные кластеры.

Однако из-за большого размера симплекс-таблицы и большого числа возможных линий связи между камерами и регистраторами сложно провести последующий анализ для оценки оптимальности полученного результата и подтвердить работоспособность метода и поставленной задачи линейного программирования. Если упростить эту задачу и решить ее только для первых двух зон видеорегистрации, то можно будет получить простой и наглядный пример, с помощью которого достаточно легко можно будет проанализировать топологию подключения видеокамер и сравнить с результатом полученного решения задачи линейного программирования для подтверждения его эффективности. При этом необходимо учитывать, что в упрощенном виде получим всего лишь частное оптимальное решение только для двух взаимно пересекающихся зон, а в масштабах всей системы это решение может быть и не оптимальным. Эта особенность задач оптимизации вытекает из принципов оптимальности Беллмана [6], которую обязательно следует учитывать при разработке сложных территориально распределенных информационных систем.

Схема упрощенного более наглядного варианта взаимного расположения камер и регистраторов только в двух зонах видеорегистрации представлена на рисунке 3. Не представляет большой сложности убедиться в том, что изображенный на рисунке 3 вариант организации двух информационных кластеров является оптимальным и обеспечивает минимум затрат для рассматриваемого примера.

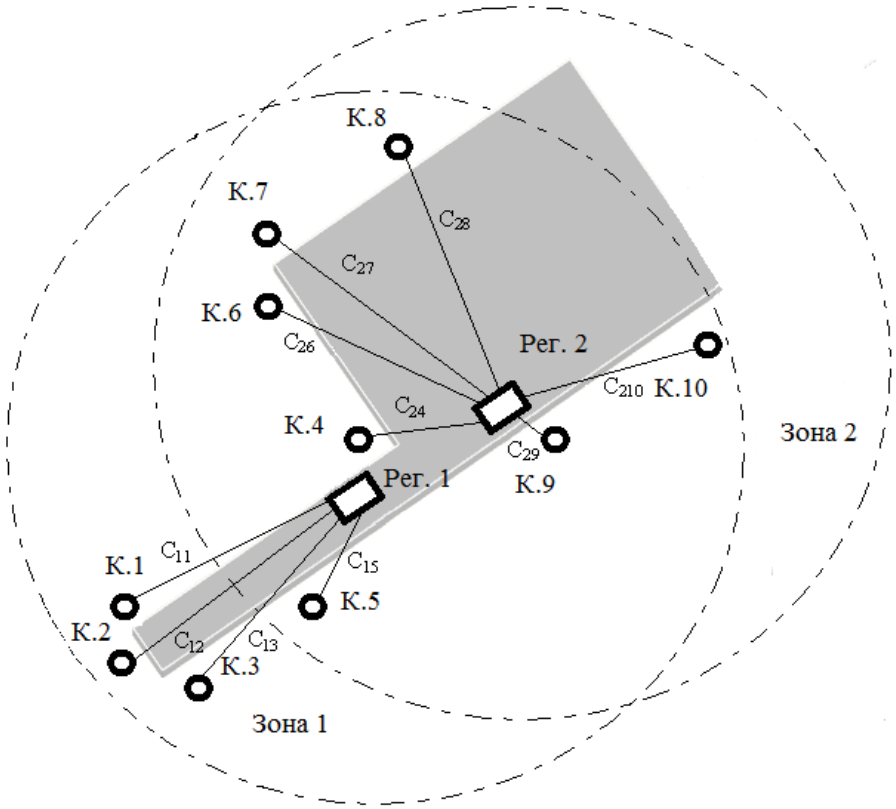


Рисунок 3 – Фрагмент примерного плана оптимальной организации кластеров из двух видеорегистраторов в двух смежных зонах видеорегистрации (максимально возможного доступа камер к регистраторам)

Составленную упрощенную задачу (наглядный пример оптимального плана) в данном случае можно решить с помощью наиболее популярного метода потенциалов [7]. Затраты на организацию каждого канала связи между видеорегистраторами и всеми камерами видеонаблюдения заданы матрицей тарифов в таблице 3.

Таблица 3 – Матрица тарифов на организацию каналов связи

Номер камеры (b_j) / Номер регистратора (a_i)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Общее число каналов регистраторов
1	49	51	59	19	11	74	75	91	61	98	4
2	99	95	96	52	48	76	77	97	8	47	6
Общее число линий связи для камер	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	$\sum = 10$

Проверяем необходимое и достаточное условие разрешимости задачи:

$$\sum a_i = 4 + 6 = 10; \quad (6)$$

$$\sum b_j = 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 = 10. \quad (7)$$

Условие баланса поставщиков и потребителей каналов в данном примере соблюдается (т. е. запасы равны потребностям). Следовательно, модель транспортной задачи является закрытой. В результате решения поставленной версии транспортной задачи получаем минимальные затраты

$$F(x) = 49 \cdot 1 + 51 \cdot 1 + 59 \cdot 1 + 11 \cdot 1 + 52 \cdot 1 + 76 \cdot 1 + 77 \cdot 1 + 97 \cdot 1 + 8 \cdot 1 + 47 \cdot 1 = 527 \quad (8)$$

и соответствующий оптимальный план подключения видеокамер к видеорегистраторам (для организации информационных кластеров в зонах видеорегистрации):

четыре входа первого видеорегистратора необходимо выделить для подключения первой, второй, третьей и пятой видеокамер;

шесть входов второго видеорегистратора необходимо использовать для подключения четвертой, шестой, седьмой, восьмой, девятой и десятой камер видеонаблюдения.

На основе решения поставленной задачи была найдена оптимальная схема кроссировки видеокамер и видеорегистраторов, которая полностью совпадает с изображенной на рисунке 3 схемой подключения камер к регистраторам.

Предложенная методика вполне может применяться и для разработки систем регистрации на основе цифровых видеокамер, для подключения которых применяются сетевые коммутаторы (вместо использованных в данном примере видеорегистраторов), так как практически все ограничения на организацию каналов связи (длину медного кабеля) сохраняются.

На основании полученных результатов можно сделать выводы.

1. При использовании имеющейся инфраструктуры предприятия предложенная трехэтапная методика разработки систем видеонаблюдения и видеорегистрации на территориально распределенных объектах позволяет обеспечить минимальные затраты.

2. Разделение плана предприятия на зоны видеонаблюдения перекрывающиеся соседние зоны видеорегистрации и информационные кластеры системы видеорегистрации позволяют привести поставленную задачу линейного программирования к классической транспортной задаче.

3. Предложенная постановка задачи линейного программирования позволяет не просто минимизировать затраты, но и, что особенно важно, исключить субъективные факторы при разработке системы видеорегистрации на предприятиях железнодорожного транспорта.

4. Подтверждение эффективности предложенной методики продемонстрировано на примере оптимизации системы видеорегистрации для локомотивного депо железнодорожного транспорта.

Список литературы

1. ГОСТ Р 51558-2000 Системы охранные телевизионные. Общие технические требования и методы испытания [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 2000. – 12 с.

2. РД 78.36.003-2002 Инженерно-техническая укрепленность. Технические средства охраны. Требования и нормы проектирования по защите объектов от преступных посягательств [Текст] / ГУВО МВД России. – М., 2002. – 32 с.

3. Моисеев, Н. Н. Методы оптимизации [Текст] / Н. Н. Моисеев, Ю. П. Иванилов, Е. М. Столярова. – М.: Наука, 1978. – 352 с.

4. Корнеенко, В. П. Методы оптимизации: Учебник [Текст] / В. П. Корнеенко. – М.: Высшая школа, 2007. – 664 с.

5. Задачи оптимизации. Решение транспортной задачи симплекс-методом [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://uchimatchast.ru/, свободный.

6. Беллман, Р. Прикладные задачи динамического программирования [Текст] / Р. Беллман, С. Дрейфус. – М.: Наука, 1965. – 458 с.

7. Решение задач онлайн. Транспортная задача. Метод потенциалов [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://mfth.semtstr.ru/transp/potential-method.php, свободный.

References

1. *Sistemy okhrannye televizionnye. Obshchie tekhnicheskie trebova-niia i metody ispytaniia GOST R 51558-2000* (Video security system. General specifications of the requirements, and test methods, State Standart R 51558-2000). Moscow, Standarty, 2000, 12 p.

2. *RD 78.36.003-2002 Inzhenerno-tekhnicheskaia ukreplennost'. Tekhnicheskie sredstva okhrany. Trebovaniia i normy proektirovaniia po zashchite ob"ektov ot prestupnykh posiaga-tel'stv* (RD 78.36.003-2002 engineering and technical protection. Technical means of protection. The requirements and design standards for the protection of objects of criminal encroaching-ments). Moscow: GUVO MVD Rossii, 2002, 32 p.

3. N. N. Moiseev, Iu. P. Ivanilov, E. M. *Stoliarova Metody optimizatsii* (Optimization techniques). Moscow: Nauka, 1978, 352 p.

4. Korneenko V. P. *Metody optimizatsii* (Optimization Methods). Moscow: Vysshaya shkola, 2007, 664 p.

5. Zadachi optimizatsii. Reshenie transportnoi zadachi simpleks metodom [Elektronnyi resurs] / Rezhim dostupa: http://uchimatchast.ru/, svobodnyi.

6. Bellman R., Dreifus S. *Prikladnye zadachi dinamicheskogo programmirovaniia* (Bellman dynamic programming). Moscow: Nauka, 1965, 458 s.

7. Reshenie zadach onlain. Transportnaia zadacha. Metod potentsialov. [Elektronnyi re-surs] / Rezhim dostupa: http://mfth.semtstr.ru/transp/potential-method.php, svobodnyi.

УДК 621.317:519.683

С. Н. Чижма, А. А. Лаврухин, А. Г. Малютин, А. С. Окишев

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ФИДЕРАХ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Описаны структурная схема, алгоритмическая основа, функциональный состав и некоторые технологические особенности аппаратного и программного обеспечения информационной системы оперативного контроля параметров электроэнергии в сети тягового электроснабжения.

Автоматизированные системы коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ), внедренные в последнее время в сети железных дорог, позволяют решить вопрос коммерческого учета электроэнергии. Однако АСКУЭ ОАО «РЖД» не решают вопросы оперативного мониторинга распределения электроэнергии в контактной сети, от которой потребляется значительный объем электроэнергии, что в свою очередь не позволяет корректировать уровень небаланса электроэнергии в контактной сети.

В настоящее время активно развиваются системы определения расхода и качества электроэнергии в тяговых сетях, однако, как правило, разработки находятся в начальной стадии и не позволяют комплексно решать проблемы контроля расхода электроэнергии в тяговых сетях [1 – 7].

Для решения указанной проблемы требуется совместно с коммерческим учетом электроэнергии осуществлять технический учет, а именно – контроль расхода по фидерам контактной сети (ФКС). Такая система учета электроэнергии на фидерах контактной сети позволит не только определять объем потерь и величину небаланса, но и выявлять перетоки мощности между подстанциями, вызывающие дополнительные потери [8, 9].

Разработанная на кафедре «Автоматика и системы управления» Омского государственного университета путей сообщения информационная система оперативного контроля параметров электроэнергии в сети тягового электроснабжения (ИСМУЭ ФКС) позволяет за счет измерения электрического тока и напряжения на каждом выпрямителе и фидере контактной сети постоянного тока проводить исследования, направленные на повышение эффективности использования электроэнергии на тягу поездов [10 – 12]. Пилотный вариант системы установлен на шести подстанциях опытного полигона Свердловской железной дороги.

На каждой подстанции установлены минимум семь измерительных систем, определяющих токи, напряжения, мощности соответственно выходных шин выпрямителей, фидеров левой и правой межподстанционных зон, шины станционной нагрузки, выходы которых подключены к информационным входам концентратора подстанции (КП). Система позволяет определять мгновенные токи, напряжения, мощности, учитывать электроэнергию по каждой точке учета, по подстанции и по всему полигону, контролировать спектральный состав

токов и напряжений, определять и сохранять временные графики токов, напряжений и мощностей.

Алгоритмическое обеспечение системы направлено на получение следующих энергетических показателей на всех точках учета.

Действующее значение напряжения и тока за период усреднения $\Delta T_j = T_j - T_{j-1} = \text{const}$ определяется по формулам:

$$U_j = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_k (u_k)^2};\ I_j^+ = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_k (i_k^+)^2};\ I_j^- = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_k (i_k^-)^2}; \tag{1}$$

$$I_j = I_j^+ - I_j^-, \tag{2}$$

где индекс k соответствует номерам отсчетов, принимаемых с АЦП, при выбранной частоте дискретизации сигнала, j – номерам интервалов с квадратичным усреднением, а верхний индекс – направление тока. Первичный интервал усреднения ΔT сразу после приема с АЦП равен 1 с, а вторичный (выбираемый пользователем) может составлять 1, 3 или 6 с.

Мощность постоянного тока

$$P_j = U_j \cdot I_j. \tag{3}$$

Приращение электроэнергии за период ΔT

$$\Delta W_j = P_j \cdot \Delta T. \tag{4}$$

Электроэнергия, отданная точкой учета,

$$W^{\text{отд}} = \sum_j \Delta W_j,\ \Delta W_j > 0. \tag{5}$$

Электроэнергия, принятая точкой учета,

$$W^{\text{прин}} = \sum_j \Delta W_j,\ \Delta W_j < 0. \tag{7}$$

Баланс электроэнергии за период ΔT по выводам выпрямителей и по фидерам по всей тяговой подстанции

$$\Delta W_{ТП} = \sum_m W_m^{\text{отд}} - \sum_n (W_n^{\text{отд}} - W_n^{\text{прин}}), \tag{8}$$

где индекс n соответствует номерам всех фидеров, а индекс m – всех выводов выпрямителей тяговой подстанции.

ИСМУЭ ФКС является иерархической многоуровневой территориально распределенной автоматизированной системой и включает в себя следующие элементы (рисунок 1):

1) нижний (измерительный) уровень: информационно-измерительные комплексы (ИИК): измерительные блоки на выпрямителях и фидерах контактной сети; источник питания (далее – блок питания измерительного преобразователя); информационно-вычислительные комплексы электроустановки (ИВКЭ) подстанции: оптический коммутатор, концентратор сбора данных подстанции, средства сопряжения УСПД и сети передачи данных (далее – ССС);

2) верхний уровень – информационно-вычислительный комплекс (далее – ИВК): средство сопряжения устройства сбора и передачи данных и сети передачи данных, сервер системы сбора данных телеметрии (далее – ССДТ), сервер телеметрических приложений (далее – СТП); автоматизированные рабочие места и серверы службы энергоснабжения.

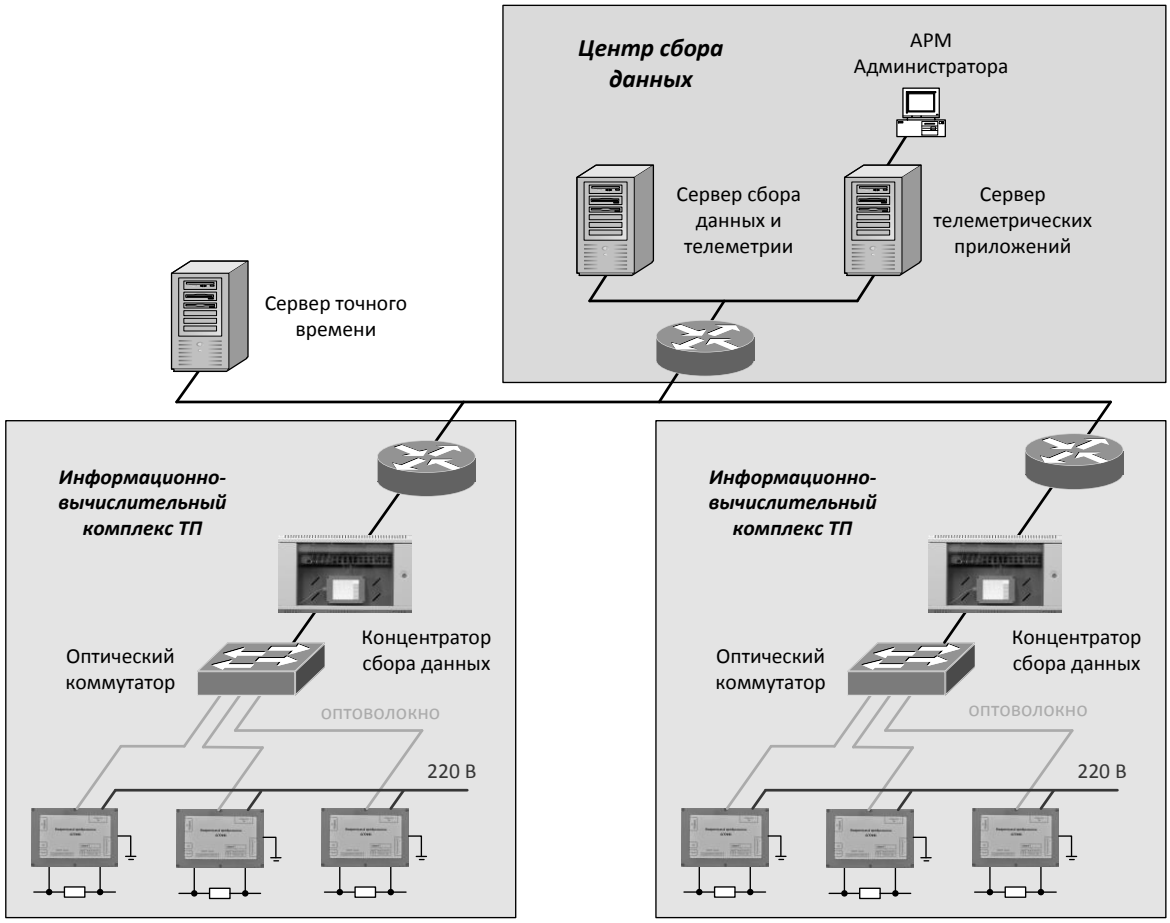


Рисунок 1 – Структура ИСМУЭ ФКС

Уровень тяговой подстанции образован измерительными преобразователями (ИПами), установленными на каждой точке учета (фидере или выпрямителе), и концентратором подстанции. Интерфейс пользователя на подстанции обеспечивается устройством сбора и передачи данных (УСПД), имеющим в своем составе сенсорный экран.

Измерительный преобразователь (рисунок 2) состоит из двух основных модулей – аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и одноплатного компьютера (ОКа).

Модуль АЦП (рисунок 3) разработан на базе микросхемы ADS131E04 и микропроцессора с ядром STM32F4. Модуль выполняет следующие задачи: дискретизацию тока и напряжения, вычисление их действующих

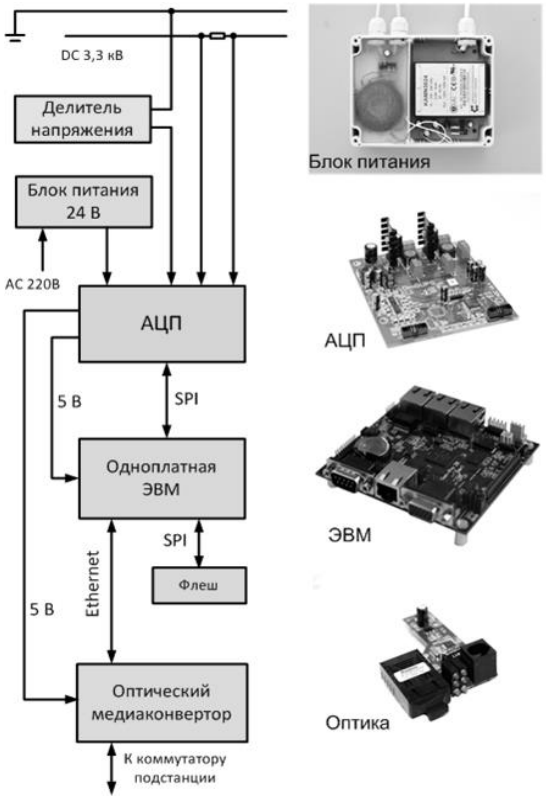


Рисунок 2 – Структурная схема подсистемы нижнего уровня

значений на периоде 1 с, вычисление спектра амплитуд сигналов тока и напряжения, вычисление мощности и энергии (отдельно для каждого направления тока) на периоде 1 с, буферизацию данных, передачу данных в ОК, управление режимами АЦП, контроль правильности работы ОКа, хранение текущих показаний ИПа, вычисление и хранение его калибровочных коэффициентов.

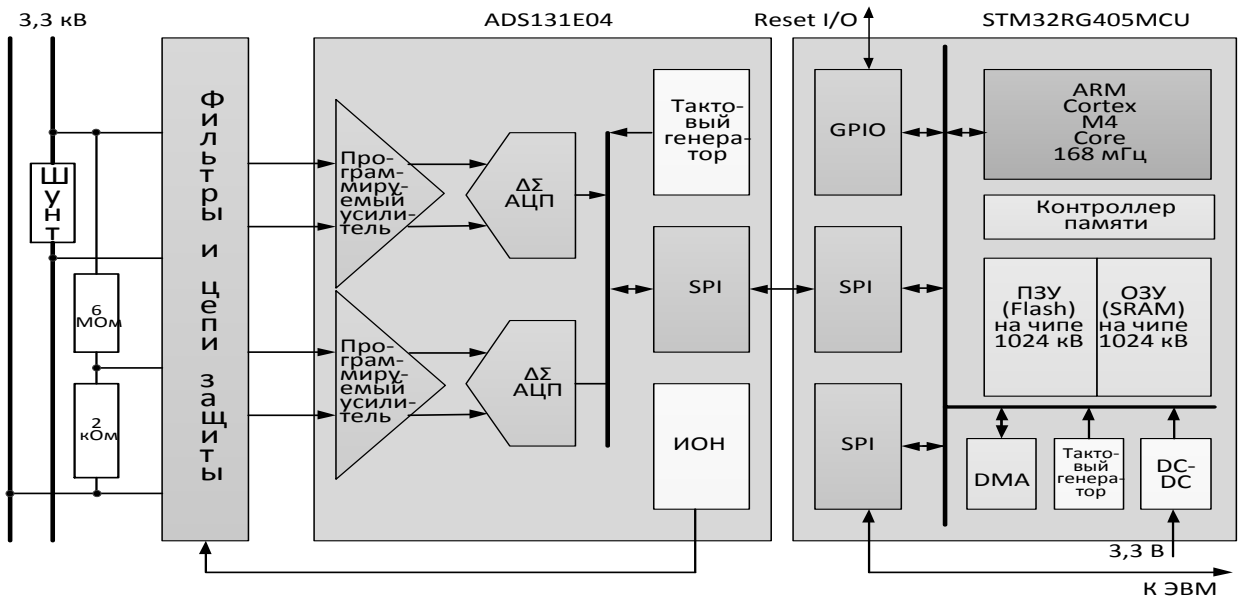


Рисунок 3 – Структурная схема модуля аналого-цифрового преобразователя

Одноплатный компьютер Тион-Про-28 выполняет функции по передаче данных (усредненных измерений с шагом 1, 3 или 6 с, журналов событий, полученных с платы АЦП) на концентратор подстанции и в ИВК, а также функции хранения этих данных во FLASH-памяти в течение заданного времени (от месяца до года).

УСПД подстанции также выполнено на базе одноплатного компьютера Тион-Про-28. На экране УСПД подстанции обычно видно состояние всех точек измерения и текущие значения определяемых параметров (напряжения, тока и его направления, мощности, принятой и отданной энергии).

Все данные в системе имеют временные метки (абсолютное время создания этих данных). Все устройства в системе периодически синхронизируются по времени. За счет использования специализированных технологий точность времени в системе равна 0,1 с.

Также в состав ИСМУЭ ФКС входит система обеспечения единого времени (СОЕВ), которая формируется на всех уровнях иерархии и обеспечивает единое время на всех ИИК, ИВКЭ и ИВК. Основной режим работы системы – автономное круглосуточное функционирование, позволяющее в автоматическом режиме осуществлять на уровне ИВКЭ сбор данных измерения с выпрямителей и фидеров подстанций, обработку информации и передачу данных от ИВКЭ к ИВК посредством каналообразующей аппаратуры и системы передачи данных ОАО «РЖД» (СПД).

Подсистема верхнего уровня (рисунок 4) решает следующие основные задачи:

сбор результатов измерений со всех ИВКЭ, входящих в состав ИСМУЭ ФКС;

сбор данных о состоянии средств измерений («Журналов событий») со всех ИВКЭ, входящих в состав ИСМУЭ ФКС;

автоматическое хранение результатов измерений, журналов событий системы, журналов событий ИИК, журналов событий УСПД в базе данных в течение не менее двух лет;

резервное копирование баз данных и копирование их архива на внешний носитель информации;

автоматическую коррекцию времени и синхронизацию времени с единым календарным временем средствами СОЕВ;

передачу результатов измерений, данных о состоянии средств измерений в службу энергоснабжения и другим заинтересованным субъектам;

предоставление пользователям и эксплуатационному персоналу регламентированного доступа к визуальным, печатным и электронным данным.

Возможности подсистемы верхнего уровня определяются требованиями, которые предъявляются к ИСМУЭ ФКС, и, в частности, ИВК характеризуется следующими основными эксплуатационными возможностями:

работа в реальном масштабе времени всей сетевой и серверной инфраструктуры в целом;

гарантированный прозрачный доступ к информации 24 часа в сутки, семь дней в неделю, 365 дней в году;

надежность и отказоустойчивость решения в рамках используемых, а также планируемых ресурсов;

высокая производительность сетевого и серверного оборудования всех уровней;

малое время отклика, адекватная пропускная способность, отсутствие узких мест, изоляция трафика без дополнительных задержек;

все виды взаимодействия между компонентами ИВК должны осуществляться по стандартным физическим интерфейсам, протоколам передачи данных и программным интерфейсам взаимодействия, определенным в спецификациях IEEE 802.3;

масштабируемость как для увеличения количества клиентских приложений, так и для роста функциональных возможностей всего комплекса;

гибкость и управляемость инфраструктуры.

ИВК обеспечивает поддержку следующих основных режимов функционирования:

основной режим – 24 часа в день, 365 дней в году за исключением времени проведения технологических работ. В основном режиме обеспечивается производительность, достаточная для обмена информацией между всеми элементами в составе ИСМУЭ ФКС;

режим проведения технологических работ (плановые простои). В данном режиме производительность может обеспечиваться не в полном объеме либо ИВК может быть недоступен клиентам;

аварийный режим (сбои системы без полной потери функционирования или отказы с полной потерей всей функциональности или ее части). В данном режиме обмен информацией может осуществляться с потерей производительности (при наличии резервных каналов), для всех или некоторых пользователей система может быть недоступна. Переход системы в аварийный режим не должен сказываться на сохранности данных в других элементах ИСМУЭ ФКС.

В ИВК можно выделить следующие функциональные подсистемы, которые носят вспомогательный характер:

1) сетевая подсистема предназначена для организации взаимодействия между компонентами ИВК по протоколам семейства TCP/IP. Подсистема должна состоять из оборудования коммутации и маршрутизации трафика. Оборудование предназначается для маршрутизации и коммутации трафика внутри ИВК и между элементами ИСМУЭ ФКС;

2) подсистема информационной безопасности (ИБ) предназначена для обеспечения уменьшения вероятности утечки конфиденциальной информации, несанкционированной модификации или утраты информации, т. е. уничтожения, необратимого искажения с потерей смысла, недоведения информации до адресата или блокировки доступа к ней. Подсистема информационной безопасности включает в себя комплекс следующих средств:

средства межсетевого экранирования – необходимы для обеспечения пакетной фильтрации сетевого трафика внутри ИВК и между элементами ИСМУЭ ФКС;

средства обнаружения и противодействия атакам – предназначены для обнаружения и исключения трафика сетевой атаки из потока данных;

средства контроля доступа оконечных устройств к сети – предназначены для предотвращения доступа к ИСМУЭ ФКС устройств, не соответствующих политике безопасности;

средства централизованного управления доступом – предназначены для централизованного управления доступом администраторов к оборудованию ИСМУЭ ФКС;

средства управления подсистемы ИБ – предназначены для централизованного управления средствами ИБ;

3) подсистема управления и мониторинга – предназначена для безопасного управления элементами ИСМУЭ ФКС, включая централизованное администрирование, сбор системных сообщений, сбор статистики и обновление программного обеспечения. Схема подключения ИВКЭ и ИВК к СПД приведена на рисунке 5.

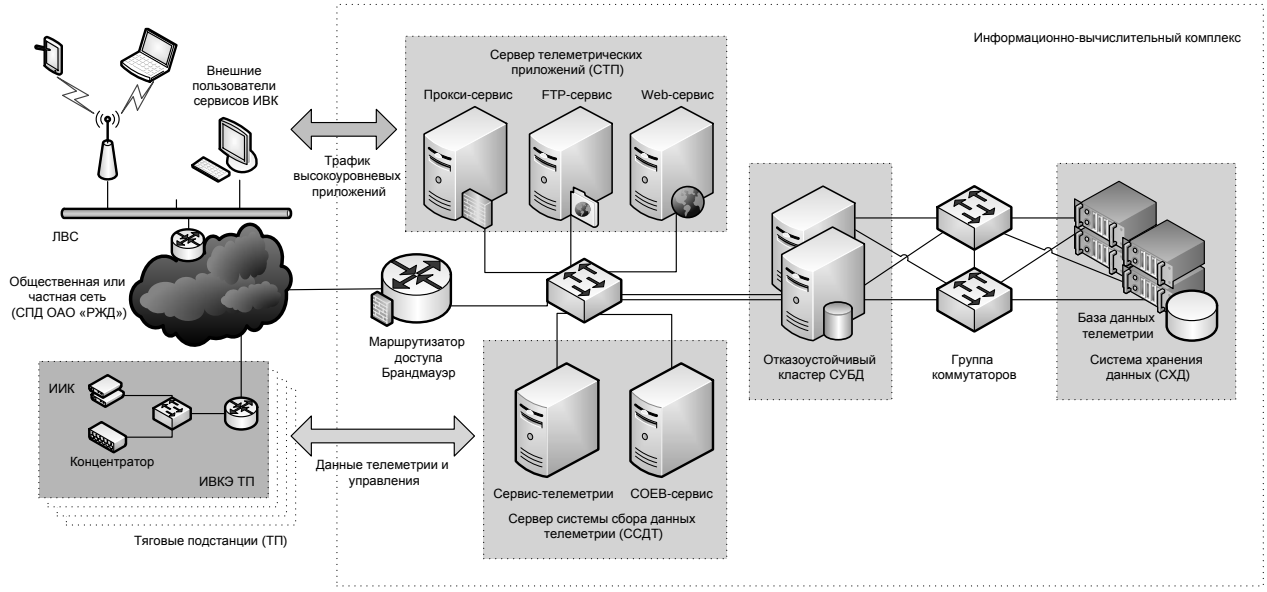


Рисунок 4 – Структурная схема подсистемы верхнего уровня

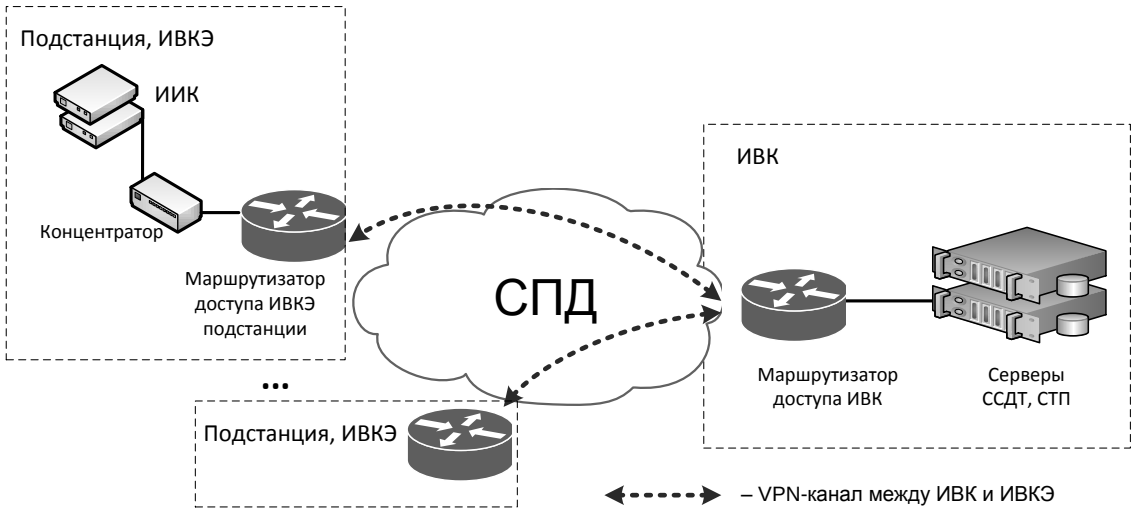


Рисунок 5 – Схема организации каналов связи

К вспомогательным подсистемам ИВК относятся также элементы структурированной кабельной системы и система бесперебойного электропитания и кондиционирования воздуха.

Информационное обеспечение ИВК представляет собой совокупность массивов информации, включая описание структур БД, средств классификации и кодирования информации, унифицированной системы документации, включая входные и выходные формы, программ-

ные модули по обеспечению формирования и передачи данных о результатах измерений, о состоянии средств измерений, а также языковых средств системы, используемых для формализации естественного языка при общении пользователей с системой в процессе ее функционирования.

Массивы информации включают в себя

техническую информацию, которая может быть использована в расчетных задачах по учету электроэнергии;

служебную информацию – информацию о текущем состоянии средств учета (журналы событий и т. п.).

Информационное обеспечение обеспечивает

ввод, обработку, накопление и хранение информации, необходимой для реализации функций системы;

представление документов в форме, удобной для работы пользователя, в соответствии с его функциональными обязанностями и установленным разграничением доступа;

актуальность и достоверность информации в базах данных, ее хранение с минимально необходимой избыточностью, контроль полноты и непротиворечивости вводимой информации;

адаптируемость к возможным изменениям информационных потребностей пользователей и используемым программным и техническим средствам.

Совокупность информационных массивов отвечает следующим требованиям:

– хранение технической, служебной, нормативно-справочной информации не менее двух лет;

– запись информации в БД содержит данные об источнике, дате и времени;

– при внесении изменений в БД не должно осуществляться коррекции и удаления информации, допускается только дополнение;

– должен быть предусмотрен регламент автоматического копирования информации из БД на внешние носители;

– система управления базой данных должна иметь список пользователей с разграничением прав доступа;

– при ведении журнала событий должны фиксироваться внесенные в БД изменения с привязкой к системному времени.

Лингвистическое обеспечение ИВК ИСМУЭ ФКС, как совокупность языковых средств и правил формализации естественного языка, в целях удобства представления и повышения эффективности машинной обработки информации должно удовлетворять потребностям пользователей в языковых средствах в интересах поддержки автоматизированного выполнения функций. Диагностические сообщения системы, сообщения системы о несанкционированных действиях пользователей и сообщения системы при запуске, при решении задач специального программного обеспечения и при работе пользователей с информационным обеспечением являются унифицированными.

Основной функционал ИВК реализуется программным обеспечением, которое исполняется на серверах системы сбора данных телеметрии и телеметрических приложений.

Программное обеспечение ИСМУЭ ФКС должно быть достаточным для выполнения всех функций ИСМУЭ ФКС, реализуемых с применением средств вычислительной техники, а также должно иметь средства организации всех требуемых процессов обработки данных, позволяющих своевременно выполнять все автоматизированные функции во всех регламентированных режимах функционирования ИСМУЭ ФКС.

Программные средства ИВК ИСМУЭ ФКС включают в себя

– системное программное обеспечение, в том числе операционную систему, а также сетевое ПО, позволяющее функционировать вычислительному комплексу в составе ЛВС;

– систему управления базами данных (СУБД);

– программное обеспечение СОЕВ;

– программные модули, осуществляющие сбор, контроль полноты и достоверности результатов измерений.

Состав серверов, количество и производительность процессоров в каждом из серверов соответствуют требованиям прикладных систем. Каждый серверный модуль оснащен двухпортовым адаптером Gigabit Ethernet (скорость интерфейса – 1 Гбит/с) с поддержкой технологии TCP/IP Offload Engine. Каждый серверный модуль оснащен интегрированным портом удаленного управления.

При организации каналов связи между элементами ИСМУЭ ФКС должно учитываться, что передача результатов измерений, данных о состоянии объектов и средств измерений возможна как в режимах автоматической передачи данных, так и в режиме выполнения запроса «по требованию». Также требуется обеспечить резервирование каналов, основные и резервные каналы связи должны быть разделены как на физическом, так и на логическом уровне. При выборе канала связи руководствуются несколькими критериями: производительность, надежность, доступность, стоимость организации и обслуживания. При оценке производительности необходимо учитывать задержки, которые возникают в каналах связи.

Основным стеком протоколов на всех уровнях ИСМУЭ ФКС является стек TCP/IP, что обеспечивает следующие преимущества:

– массовость (стек реализован в большинстве сетевых устройств);

– заложенная в самом протоколе иерархичность;

– возможность одновременного функционирования на одном устройстве нескольких сетевых процессов;

– унификация доступа к устройствам и простота администрирования (система администрируется на уровне самих сервисов);

– простота реконфигурирования, масштабирования с сохранением целостности системы (соответствие структуре «доступ – распределение – ядро»).

Следует отметить, что реализация и оптимизация IP-сервисов в ИСМУЭ ФКС выполняются в следующих основных направлениях:

выявление критериев для оптимизации и создание имитационной модели IP-сети, адаптированной под требования системы;

анализ и корректировка таких характеристик, как, например, задержка данных, особенно в поточном режиме работы (real-time);

разработка правил (методик) тонкой настройки сервисов, учитывающих специфику системы (предэксплуатационная наладка системы);

анализ и возможность реконфигурации нагрузки сети, в том числе автоматическое управление трафиком;

рассмотрение возможности использования каналов системы не только для передачи измерений (рациональное встраивание ИВК ИСМУЭ ФКС в уже существующую инфраструктуру).

Для внутрисистемного информационного обмена используются открытые стандартные протоколы, которые обеспечивают

– функциональную полноту и корректность реализации функций;

– совместимость систем и аппаратуры различных поставщиков;

– возможность объективного независимого тестирования реализации протокола;

– на физическом уровне используется интерфейс Ethernet.

В таблице 1 представлены используемые для сетевого взаимодействия ИВКЭ и ИВК протоколы и порты стека протоколов TCP/IP.

Технологическое оборудование каждой подстанции формирует постоянный во времени поток технологических данных, который отправляется к ИВК с постоянной скоростью до 50 кбит/с (исходящий поток). Кроме того, эпизодически (асинхронно со скоростью не более 10 кбит/с в обе стороны) осуществляется обоюдный обмен служебными данными между ИВКЭ и ИВК (например, передача команд на калибровку оборудования и т. п.).

Таблица 1 – Протоколы обмена данными и служебной информацией

Порт	Протокол	Примечание
20, 21	FTP	Передача данных и команд FTP
80, 8080	HTTP	Протокол HTTP
443	HTTPS	HTTP с шифрованием по SSL
25	SMTP	Протоколы электронной почты
143	IMAP	Протоколы электронной почты
110	POP3	Протоколы электронной почты
161	SNMP	Служба SNMP
23	Telnet	Системная служба Telnet
123	NTP, SNTP	Служба времени
9200-9210	–	Специализированные протоколы обмена данными системы

Необходимая пропускная способность каналов от каждой подстанции до ИВК составляет не более 80 кбит/с (исходящий поток) и не более 10 кбит/с (входящий поток), а со стороны верхнего уровня – не более 100 кбит/с (исходящий поток) и не более 800 кбит/с (входящий поток). Предполагаемые объемы передаваемых данных за секунду, час, сутки, месяц приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Предполагаемые объемы передаваемых данных

Источник, направление	за с, кбайт	за час, Мбайт	за сутки, Мбайт	за месяц, Мбайт
От подстанции	10	36	864	26784
К подстанции	1,25	4,5	108	3348
От ИВК	12,5	45	1080	33480
К ИВК	100	360	8640	267840

В качестве основного канала передачи данных системы выбрана система передачи данных ОАО «РЖД».

Маршрутизаторы доступа ИВК обеспечивают обслуживание внутренней технологической сети передачи данных системы с одной стороны и подключение к СПД с другой стороны. Таким образом, формируются несколько точек подключения к СПД со стороны подстанций и одна точка подключения к СПД со стороны ИВК.

Протоколы и порты TCP для реализации специализированных протоколов обмена данными системы могут быть скорректированы на стадии подключения к СПД по согласованию со службой информатизации дороги.

Обеспечение информационной безопасности в системе осуществляется за счет следующих организационных и технических мер:

трафик данных, формируемый в системе, может быть локализован в рамках отдельного вилана (VLAN);

оборудование ИВКЭ и ИВК размещается в закрытых коммуникационных шкафах, которые расположены в помещениях с ограниченным доступом;

на сетевом оборудовании ИВКЭ и ИВК, а также в серверах ИВК используются средства информационной безопасности (фаервол) и антивирусной защиты;

доступ к программным средствам осуществляется исключительно средствами аутентификации пользователей в соответствии со списком лиц, допущенных для обслуживания и пользования элементами системы.

Предложенная информационная система оперативного контроля параметров электроэнергии в сети тягового электроснабжения внедрена в опытную эксплуатацию на полигоне Свердловской железной дороге и явилась первым шагом для реализации системы контроля электроснабжения в тяговой сети. Следующим шагом является расширение информационной системы с целью учета электроэнергии на подвижном составе и интеграция ее в ИСМУЭ ФКС.

Список литературы

1. Измерение расхода энергии на электроподвижном составе. Экологические системы, 2003. – № 11,

2. Давыдов, Б. И. Об измерении потерь энергии в контактной сети [Текст] / Вестник ВНИИЖТа / Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта». – М., 2007. – № 1. – С. 42 – 44.

3. Grobler M. Determining transmission line parameters from time-stamped data / Ph. D. thesis. University of Pretoria, July, 2007.

4. Интегрированная автоматизированная система для тяговой подстанции [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.tmc.ru/sistemy_i_reshenija /reshenija/transport/ zheleznodorozhnyj_transport/integriro vannaja_avtomatizirovannaja_sistema_dlja_/

5. Система взаимодействия с локомотивом [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.trans-ip.ru/svltr.html

6. Черемисин, В. Т. Единая автоматизированная система учета электроэнергии на электроподвижном составе (ЕАСУЭ ЭПС) постоянного тока [Текст] / В. Т. Черемисин, С. Ю. Ушаков, А. Л. Каштанов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2013. – № 3. – С. 108 – 113.

7. Черемисин, В. Т. Автоматизированный мониторинг энергетической эффективности работы электропдвижного состава ОАО «РЖД» [Текст] / В. Т. Черемисин, Д. В. Пашков, С. Ю. Ушаков // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2014. – № 3. – С. 87 – 91.

8. Ожегов, А. Н. Системы АСКУЭ: Учебное пособие [Текст] / А. Н. Ожегов / Вятский гос. ун-т. – Киров, 2006. – 102 с.

9. Измерение.RU-Системы АСКУЭ (АИИС) для рынка электроэнергии. Счетчики электроэнергии, воды и тепла [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.izmerenie.ru/

10. Никифоров, М. М. Принципы построения систем учета электроэнергии на фидерах контактной сети постоянного тока [Текст] / М. М. Никифоров, А. С. Окишев, С. Н. Чижма // Электрификация и развитие инфраструктуры энергообеспечения тяги поездов скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта: Тезисы докладов седьмого междунар. симпозиума «Eltrans’2013» / Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – СПб, 2013. – С. 74 – 79.

11. Система учета электроэнергии на фидерах контактной сети [Текст] / С. Н. Чижма, А. С. Окишев и др. // Информационные и управляющие системы на транспорте и в промышленности: Материалы всерос. науч.-техн. интернет-конференции с международным участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2014. – С. 179 – 184.

12. Применение систем синхронизации времени в сетях электроснабжения железнодорожного транспорта [Текст] / С. Н. Чижма, Ю. В. Кондратьев и др. // Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2011. – С. 263 – 266.

References

1. Izmerenie pashoda elektroenepgii na elektropodvizhnom sostave [Measurement of energy consumption in electric rolling stock]. *Ekologicheskie sistemy – Ecological system*, 2003, no. 11.

2. Davydov B. I. Ob izmerenii poter energii v kontaktnoy seti [About the measurement of energy losses in catenary]. *Vestnik VNIIZHT – Bulletin VNIIZHT*, 2007, no. 1, p. 42 – 44.

3. Grobler M. Determining transmission line parameters from time-stamped data. Ph. D. thesis. University of Pretoria, July, 2007

4. *Integrirovannaya avmatizirovannaya sistema dlya tyagovoy podstantcii* **[**Integrated automated system for traction substation**].** Available at http://www.tmc.ru/sistemy_i_ reshenija/ reshenija/transport/ zheleznodorozhnyj_transport/integriro vannaja_ avtomatizirovannaja_sistema_dlja_/ (accessed 1 May 2015).

5. *Sistema vzaimodeystvia s lokomotivom* [The system of interaction with the locomotive]. Available at http://www.trans-ip.ru/svltr.html (accessed 1 May 2015).

6. Cheremisin V. T., Ushakov S. U., Kashtanov A. L. Edinaya avtomatizirovannaya sistema ucheta elektroenergii na elektropodvizhnom sostave (EASUE EPS) postoyannogo toka [The uniform automated system of electricity metering in electric rolling stock (EASA EPS) DC]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2013, no. 3, pp. 108 – 113.

7. Cheremisin V. T., Pashkov D. V., Ushakov S. U. Avtomatizirovannyy monitoring energeticheskoy effektivnosti raboty elektropdvizhnogo sostava OAO «RZhD» [Automated monitoring of energy efficiency ehlektropodvizhnogo of the JSC «RZD»]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2014, no. 3, pp. 87 – 91.

8. Ozhegov A. N. *Sistemy ASKUE: Uchebnoe posobie* (AMR system: study guide). Kirov: ViatSU, 2006, 102 p.

9. *Sistemy ASKUE (AIIS) dlia rynka elektroenergii. Shetchiki elektroenergii, vody, tepla* [AMR system (AIIS) for the electricity market. Electricity meters, water and heat] / The Company «Elster Metronica»: Available at http://www.izmerenie.ru/ (accessed 1 May 2015).

10. Nikiforov M. M., Okishev A. S., Chizhma S. N. Printcipy postroenia system ucheta elektroenergii na fiderah kontaktnoy seti postoyannogo toka [Principles of electric power metering systems at feeder catenary DC]. *Elektrifikatcia i razvitie infrastruktury energoobespechenia tyagi poezdov skorostnogo i vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta: Tezisy dokladov sedmogo mezhdunarodnogo simpoziuma «Eltrans'2013»* (Electrification and infrastructure development of traction power supply high-speed trains and high speed rail: Abstracts of the Seventh international Symposium «Eltrans'2013»). Sankt-Petersburg, 2013, pp. 74 – 79.

11. Chizhma S. N., Okishev A. S., Lavruhin A. A., Kildibekov A. B. Sistema ucheta elektroenergii na fiderah kontaktnoi seti [The metering system on the catenary feeders]. *Informatcionnye i upravlyauchie sistemy na transporte i v promyshlennosty: materialy vserossisiskoy nauchno-tehnicheskoy internet-konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* (Information and control systems in transport and industry: proceedings of all-Russian scientific and technical Internet-conference with international participation). Omsk, 2014, pp. 179 – 184.

12. Chizhma S. N., Kondratiev Y. V., Chriakov A. A., Onufriev A. S. Primenenie system sinhronizacii v setiah elektrosnabzhenia zheleznodorozhnogo transporta [Application of systems time synchronization in power networks of the railway transport]. *Innovatcionnye proekty i novye tehnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte: materialy nauchno-prakticheskoy konferecii* [Innovative projects and new technologies in education, industry and transport: materials of scientific-practical conference]. Omsk, 2011. pp. 263 – 266.

УДК 625.143

Н. И. Карпущенко, А. В. Быстров, П. С. Труханов

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РЕЛЬСОВ, ИМЕЮЩИХ КОРРОЗИОННО-УСТАЛОСТНЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ

Представлены данные о коррозионно-усталостных повреждениях подошвы рельсов (дефект 69) на железных дорогах России. Установлено, что причиной изломов рельсов по дефекту 69 является коррозионная усталость, возникающая в результате увлажнения подошвы в зоне контакта с подрельсовой прокладкой в сочетании с высоким уровнем растягивающих напряжений в подошве рельса. Анализ статистических данных об отказах рельсов по дефекту 69 в Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры показал, что интенсивность отказов растет до наработки тоннажа 800 млн т брутто и носит усталостный характер. На участках пути со сложным планом и профилем интенсивность отказов в три – четыре раза выше, чем на спокойном Транссибирском ходу. Показаны итоги анализа данных и предложены меры по повышению надежности рельсовых плетей, имеющих склонность к образованию дефектов по коду 69.

1. Общие положения.

Коррозионные повреждения подошвы рельсов (дефект 69) особенно опасны, потому что современные дефектоскопы даже при нормальной работе могут обнаруживать только те трещины, которые развиваются в средней части подошвы в зоне проекции шейки (рисунок 1). Испытания показали, что каверны глубиной 1,5 – 1,8 мм понижают усталостную прочность рельсов в несколько раз [1]. В связи с этим рельсы с глубиной каверн более 1,5 – 2,0 мм следует заменить и отремонтировать. Подобный дефект имеется в каталогах дефектов рельсов других стран [2].

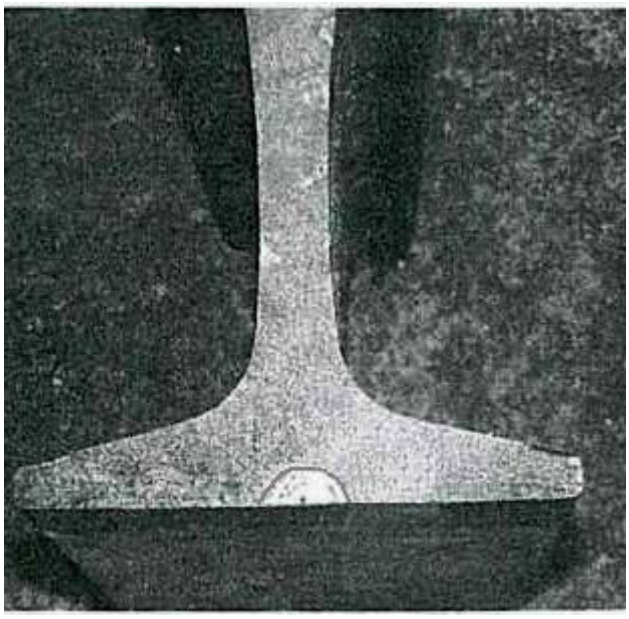


Рисунок 1 – Поперечный излом рельса вследствие образования в подошве коррозионно-усталостной трещины от коррозионной каверны на нижней поверхности подошвы рельса

2. Анализ причин изломов рельсов по дефекту 69.

В настоящее время на сети железных дорог России более 200 рельсов в год выходят из строя по дефекту 69, существенная часть из них ломается под колесами поездов [1]. По отношению к общему числу дефектных и остродефектных рельсов, ежегодно изымаемых из пути в одиночном порядке по всем причинам, доля дефектов 69 невелика – 2 %. Однако если рассматривать только случаи излома рельсов под поездами, исключив рельсы, обнаруженные средствами дефектоскопии до излома, то картина резко меняется. В связи с объективными трудностями по выявлению дефекта 69 в начальной стадии путем дефектоскопирования доля пораженных им рельсов доходит до 20 – 30 %. В настоящее время на ряде участков этот дефект стал основной причиной разрушений рельсов под колесами поездов. Задача предотвращения излома рельсов по дефекту 69 продолжает оставаться актуальной с точки зрения обеспечения безопасности движения поездов.

Повреждаемость дефектом 69 на железных дорогах России может расти и в дальнейшем. Это связано как с увеличением протяженности полигона бесстыкового пути, так и с ростом средней наработки рельсов, лежащих в пути. Последнее определяется уменьшением объемов капитальных ремонтов пути и поставок новых рельсов, а также проведением ряда мероприятий, направленных на предотвращение раннего выхода из строя рельсов в результате износа и контактной усталости.

Вероятность образования дефекта 69 заметно увеличивается с ростом наработки рельсов. До пропуска по рельсам 200 – 300 млн т груза такие изломы практически не возникают, до 300 – 400 млн т груза их мало. Основная доля изломов по дефекту 69 приходится на рельсы, по которым прошло более 400 млн т груза. Максимальное количество рельсов, вышедших из строя по дефекту 69 в 1994 – 1996 гг., приходится на рельсы со сроком службы 10 –12 лет, пропустившие 500 – 900 млн т груза [1].

Причиной излома рельсов по дефекту 69 является коррозионная усталость, возникающая в результате длительного увлажнения подошвы в зоне контакта с подрельсовой прокладкой в сочетании с высоким уровнем напряжений (рабочих и остаточных).

Конструкция, размеры и материал (резина, особенно резинокорд) подрельсовых прокладок не обеспечивают сухость поверхности подошвы рельсов: на ней сохраняется влага. Гигроскопичность резины и образующийся в результате щелевой коррозии слой гигроскопичных продуктов коррозии также способствуют увеличению длительности увлажнения подошвы.

Увеличение осевой нагрузки несомненно влияет на рост вероятности появления дефекта 69, так как она увеличивает растягивающие напряжения в подошве рельса [3]. Растягивающие остаточные напряжения, образующиеся в процессе изготовления рельсов, особенно при таких операциях, как закалка и холодная правка на роликоправильных машинах, доходят у объемно-закаленных рельсов типа Р65 до 2000 – 2500 кгс/см^2. Суммируясь с рабочими растягивающими напряжениями в подошве рельса и изменяя в неблагоприятную сторону коэффициент асимметрии цикла R, остаточные напряжения существенно снижают в средней части подошвы сопротивление образованию поперечных коррозионно-усталостных трещин, их развитию и переходу в полный долом всего поперечного сечения.

Роль этих напряжений в образовании усталостных трещин весьма велика, поскольку они соизмеримы с действующими здесь рабочими напряжениями. Значительное снижение их в средней части подошвы рельсов кардинально повысит долговечность рельсов или полностью исключит образование усталостных трещин в подошве. Достичь этого можно, создав специальные термоупрочненные рельсы, обладающие повышенной стойкостью к коррозионной усталости подошвы.

3. Анализ статистических данных отказов рельсов по дефекту 69 в Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры ОАО «РЖД».

Для проведения анализа были получены данные по выходу рельсов по коду 69 за шесть лет – с 2008 по 2014 г. включительно. По этим данным составлена сводная таблица, в которую внесли следующие параметры: дата и место обнаружения, характеристика дефектного рельса, пропущенный тоннаж. Данные этой таблицы сгруппированы по трем эксплуатационным направлениям и приведены в таблице 1: Транссибирскому протяженностью 1097 км с грузонапряженностью по первому пути 116 млн т брутто, по второму пути 74,6 млн т брутто. Среднесибирскому протяженностью 758 км с грузонапряженностью по первому пути 106,9 млн т брутто, по второму пути – 40,7 млн т брутто. Третье характерное направление Артышта – Укладочный протяженностью 187 км с грузонапряженностью по первому пути 111,7 млн. т брутто с осевой нагрузкой подвижного состава 200 кН. По второму пути грузонапряженность составила 37,4 млн т брутто с осевой нагрузкой 70 кН/ось.

Графическое изображение данных таблицы 1 представлены на рисунках 2 и 3. Анализ данных отказов рельсов по дефекту 69 показал, что интенсивность их по первому пути, где более высокие грузонапряженность и осевые нагрузки, в целом на 29 % выше. Отказы носят усталостный характер и до наработки тоннажа 800 млн т брутто увеличиваются. При более высокой наработке тоннажа численность отказов снижается из-за уменьшения в пути рельсов с такой наработкой.

На Среднесибирской магистрали (см. рисунок 3) картина более сложная из-за того, что на втором, менее нагруженном пути лежат переложенные старогодные рельсы. В целом интенсивность отказов рельсов по дефекту 69 в 1,44 раза выше, чем на Транссибирской магистрали.

На третьем эксплуатационном направлении Укладочный – Артышта кроме высокой грузонапряженности и высоких осевых нагрузок по первому пути имеет место сложный план с кривыми радиусом до 300 м и профиль с уклонами крутизной до 15 ‰. Интенсивность отказов здесь по первому пути в 3 раза выше, чем по второму, где грузонапряженность и осевые нагрузки в три раза ниже.

Если учесть, что протяженность участка Укладочный – Артышта составляет всего 17 % от протяженности Транссиба в пределах Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры, то интенсивность отказов их по 69 дефекту в целом здесь оказалась в четыре раза выше.

Таблица 1 – Данные об отказах рельсов по эксплуатационным направлениям

Эксплуатационное направление	Путь	Пропущенный тоннаж, при котором произошел отказ рельсов					
		0 – 200	201 – 400	401 – 600	601 – 800	801 – 1000	1001 – 1200
Транссибирское	1	1	2	4	6	3	2
	2	1	2	1	3	3	5
Среднесибирское	1	3		1	5	6	
	2	5	5	2		3	
Артышта – Укладочный	1		9	2	6	1	
	2		2		2		

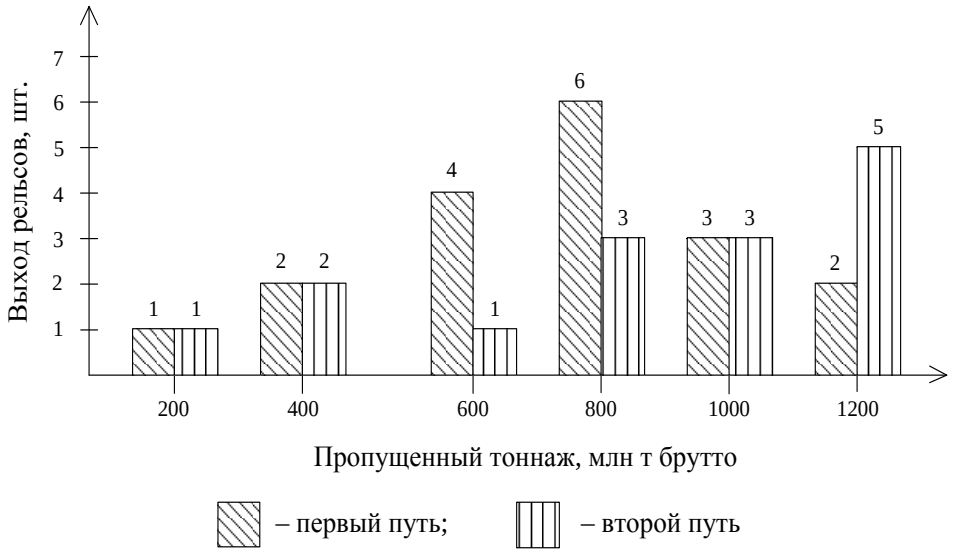


Рисунок 2 – Отказы рельсов по дефекту 69 на путях Транссибирской магистрали

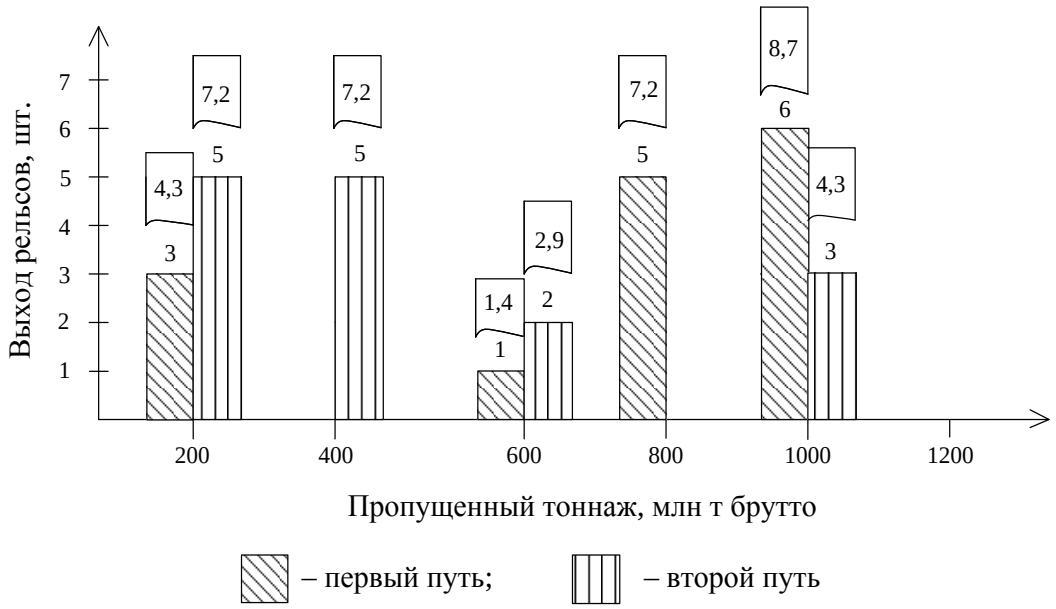


Рисунок 3 – Отказы рельсов по дефекту 69 на путях Среднесибирской магистрали

4. Содержание рельсовых плетей с дефектом 69.

Усталостная природа дефекта 69 свидетельствует о том, что наиболее эффективно воздействовать на него можно, снижая напряжения, действующие в месте возникновения усталостной трещины.

Уменьшение напряжений благоприятно на любых стадиях усталостного разрушения. Если на протяжении всего периода эксплуатации обеспечить напряжения в подошве ниже предела выносливости, то усталостная трещина просто не возникнет. В том случае, когда до момента зарождения усталостной трещины уровень напряжений невысок, но все же превышает предел выносливости, момент зарождения усталостных трещин отдалится. При этом достигается существенный выигрыш в долговечности рельсов – их выход по дефекту 69 будет происходить при большем пропущенном тоннаже. Однако следует помнить о том, что образование дефекта 69 – явление достаточно редкое, а снижение уровня напряжений по всей длине рельсов – достаточно дорогое мероприятие.

Более приемлемо снижать напряжения в том сечении рельса, где путем прецизионного дефектоскопирования обнаружена усталостная трещина в подошве (дефект 69) докритического размера. Опыт дефектоскопистов свидетельствует о том, что если эти трещины находятся в проекции шейки, то обнаружить их вполне возможно. После обнаружения трещины в подошве можно, установив в данном месте накладки, существенно снизить уровень растягивающих напряжений от изгиба. Шестидырные накладки устанавливают на четырех крайних болтах, чтобы не ослаблять болтовыми отверстиями сечение, близкое к плоскости трещины.

Необходимо также продолжить совершенствование подрельсовых прокладок. Конструкция, размеры и материал большинства из них пока не обеспечивают полной сухости поверхности подошвы рельсов даже в сухое время года.

Замена рельсовой плети на новую, несомненно, является наиболее кардинальной мерой по исключению дефекта 69, имеющего усталостную природу. Очень важно наладить четкий учет числа дефектов 69 в каждой рельсовой плети нарастающим итогом и после образования трех – пяти таких дефектов заменять плеть на новую.

Таким образом, основными можно считать следующие действия, направленные на предотвращение образования дефекта 69:

в рамках текущего содержания пути – переход на более совершенные подрельсовые прокладки;

установка накладок на участки рельсов с обнаруженным дефектом 69 и последующий перевод его в дефект 69Н, при котором возможно движение поездов без ограничения скорости;

замена рельсовой плети на новую после образования трех – пяти дефектов 69, при этом следует наладить четкий учет дефектов;

в рамках перспективного производства рельсов – переход на выпуск рельсов новой категории – стойких к коррозионной усталости с контролируемыми низкими внутренними остаточными напряжениями в подошве.

Список литературы

1. Шур, Е. А. Повреждение рельсов [Текст] / Е. А. Шур. – М.: Интекст, 2012. – 192 с.

2. UJC Catalogue of Rail Defects-2001 edition «Handbook of Rail Defects – UJC Cod 712R». 2001. – 108 p.

3. Карпущенко, Н. И. Обеспечение надежности железнодорожного пути и безопасности движения поездов [Текст] / Н. И. Карпущенко, Д. В. Величко / Сибирский гос. ун-т путей сообщения. – Новосибирск, 2008. – 321 с.

References

1. Schur E. A. *Povrejdenie relsov* (Damage of rails). Moscow: Intext, 2012, 192 p.

2. UJC Catalogue of Rail Defects – 2001 edition «Handbook of Rail Defects – UJC Cod 712R». 2001. – 108 p.

3. Karpuschenko N. I., Velichko D. V. *Obespechenie nadejnosti jeleznodorojnogo puti i bezopasnosti dvijeniya poezdov* (Ensuring reliability of a railway track and traffic safety of trains). Novosibirsk, 2008, 321 p.

УДК 625.144.5: 625.173.2/5

С. В. Базилевич, А. В. Зайцев, С. М. Кузнецов

МОДЕЛИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВЫПРАВОЧНО-ПОДБИВОЧНО-РИХТОВОЧНЫХ МАШИН ВПР-02 И ВПРС-02

Приводится алгоритм построения доверительного интервала модели оценки надежности работы выправочно-подбивочно-рихтовочных машин. В основу оценки надежности транспортно-технологического процесса положено понятие надежности, как вероятности достижения выправочно-подбивочно-рихтовочных машин конечной цели при производстве путевых работ. Одними из основных факторов надежности работы путевых машин являются коэффициент использования их по времени и коэффициент готовности к работе. В методических указаниях приводятся устаревшие данные по коэффициентам использования машин в течение рабочего времени, которые требуют обновления, так как машины постоянно совершенствуются. По результатам натурных испытаний выправочно-подбивочно-рихтовочных машин была создана база данных значений коэффициентов готовности и коэффициентов использования по времени. В базу данных заносились значения, прошедшие два этапа проверки: логический и математический.

В статье рассмотрен пример построения доверительного интервала значений коэффициента использования по времени в зависимости от комплексного показателя надежности коэффициента готовности. Для создания модели формировалась выборка значений из базы данных. После формирования выборки в соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011 (Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений) проверялась ее принадлежность закону нормального распределения с помощью критерия согласия Пирсона. Далее строились модель коэффициента использования по времени в зависимости от коэффициента готовности выправочно-подбивочно-рихтовочных машин (уравнение регрессии) и доверительный интервал модели.

Предложенные модели работы выправочно-подбивочно-рихтовочных машин позволяют прогнозировать основные комплексные организационно-технологические показатели работы конкретной машины еще на стадии проектирования технологических процессов путевых работ. Этот метод является универсальным, и его можно использовать для оценки технической надежности любых машинных систем, комплектов и отдельных машин.

Создание информационных баз натурных испытаний, технических и экономических показателей машин, комплектов и систем способствует оптимизации их работы с заданной надежностью при строительстве, ремонте и текущем содержании пути [1 – 10].

Цель:

– установление закона распределения случайных величин выборок результатов натурных испытаний [3, 9];

– построение многофакторных математических моделей [2, 7];

– построение доверительных интервалов математических моделей [2, 9].

Задачи:

– создание баз данных по результатам натурных испытаний [1];

– обработка результатов натурных испытаний [6, 10];

– построение моделей показателей натурных испытаний [2 – 4];

– формирование выборок остатков моделей и построение гистограмм плотности распределения остатков [2, 4];

– построение доверительных интервалов моделей показателей натурных испытаний [2, 9].

После создания баз данных по результатам итогов эксплуатации за период с 2001 по 2012 г. проведена логическая и математическая проверка испытаний [6, 10]. При статистической обработке выборок установлено, что все они подчиняются закону нормального распределения. Следующий этап исследования – построение регрессионных уравнений (многофакторных математических моделей) с помощью шагового регрессионного метода.

С помощью программы Modell строится вектор ошибок и проверяется соответствие его закону нормального распределения, что является необходимым условием для использования критериев t и F при получении доверительных интервалов [4].

В программе «Modell» остатки определяются как n разностей $e_i = Y_i + \check{Y}$, $i = 1, 2, \ldots, n$, где Y_i – наблюдаемая величина, а $\check{Y}$ – соответствующая прогнозируемая величина, получаемая при помощи найденного уравнения регрессии. Остатки e_t есть разности между тем, что фактически наблюдалось, и тем, что предполагается на основе регрессионного уравнения. Иными словами – это величины, которые нельзя объяснить с помощью регрессионного уравнения. Таким образом, можно считать, что e_t – наблюдаемые проявления ошибок, если модель правильна. При проведении регрессионного анализа предполагается, что вектор ошибок является независимым, имеющим среднюю величину, равную нулю, постоянную дисперсию σ_2 и подчиняющимся закону нормального распределения. Последнее предположение необходимо для применения F-критерия. Таким образом, если построенная модель правильна, то остатки будут проявлять тенденцию к подтверждению сделанных предположений или, по меньшей мере, не будут противоречить им. Эта идея лежит в основе исследования остатков. После исследования остатков следует сделать вывод о правильности предположений. Способы исследования остатков для проверки модели имеют графический характер и легко выполнимы [2].

Выбросом среди остатков называется остаток, который по абсолютной величине значительно превосходит остальные и отличается от среднего по остаткам на три, четыре или даже более стандартных отклонений. Выброс означает определенную особенность и показывает экспериментальную точку, которая совсем не типична по отношению к остальным данным. Отсюда следует, что выброс должен подвергаться особо тщательному исследованию с целью выяснения причин его возникновения [2].

В программе Modell предусмотрено автоматическое исключение выбросов. Следует отметить, что это не всегда наиболее целесообразная процедура. Общее правило таково: выбросы должны исключаться сразу, если только выяснится, что они вызваны такими причинами, как ошибки в регистрации результатов наблюдений или в настройке аппаратуры. В противном случае требуется тщательное исследование.

Регрессионное уравнение (модель) коэффициента использования по времени путевых машин ВПР-02, ВПРС-02 Кв в зависимости от времени их работы Тр, продолжительности технологических перерывов Ттп и продолжительности простоев машин $T_{\text{п}}$:

$$K_{\text{в}} = +0{,}0033 + 0{,}0040445T_{\text{р}} - 0{,}0000108T_{\text{тп}} + 0{,}0000008\text{Т}_{\text{п}}. \quad (1)$$

В таблице 1 приведена значимость факторов модели (3), определенная по уравнению (1).

Таблица 1 – Значимость факторов модели коэффициента использования по времени путевых машин ВПР- 02, ВПРС-02

Фактор	Значимость фактора, %
Время работы $T_{\text{р}}$	99,97
Продолжительность технологических перерывов $T_{\text{т.п}}$	0,02
Продолжительности простоев $T_{\text{п}}$	0,01

Значимость факторов модели календарного фонда времени работы путевых машин ВПР-02, ВПРС-02 $T_{\text{ф}}$ от времени их перебазировки и отсутствия фронта работ $T_{\text{пб}}$ составляет 44,37 %, от времени работы $T_{\text{р}}$ – 40,05 %, от продолжительности технологических перерывов $T_{\text{т.п}}$ – 3,63 % и от продолжительности простоев $T_{\text{п}}$ – 11,95 %.

В таблице 2 приведены характеристики моделей коэффициента использования по времени путевых машин ВПР-02, ВПРС-02 $К_{\text{в}}$ и календарного фонда времени их работы $T_{\text{р}}$.

Таблица 2 – Характеристики многофакторных математических моделей

Показатель	$K_{\text{в}}$	$T_{\text{р}}$
Доля объясненной вариации, %	95,89	100,00000
Коэффициент множественной корреляции	0,9792	1,00000
Средний отклик	0,4006	245,33333
Стандартная ошибка, % от среднего отклика	1,56	0,00

Окончание таблицы 2.

Показатель	$K_в$	$T_р$
Стандартная ошибка	0,00623	0,00000
Общий *F*-критерий регрессии	10051,4	3907387707
Табличное значение общего *F*-критерия	3,82	3,82

В таблице 3 приведены модели и их характеристики для коэффициентов использования по времени в зависимости от коэффициентов готовности $K_г$, коэффициентов технического использования $K_{т.и}$ и коэффициентов эффективности $K_э$.

Таблица 3 – Параметры моделей коэффициента использования по времени

Показатель	$K_в = 0,1153 + 0,3958K_г$	$K_в = 0,0708 + 0,5925K_{т.и}$	$K_в = 0,0630 + 0,3699K_э$
Доля объясненной вариации, %	23,96	55,00	68,40
Коэффициент множественной корреляции	0,4897	0,7417	0,8270
Средний отклик	0,4005	0,4005	0,4005
Стандартная ошибка, % от среднего отклика	6,64	5,13	4,27
Стандартная ошибка	0,0266	0,0205	0,0171
Общий *F*-критерий регрессии	407,27	1580,64	2794,26
Табличное значение общего *F*-критерия	3,82	3,82	3,82

В таблице 4 приведены модели и их характеристики для времени работы машин $T_р$ в зависимости от коэффициента использования по времени $K_в$, коэффициентов готовности $K_г$, коэффициентов технического использования $K_{т.и}$ и коэффициентов эффективности $K_э$.

Таблица 4 – Основные характеристики многофакторных моделей

Показатель	$T_р = 3,28 + 237,09K_в$	$T_р = 27,68 + 97,903K_г$	$T_р = 21,70 + 137,56K_{т.и}$	$T_р = 19,21 + 86,57K_э$
Доля объясненной вариации, %	95,89	24,87	50,53	64,76
Коэффициент множественной корреляции	0,9792	0,4988	0,7108	0,8047
Средний отклик	98,255	98,255	98,255	98,255
Стандартная ошибка, % от среднего отклика	1,54	6,53	5,31	4,42
Стандартная ошибка	1,51	6,42	5,22	4,34
Общий *F*-критерий регрессии	30200,8	427,8	1320,5	2366,9
Табличное значение общего *F*-критерия	3,82	3,82	3,82	3,82

Построение доверительных интервалов уравнения регрессии производилось в соответствии с рекомендациями [2]. Рассмотрим эту проблему на простейшей задаче.

Пусть у нас имеется большой парк выправочно-подбивочно-рихтовочных машин с нормальным распределением некоторых характеристик (например, коэффициент использования машин по времени за месяц). Требуется знать средние характеристики коэффициента использования по времени всех машин за последний месяц, но нет ни времени, ни желания его измерять. Возникает вопрос, сколько машин надо взять на выборочную проверку для того, чтобы получить значения средних характеристик всех машин с заданной достоверностью?

Если промерить коэффициент использования по времени всех машин (это множество машин называется генеральной совокупностью), то получим со всей доступной нам точностью среднее значение коэффициента использования по времени $X_{ср.ген}$ – генеральное среднее. Нормальное распределение случайной величины определяется полностью, если известно его среднее значение и отклонение σ. Взяв некоторую выборку случайным образом и замерив нужные нам значения, получим для этой выборки: среднее значение $X_{ср.выб}$ и среднее квадратическое отклонение $S_{выб}$.

Известно, что если выборочная проверка содержит большое количество элементов (обычно n больше 30), и они взяты действительно случайным образом, то σ генеральной совокупности почти не будет отличаться от $S_{выб}$.

Тогда можно записать в общем виде оценку среднего значения генеральной совокупности с вероятностью $P(t)$

$$X_{\text{ср.ген}} = X_{\text{ср.выб}} \pm t\frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (2)$$

Значения t соответствуют заданному значению вероятности $P(t)$, с которой мы желаем знать доверительный интервал.

Таким образом, второй член в формуле (4) определяет диапазон (интервал), в котором находится среднее значение генеральной совокупности с заданной вероятностью.

Если объем выборки небольшой, оценку среднего значения генеральной совокупности вычисляют по формуле:

$$X_{\text{ср.ген}} = X_{\text{ср.выб}} \pm t\frac{S_{\text{выб}}}{\sqrt{n}}, \quad (3)$$

где значение t для фиксированной вероятности $P(t)$ зависит от количества элементов n в выборке. Чем больше n, тем ближе будет полученный доверительный интервал к значению в формуле (4).

Перейдем теперь к построению доверительных интервалов для уравнения регрессии, связывающего совокупность n пар значений X_i, Y_i i = 1, 2, n на основе метода наименьших квадратов, следуя алгоритму, изложенному в источнике [9].

Примем это выражение в виде

$$\breve{Y}_i = b_0 + b_1 X_i, \quad (4)$$

где $\breve{Y}$ – предсказанное значение $\breve{Y}$ для данного X при определенных значениях коэффициентов b_0, b_1. Минимизируя сумму квадратов отклонений $\sum_{i=1}^{i=n}(Yi - \breve{Y}_{ii})^2$ от прямой (6), получим два нормальных уравнения относительно коэффициентов b_0 и b_1, решение которых позволяет записать (6) в следующей форме:

$$\breve{Y}_i = \overline{Y} + b_1(X_i - \overline{X}), \quad (5)$$

где $\overline{X} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{i=n} X_i$, $\overline{Y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{i=n} Y_i$, $b_1 = \frac{\sum_{i=1}^{i=n}(X_i - \overline{X})(Y_i - \overline{Y})}{\sum_{i=1}^{i=n}(X_i - \overline{X})^2}$.

Как уже указывалось выше, для построения доверительного интервала, в котором содержится предсказанное значение $\breve{Y}$ по формуле (7), необходимо получить оценку его дисперсии $V(\breve{Y})$ и стандартного отклонения $\Delta\breve{Y} = \sqrt{V(\breve{Y})}$. Поскольку $\overline{Y}$ и b_1 в уравнении регрессии (7) вычисляются по ограниченной совокупности значений, содержащей случайные ошибки, то они существенно влияют на величину $\breve{Y}$. Предполагая, что Y_i и Y_j при $i \neq j$ некоррелированные величины и при этом $V(Y_i) = \sigma^2$ постоянна для всех i, приходим к выводу, что среднее арифметическое значение $\overline{Y}$ и коэффициент b_1 уравнения регрессии (7) являются некоррелированными случайными величинами. В этом случае дисперсия предсказываемого среднего значения $\breve{Y}_0$, при некотором заданном X_0, будет вычисляться по выражению:

$$V(\breve{Y}_0) = V(\overline{Y}) + (X_0 - \overline{X})^2 V(b_1) = \frac{\sigma^2}{n} + \frac{(X_0 - \overline{X})^2\sigma^2}{\sum_{i=1}^{i=n}(X_i - \overline{X})^2}, \quad (6)$$

тогда оценку стандартного отклонения получим, заменяя σ^2 на ее статистическую оценку S^2, по выражению:

$$\Delta(\breve{Y}_0) = s\sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(X_0 - \bar{X})^2}{\sum_{i=1}^{i=n}(X_i - \bar{X})^2}} \quad (7)$$

Далее, следуя рекомендациям [2] получаем оценку доверительного интервала, предсказанного по уравнению (7) индивидуального наблюдения:

$$\breve{Y}_0 \mp t(n-2{,}1-\frac{\alpha}{2})\sqrt{1+\frac{1}{n}+\frac{(X_0-\bar{X})^2}{\sum_{i=1}^{i=n}(X_i-\bar{X})^2}}s\,, \quad (8)$$

где $t(n-2{,}1-\frac{\alpha}{2})$ – это $100(1-\frac{\alpha}{2})\%$ -ная точка *t*-распределения Стьюдента с (n – 2) степенями свободы; α – уровень значимости (так 95%-ный доверительный интервал обеспечивает α = 0,05).

Для проведения простого дисперсионного анализа уравнения регрессии вычисляются следующие величины:

сумма квадратов регрессии:

$$S_r = \frac{\left\{\sum_{i=1}^{n} X_i Y_i - \left(\sum_{i=1}^{n} X_i\right)\left(\sum_{i=1}^{n} Y_i\right)\Big/ n\right\}^2}{\sum_{i=1}^{n} X_i{}^2 - (\sum_{i=1}^{n} X_i)^2 / n}; \quad (9)$$

сумма квадратов общая:

$$S_p = \sum_{i=1}^{n} Y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} Y_i\right)^2 / n\,; \quad (10)$$

сумма квадратов остатков:

$$S_S = S_p - S_r\,; \quad (11)$$

стандартное отклонение:

$$s = \sqrt{\frac{S_s}{n-2}}\,. \quad (12)$$

Изложенный подход реализован в программном пакете Diagram, который предназначен для построения графиков и доверительных интервалов уравнения регрессии.

В таблице 5 приводится результат работы программы для выборки значений коэффициентов использования по времени $K_в$ и коэффициента готовности $K_г$ земснарядов: уравнение регрессии (первые два члена) и размах доверительного интервала относительно предсказанного среднего значения $K_в$ для произвольного значения коэффициента готовности $K_г = X_0$, составленные с помощью формулы (10).

Таблица 5– Математические модели коэффициентов использования по времени и их доверительные интервалы

Модель	Доверительный интервал с уровнем риска 5 %
$K_в = 0{,}1153 + 0{,}3958К_г$	$K_в \pm 0{,}0618\sqrt{1{,}001 + 0{,}9292(K_г - 0{,}717)}$
$K_в = 0{,}0708 + 0{,}5925К_{ти}$	$K_в \pm 0{,}0427\sqrt{1{,}001 + 2{,}4532(K_{ти} - 0{,}565)}$
$K_в = 0{,}0630 + 0{,}3699К_э$	$K_в \pm 0{,}0347\sqrt{1{,}001 + 0{,}3662(K_э - 0{,}888)}$

На рисунках 1 – 3 приведены модели и доверительные интервалы коэффициента использования по времени в зависимости от коэффициентов готовности, технического использования и эффективности.

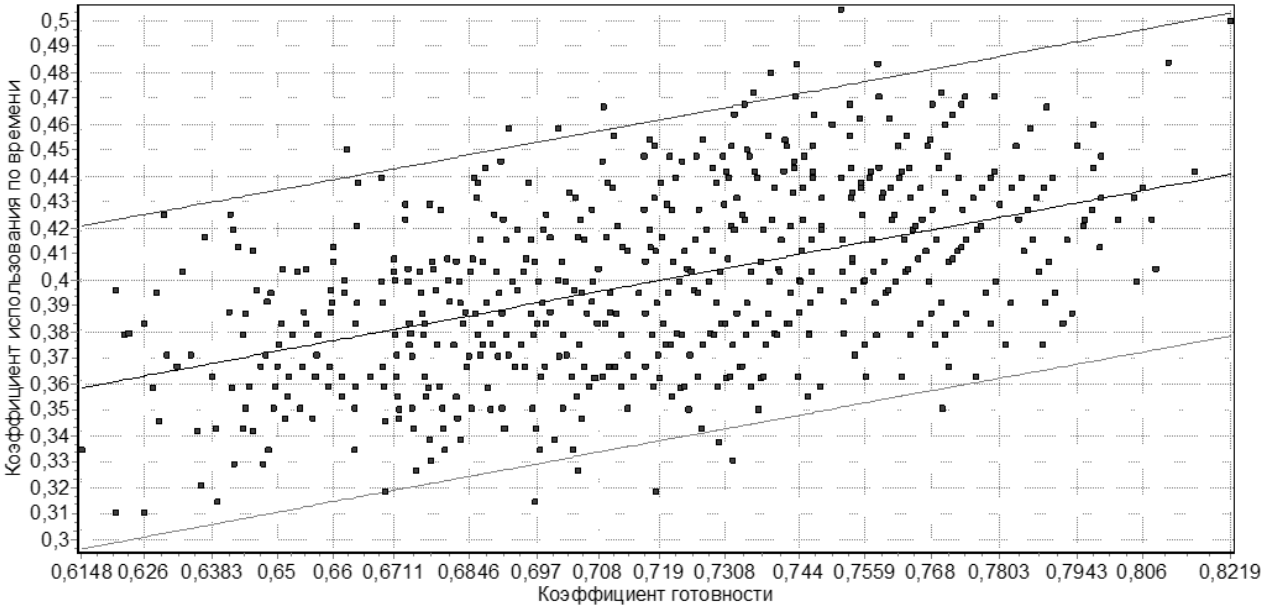


Рисунок 1 – Зависимость между коэффициентами использования по времени и готовности

В таблице 6 для моделей (см. таблицу 5) приведены доверительные интервалы с уровнем риска 5 %.

Таблица 6 – Математические модели времени работы машины и их доверительные интервалы с уровнем риска 5 %

Модель	Доверительный интервал с уровнем риска 5 %
$T_р = 3{,}28 + 237{,}09K_в$	$T_р \pm 3{,}2644\sqrt{1{,}001 + 4{,}8782(K_в - 0{,}404)}$
$T_р = 27{,}68 + 97{,}903K_г$	$T_р \pm 14{,}8886\sqrt{1{,}001 + 0{,}9292(K_г - 0{,}717)}$
$T_р = 21{,}70 + 137{,}56K_{ти}$	$T_р \pm 10{,}96357\sqrt{1{,}001 + 2{,}4532(K_{ти} - 0{,}565)}$
$T_р = 19{,}21 + 86{,}57K_э$	$T_р \pm 9{,}0241\sqrt{1{,}001 + 0{,}3662(K_э - 0{,}888)}$

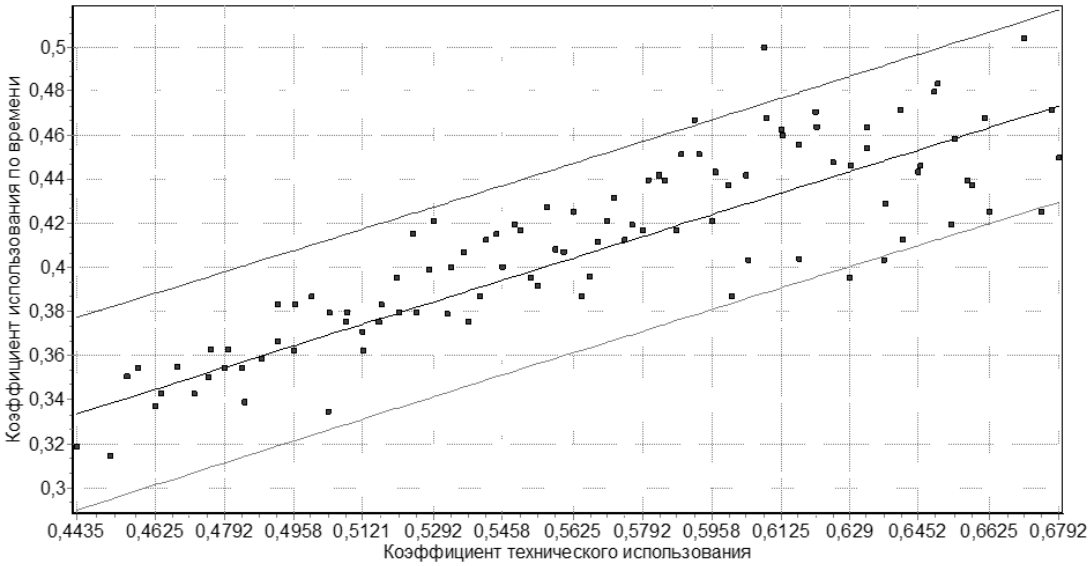


Рисунок 2 – Зависимость между коэффициентами использования по времени и технического использования

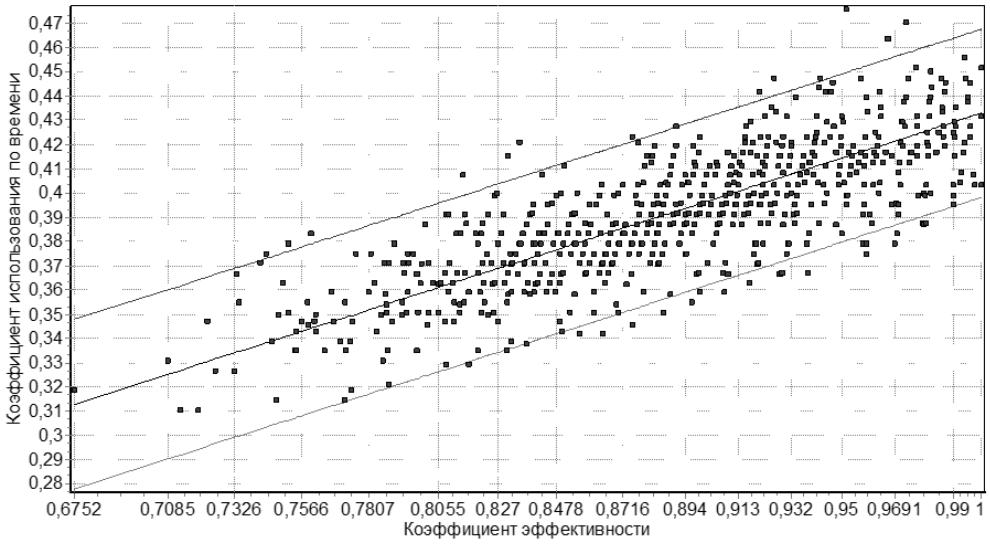


Рисунок 3 – Зависимость между коэффициентами использования по времени и эффективности

На рисунках 4 – 7 проиллюстрированы модели и доверительные интервалы времени работы машин в зависимости от коэффициентов использования по времени, готовности, технического использования и эффективности.

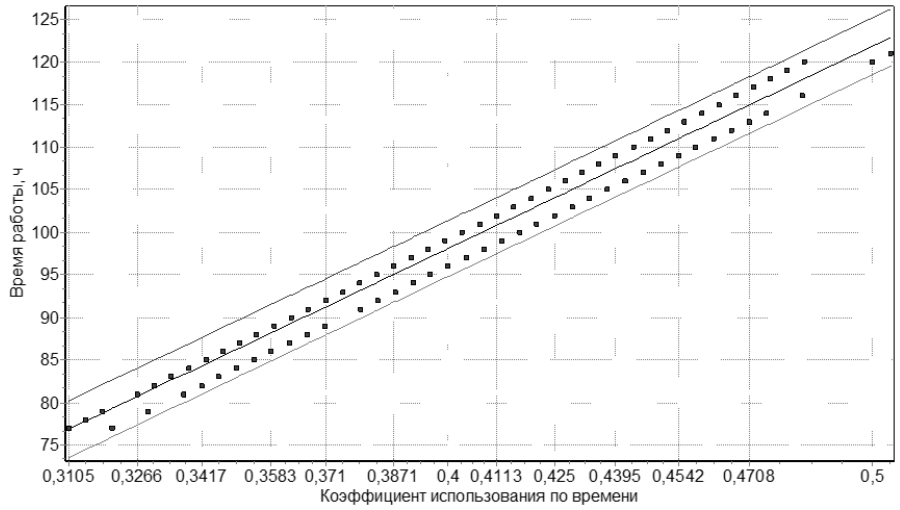


Рисунок 4 – Зависимость между временем работы машины и коэффициентом использования по времени

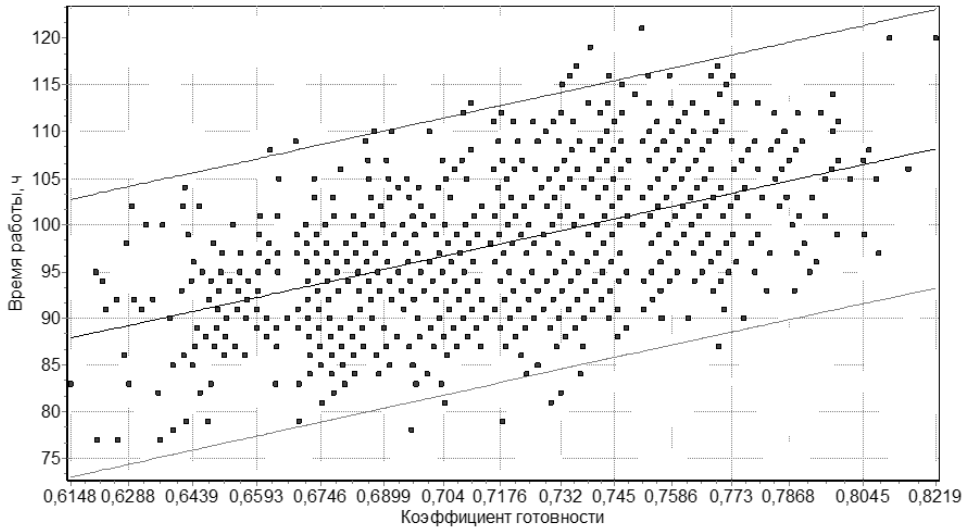


Рисунок 5 – Зависимость между временем работы машины и коэффициентом готовности

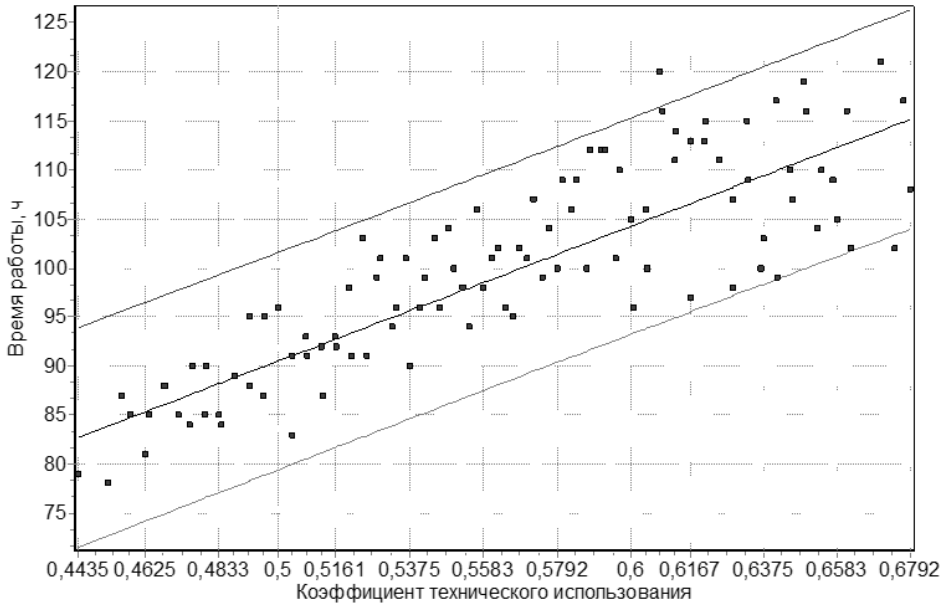


Рисунок 6 – Зависимость между временем работы машины и коэффициентом технического использования

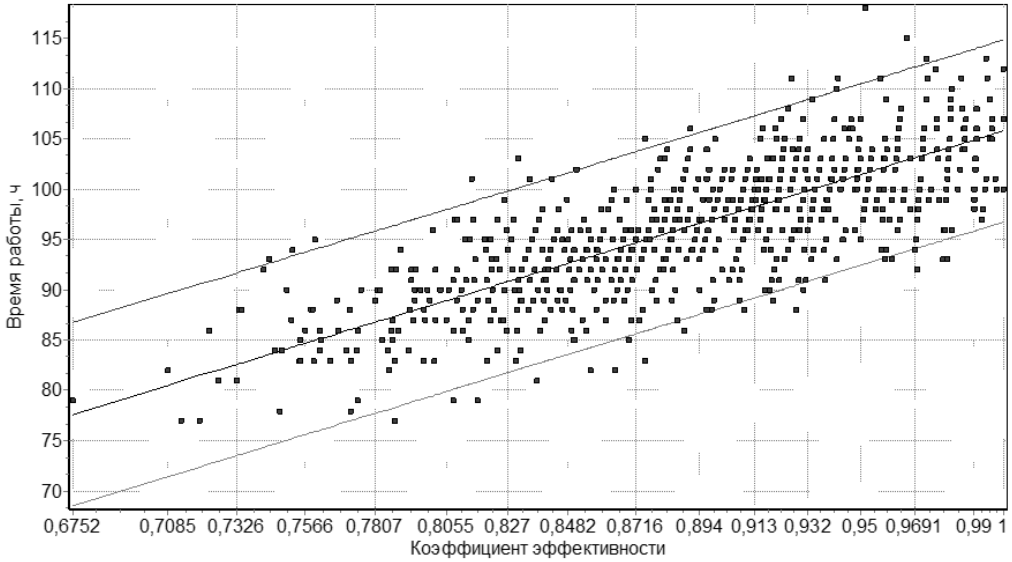


Рисунок 7 – Зависимость между временем работы машины и коэффициентом эффективности

Построены математические модели и доверительные интервалы для коэффициента использования по времени и продолжительности работы путевых машин ВПР-02, ВПРС-02.

На основании изложенного можно сделать выводы.

1. При решении конкретных задач многофакторные модели и их доверительные интервалы позволяют давать точечный и интервальный прогнозы рассматриваемых факторов.

2. Разработка моделей для обоснования надежности различных технологических процессов с применением машин ВПР-02, ВПРС-02 на основе опыта эксплуатации позволяет установить рациональную область применения машин, комплектов и систем, сократить время принятия решений при строительстве, ремонте и текущем содержании пути.

3. Многофакторные модели комплексных показателей надежности работы системы путевых машин ВПР-02, ВПРС-02, рассчитанные из опыта эксплуатации, позволяют с большей обоснованностью планировать их ритмичную работу, точнее определять время (сроки, длительность) производства работ, что сказывается на снижении стоимости и повышении качества при строительстве, ремонте и текущем содержании пути. Применение разработанных моделей позволит сократить трудоемкость расчетов на 25 – 30 %, а стоимость ремонта и текущего содержания пути соответственно сократится на 5 – 10 %.

Список литературы

1. Базилевич, С. В. Организационно-технологические показатели эксплуатации выправочно-подбивочно-рихтовочных машин циклического действия [Текст] / С. В. Базилевич, А. В. Зайцев, С. М. Кузнецов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2015. – № 2. – С. 115 – 122.

2. Дрейпер, Н. Прикладной регрессионный анализ [Текст] / Н. Дрейпер, Г. Смит. – М., 1973. –392 с.

3. Кузнецов, С. М. Автоматизация построения моделей для оптимизации организационно-технологических решений [Текст] / С. М. Кузнецов, Н. В. Холомеева, С. Э. Ольховиков // Научно-исследовательские публикации. – Воронеж. – 2014. – № 7 (11). – С. 5 – 13.

4. Кузнецов, С. М. Анализ остатков моделей организационно-технологических решений [Текст] / С. М. Кузнецов, О. В. Соболева, М. П. Шефер // Научно-исследовательские публикации. – Воронеж. – 2014. – № 7 (11). – С. 24 – 32.

5. Кузнецов, С. М. Надежность выправочно-подбивочно-рихтовочных машин [Текст] / С. М. Кузнецов, А. В. Зайцев // Путь и путевое хозяйство. – 2014. – № 3. – С. 19 – 22.

6. Кузнецов, С. М. Обработка результатов натурных испытаний при техническом и тарифном нормировании [Текст] / С. М. Кузнецов, К. С. Кузнецова // Экономика железнодорожных дорог. – 2010. – № 7. – С. 88 – 99.

7. Кузнецов, С. М. Обработка статистической информации [Текст] / С. М. Кузнецов, В. Я. Ткаченко, Н.В. Холомеева // Научно-исследовательские публикации. – Воронеж. – 2014. – № 3 (7). – С. 45 – 54.

8. Кузнецов, С. М. Оценка технической надежности эксплуатации выправочно-подбивочно-рихтовочных машин ВПР-02 [Текст] / С. М. Кузнецов, А. В. Зайцев // Транспорт, наука, техника, управление. – 2014. – № 2. – С. 45 – 49.

9. Кузнецов, С. М. Построение доверительных интервалов работы гидротранспортных систем [Текст] / С. М. Кузнецов, А. И. Круглов, О. А. Легостаева // Научно-исследовательские публикации. – Воронеж. – 2014. – № 13 (17). – С. 5 – 15.

10. Кузнецов, С. М. Совершенствование обработки результатов натурных испытаний при техническом и тарифном нормировании [Текст] / С. М. Кузнецов // Экономика железных дорог. – 2013. –№ 7. – С. 90 – 97.

References

1. Bazilevich S. V., Zaytsev A. V., Kuznetsov S. M. Organizational and technological parameters of operation of the liner-tamping-straightening machines cyclic action [Organizacionno–tehnologicheskie pokazateli ekspluatacii vipravochno-podbivochno-rihtovochnih mashin ciklicheskogo deistviya]. *Izvestiia. Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2015, no 2 (22), pp. 115 – 122.

2. Draper N., Smith G. *Prikladnoi regressionnii analiz* (Applied regression analysis). Moscow, 1973, 170 p.

3. Kuznetsov S. M., Golomeeva N. V., Olhovikov S. E. Automation of model building to optimize organizational and technological solutions [Avtomatizaciya postroeniya modelei dlya optimizacii organizacionno-tehnologicheskih reshenii]. *Nauchno-issledovatelskie publikacii – Scientific research publications,* 2014, no 7 (11), pp. 5 – 13.

4. Kuznetsov S. M., Soboleva O. V., Schaefer M. P. Analysis of patterns of organizational and technological solutions [Analiz ostatkov modelei organizacionno-tehnologicheskih reshenii]. *Nauchno-issledovatelskie publikacii – Scientific research publications*, 2014, no 7 (11), pp. 24 – 32.

5. Kuznetsov S. M., Zaytsev A. V. Reliability liner-tamping-straightening machines [Nadejnost vipravochno – podbivochno – rihtovochnih mashin]. *Put'i putevoe khoziaistvo – Path and track facilities*, 2014, no 3, pp. 19 – 22.

6. Kuznetsov S. M., Kuznetsova K. S. Processing of results of field tests with the technical and tariff regulation [Obrabotka rezultatov naturnih ispitanii pri tehnicheskom i tarifnom normirovanii]. *Ekonomika zheleznykh dorog – Economy railways*, 2010, no 7, pp. 88 – 99.

7. Kuznetsov S. M., Tkachenko V.I., Golomeeva N.V. Processing of statistical information [Obrabotka statisticheskoi informacii]. *Nauchno-issledovatelskie publikacii – Scientific research publications*, 2014, no 3 (7), pp. 45 – 54.

8. Kuznetsov S. M., Zaytsev A. V. Assessment of technical reliability of liner-tamping-straightening machines VPR-02 [Ocenka tehnicheskoi nadejnosti ekspluatacii vipravochno-podbivochno-rihtovochnih mashin VPR-02]. *Transport, nauka, tehnika, upravlenie – Transport, science, technology, management*, 2014, no 2, pp. 45 – 49.

9. Kuznetsov S. M., Kruglov A. I., Legostaeva O. A. Construction of confidence intervals of hydrotransport systems [Postroenie doveritelnih intervalov raboti gidrotransportnih system]. *Nauchno-issledovatelskie publikacii – Scientific research publications*, 2014, no 13 (17), pp. 5 – 15.

10. Kuznetsov S.M. Improvement of processing of results of field tests with the technical and tariff regulation [Sovershenstvovanie obrabotki rezultatov naturnih ispitanii pri tehnicheskom i tarifnom normirovanii]. *Ekonomika zheleznykh dorog – Economy railways*, 2013, no 7, pp. 90 – 97.

УДК 681.5+625.76.08

Ю. Б. Тихонов

ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТЫ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ КРАНОВ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО ПОЕЗДА

В статье проведен анализ безопасности работ при подъеме одного груза двумя грузоподъемными кранами. Рассмотрен способ повышения безопасности проводимых работ с использованием радиоканала для передачи и приема информации о состоянии кранового оборудования, сигналов управления крановыми операциями системами безопасности кранов от крановщиков и стропальщиков, речевого обмена информацией между крановщиками и стропальщиками.

Восстановительный поезд (ВП) предназначен для ликвидации последствий аварии на железной дороге. Основными машинами ВП являются грузоподъемные краны, которые должны эксплуатироваться в соответствии с руководством по эксплуатации завода-изготовителя и федеральными нормами и правилами в области промышленной безопасности «Правилами безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения».

Все грузоподъемные краны, в том числе и железнодорожные, оснащаются приборами безопасности, которые могут выполнять функции различных систем автоматической защиты:

ограничение грузоподъемности (прибор автоматически формирует сигналы отключения механизма подъема груза и механизмов, продолжение работы которых направлено на снижение устойчивости крана, при подъеме груза массой, превышающей номинальную грузоподъемность на текущем вылете);

ограничение подъема и опускания крюка при его подходе к крайним верхнему и нижнему положениям;

ограничение вылета в крайних положениях;

отключение всех механизмов крана при приближении стрелы крана на опасное расстояние к проводам ЛЭП (ограничитель опасного приближения к ЛЭП);

предотвращение столкновения крана с препятствиями в стесненных условиях работы; могут использоваться четыре вида координатной защиты: «потолок», «стена», «левый угол», «правый угол».

Прибор безопасности дополнительно может содержать в своем составе анемометр, который представляет собой систему автоматического контроля. Эта система позволяет машинисту крана принять решение о прекращении работы при скорости ветра, превышающей предельно допустимую.

Кроме этого прибор безопасности содержит регистратор параметров – программируемый прибор, который на всем протяжении работы крана анализирует показания различных датчиков и производит запись в свою энергонезависимую память. Туда записывается, в общем, количество отработанных краном моточасов, полное количество рабочих циклов и количество циклов, во время которых имели место недопустимые перегрузки.

Регистратор параметров при необходимости позволяет получить подробную информационную карту, где указаны марка и заводской номер ограничителя, дата его установки на кран, распределение рабочих циклов по степени загрузки крана, количество и точное время недопустимых перегрузов, а также другая информация, представляющая интерес для владельцев крана и представителей надзорных органов.

Прибор безопасности формирует сигналы управления (разрешения) крановыми операциями.

В настоящее время перечисленные функции приборов безопасности выполняются современными микропроцессорными системами, в частности, ограничителем грузоподъемности ОНК-160С [2]. Для каждого крана существует определенная модификация этого прибора.

Функционирование прибора безопасности рассчитано на работу грузоподъемного крана (в том числе и железнодорожного) со штучным грузом. Однако при работе ВП из-за недостаточной грузоподъемности одного крана нередко один груз поднимают два грузоподъемных крана, как правило, одного типа (рисунок 1).

а б

Рисунок 1 – Подъем локомотива двумя кранами: а – с решетчатыми стрелами; б – с телескопическими стрелами

При этом возникает ряд трудностей: необходимо обеспечить согласованную работу двух крановщиков и сигнальщика, в сложных случаях необходимо крановщиков и сигнальщика обеспечить двусторонней радиосвязью, в процессе работы необходимо одновременно производить контроль углов отклонения грузовых канатов от плоскости подъема для каждого крана, углов отклонения грузовых канатов от гравитационной вертикали, углов наклона опорных платформ обоих кранов к горизонту.

В соответствии с «Правилами безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения» работа по подъему и перемещению груза двумя или несколькими кранами должна производиться в соответствии с проектом или технологической картой, в которых должны быть приведены схемы строповки и перемещения груза с указанием последовательности выполнения операций, положения грузовых канатов, а также должны содержаться требования по безопасному подъему и перемещению груза. При этом нагрузка на каждый кран не должна превышать его грузоподъемности.

Проект производства работ (ППР) и технологическая карта (ТК) должны иметь в своем составе раздел, связанный с организацией безопасного производства работ с применением подъемных средств (ПС). Этот раздел, кроме всего прочего, должен включать следующее:

а) условия совместной безопасной работы двух и более ПС;

б) условия применения координатной защиты работы ПС (при ее наличии на ПС);

в) условия совместного подъема груза двумя или несколькими ПС;

г) условия перемещения ПС с грузом, а также условия перемещения грузов над помещениями, где производятся строительно-монтажные и другие работы;

д) условия установки ПС над подземными коммуникациями;

е) условия подачи грузов в проемы перекрытий;

ж) выписку из паспорта ПС о силе ветра, при котором не допускается их работа;

з) условия организации радиосвязи между крановщиками и стропальщиками.

Таким образом, перемещение одного груза двумя кранами – сложный и небезопасный технологический процесс.

Один из способов повышения безопасности – объединение приборов безопасности, установленных на двух кранах, в одну систему. Сделать это можно с помощью кабеля или по радиоканалу. Целесообразным является использование радиоканала, так как кабель может быть поврежден в результате непредвиденных механических воздействий и климатических факторов. В настоящее время управление по радиоканалу нашло практическое применение на мостовых кранах.

Известен также способ беспроводной передачи информации в системе безопасности одного стрелового крана [1]. В соответствии с этим способом система безопасности состоит из отдельных модулей, которые могут располагаться как на данном кране, так и на других кранах, неподвижных объектах и у стропальщиков и других лиц, участвующих в технологическом процессе. Один модуль на кране является ведущим.

Каждый модуль системы безопасности (рисунок 2) может выполнять функции приемника, передатчика и ретранслятора радиосигнала для передачи информации и содержит модем 1, микроконтроллер 2 и источник питания (на схеме не показан). К микроконтроллеру 2 в зависимости от назначения модуля могут быть подключены цифровые и аналоговые датчики с АЦП, органы управления 3 (кнопки, клавиши, переключатели) и исполнительные устройства 4 (электронные силовые ключи).

Модуль, расположенный в кабине грузоподъемного крана и используемый, как правило, в качестве пульта крановщика, может дополнительно содержать различные элементы световой и звуковой сигнализации, которые подключаются к микроконтроллеру 2. Для организации голосовой связи крановщика со стропальщиком модуль снабжается микрофоном с микрофонным усилителем и громкоговорителем с соответствующим усилителем мощности.

Модем 1 содержит приемник 5, передатчик 6 и цифровой трансивер 7, работа которых поддерживается общим генератором 8. Для связи модема 1 с микроконтроллером 2 по последовательному интерфейсу модем 1 содержит контроллер последовательного интерфейса 9. С целью снижения требований к вычислительным ресурсам (быстродействию) микроконтроллера 2 трансивер 1 содержит буферное оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) 10, предназначенное для временного хранения данных, передаваемых и принимаемых модемом 1. Распределение потока данных в модеме 1 осуществляется с помощью управляющей логики 11. Одновременно эта логика производит установку необходимого режима работы схемы управления энергопотреблением 12.

Использование данного способа рассматривалось для одного крана, работающего со штучным грузом. Однако подобный способ применим и для двух кранов, поднимающих один груз.

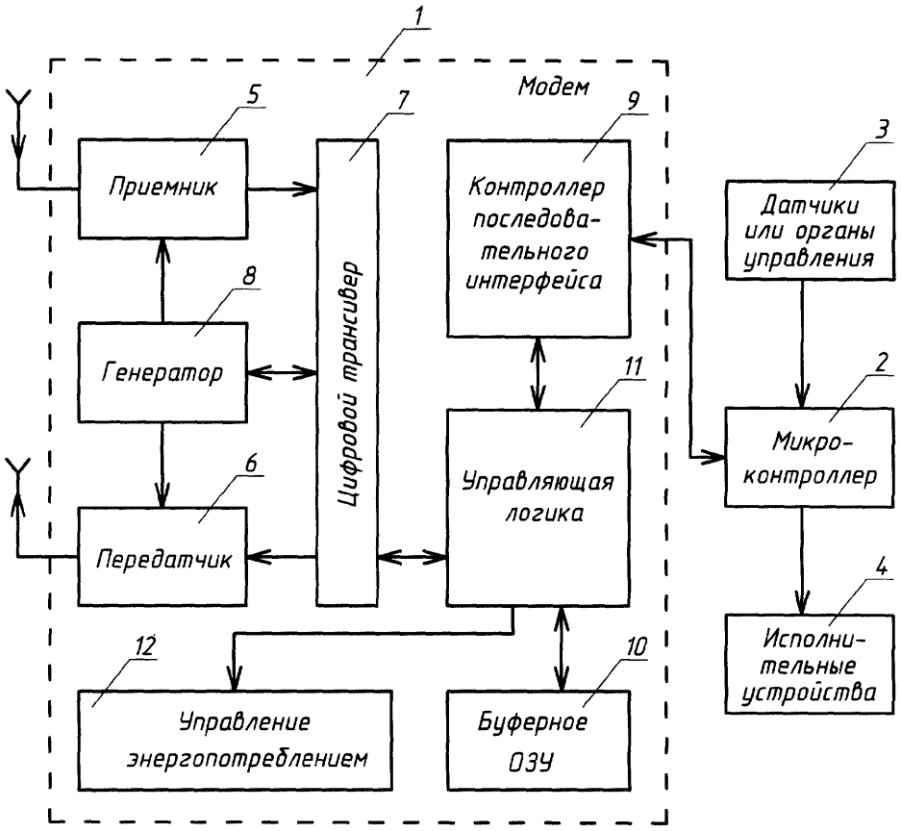


Рисунок 2 – Модуль системы безопасности. Схема функциональная

В этом случае в кабине каждого крана устанавливается модуль, выполняющий функции пульта крановщика. К микроконтроллеру 2 подключены органы управления крановыми операциями 3 (кнопки, клавиши, переключатели), элементы световой и звуковой сигнализации. Кроме этого к микроконтроллеру подключены исполнительные устройства 4 (электронные силовые ключи). Для организации голосовой связи крановщика со стропальщиками и другим крановщиком модуль снабжается микрофоном с микрофонным усилителем и громкоговорителем с соответствующим усилителем мощности.

Кроме того, на каждом кране установлены модули, к которым подключены цифровые и аналоговые датчики с АЦП: датчики давления в поршневой и штоковой полостях гидроцилиндра подъема стрелы (для крана с решетчатой стрелой датчик усилия), датчик угла наклона стрелы маятниковый, датчики отклонения грузового каната от вертикали, датчик азимута, датчик нижнего положения грузозахватного органа, датчики верхнего и нижнего положений стрелы, датчики отклонения платформы крана от горизонта, датчик скорости ветра, дополнительно для крана с телескопической стрелой датчик длины стрелы. Отдельный модуль устанавливается на оголовке стрелы. К нему подключен датчик верхнего положения грузозахватного органа. Этот модуль при определенных условиях может использоваться для ретрансляции радиосигнала. Модули, к которым подключены датчики, выполняют функции ограничителя грузоподъемности, ограничителя вылета в крайних положениях стрелы, ограничителя верхнего и нижнего положений крюка, системы координатной защиты, системы горизонтирования платформы, ограничителя отклонения грузового каната от вертикали, анемометра, регистратора параметров.

Дополнительные модули выдаются стропальщикам и другим лицам, участвующим в технологическом процессе. Эти модули снабжены органами управления, позволяющими блокировать крановые операции, а также микрофоном и громкоговорителем для голосового обмена информацией с крановщиками и другими стропальщиками.

Обмен информацией между всеми модулями осуществляется по радиоканалу.

Если в процессе работы крана ухудшается или становится невозможной связь между модулями, через которые транслировался радиосигнал, например, из-за появления экранирующего препятствия, то может произойти отказ в работе системы безопасности. Для предотвращения такой ситуации в процессе работы грузоподъемного крана сигналы от внешнего модуля, расположенного вне данного грузоподъемного крана, принимаются как минимум двумя модулями крана. При этом ведущие модули кранов оценивают качество связи, выявляют маршрут передачи данных с наилучшим качеством связи. Если наилучшее качество связи достигается при передаче данных через другие модули, благоприятно расположенные в данной ситуации, то при помощи ведущих модулей осуществляется подключение этих модулей к беспроводной сети в качестве ретрансляторов.

Алгоритм работы системы безопасности состоит в том, чтобы остановить работу обоих кранов в случае выхода за пределы допустимых значений хотя бы одного любого параметра.

Таким образом, рассмотренная система позволяет

реализовать одновременное совместное управление двумя кранами, поднимающими один груз; управление осуществляется как крановщиками, так и стропальщиками с целью обеспечения дополнительной блокировки (аварийной остановки) движений крана;

обеспечить надежность передачи информационных и управляющих сообщений, в том числе сигналов аварийного отключения механизмов крана, путем самоорганизации сети при изменении условий работы или пространственного положения узлов крана;

реализовать обмен речевыми сообщениями между стропальщиками и крановщиками;

предотвращать несанкционированный доступ к управлению кранами путем аутентификации крановщика;

благодаря связи с компьютером (ноутбуком) дистанционно настраивать систему безопасности кранов перед началом работы в зависимости от плана производства работ или каких-либо внешних условий: настройка координатной защиты, ограничение скорости или отключение крановых операций в зависимости от скорости ветра, температуры окружающего воздуха;

автоматически дистанционно считывать диагностическую информацию о техническом состоянии системы безопасности или кранов в целом для исключения допуска к работе крана с какой-либо технической неисправностью.

Указанные факторы позволяют повысить безопасность работы грузоподъемных кранов восстановительного поезда.

Для практической реализации предложенной системы имеются определенные наработки. Современные системы дистанционного беспроводного управления кранами, применяемые зачастую в тяжелых производственных условиях, разрабатываются уже не одно десятилетие. В частности, разработаны системы для управления по радиоканалу специальными кранами, использующимися в тяжелой промышленности, для управления высотными башенными кранами в жилищном строительстве, для дистанционного управления автокранами с пропорциональными электрогидрораспределителями.

Практическое применение такой системы в определенной степени сдерживают нормативные документы, ограничивающие работы по подъему одного груза двумя кранами, если вес груза превышает грузоподъемность каждого крана. Поскольку предложенная система предполагает дублирование систем безопасности, нормативные документы могут быть уточнены в сторону либерализации без ущерба безопасности.

Список литературы

1. Пат. 2282576 С2 Российская Федерация, МПК В 66 С 13/18). Способ беспроводной передачи информации в системе безопасности грузоподъемного крана [Текст] / Коровин В.А.,

Коровин К.В.; заявитель и патентообладатель ООО «НПП «Резонанс». – 2004138353/11; заявл. 27.12.2004; опубл. 27.08.2006.

References

1. Korovin V.A., Korovin K.V. *Patent RU 2282576 C2*, 27.08.2006.

УДК 629.424:001.57

РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ В СИСТЕМУ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ РАБОТЕ ТЕПЛОВОЗНОГО ДИЗЕЛЯ НА ХОЛОСТОМ ХОДУ

Анисимов Александр Сергеевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-17.

Носков Виталий Олегович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Аспирант кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-17.

Фоменко Валентин Константинович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-17.

Статья посвящена вопросам математического моделирования теплоотвода в систему охлаждения тепловозного дизеля. В статье представлены особенности расчета тепловыделения в систему охлаждения дизеля при работе на холостом ходу.

Ключевые слова: *дизельный двигатель, холостой ход, теплообмен, коэффициент теплоотдачи, система охлаждения дизеля, закон сгорания Вибе, индикаторная диаграмма.*

CALCULATION OF HEAT IN COOLING SYSTEM AT WORK DIESELS IDLE

Anisimov Alexandr Cergeevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., associate professor of the department «Locomotives», OSTU.
Phone: (3812) 31-34-17.

Noskov Vitalii Olegovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Post-graduate student of the department «Locomotives», OSTU.
Phone: (3812) 31-34-17.

Fomenko Valentin Konstantinovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., associate professor of the department «Locomotives», OSTU.
Phone: (3812) 31-34-17.

Article is devoted to mathematical modeling of heat transfer to the cooling system of locomotive diesel engine . The article presents the features of calculation of heat to the cooling system of a diesel engine when idling.

Keywords: *diesel engine, idling, heat transfer, heat transfer coefficient, the cooling system of a diesel engine, combustion law vibe indicator diagram.*

УДК 629.4.016.1

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НОВЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ ДЛЯ СОКРАЩЕНИЯ ВРЕМЕНИ ХОДА ПАССАЖИРСКИХ ПОЕЗДОВ НА ТРАНССИБИРСКОЙ МАГИСТРАЛИ

Бакланов Александр Алексеевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-19.
E-mail: aleksbakl@yandex.ru

Есин Николай Васильевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-19.
E-mail: NikVE@mail.ru

Шиляков Андрей Петрович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-19.

В статье рассмотрены возможности повышения скорости движения и сокращения времени хода пассажирских поездов на Транссибирской магистрали, в том числе с помощью новых пассажирских электровозов ЭП1, ЭП2К, ЭП20.

Ключевые слова: *пассажирский поезд, электровоз, скорость движения, сила тяги, мощность.*

THE USE OF NEW ELECTRIC LOCOMOTIVES TO REDUCE THE TIME OF PASSENGER TRAINS ON THE TRANS-SIBERIAN RAILWAY

Baklanov Alexander Alekseevich
Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., associate professor of the department « Rolling stock of electric railways», OSTU.
Phone: (3812) 31-34-19.
E-mail: aleksbakl@yandex.ru

Esin Nikolai Vasilyevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., associate professor of the department « Rolling stock of electric railways», OSTU.
Phone: (3812) 31-34-19.
E-mail: NikVE@mail.ru

Shilyakov Andrey Petrovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., associate professor of the department « Rolling stock of electric railways», OSTU.
Phone: (3812) 31-34-19.

The possibilities of improving speed and reducing the time of passenger trains on the Trans-Siberian railway, including through new passenger locomotives EP1, EP2K, EP20.

Keywords: *passenger train, electric locomotive, speed, traction force, power*.

УДК 629.4.015;656.2;621.0;534.014

ОСОБЕННОСТИ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ СИСТЕМ С РЫЧАЖНЫМИ СВЯЗЯМИ

Елисеев Сергей Викторович
Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.
Доктор технических наук, профессор, директор, главный научный сотрудник Научно-образовательного центра «Современные технологии, системный анализ и моделирование», ИрГУПС.
Тел.: (3952) 63-83-26.
E-mail: eliseev_s@inbox.ru

Кинаш Никита Жданович
Московская железная дорога филиала ОАО «РЖД».
107996, г. Москва, ул. Краснопрудная, 20.
Начальник конструкторского отдела Дорожного инженерного технологического центра (ДИТЦа) Московской железной дороги – филиала ОАО «РЖД», соискатель Научно-образовательного центра «Современные технологии, системный анализ и моделирование» ИрГУПСа.
E-mail: n.kinash@icloud.com

Нгуен Дык Хуинь
Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.
Аспирант Научно-образовательного центра «Современные технологии, системный анализ и моделирование» ИрГУПСа.

Тел.: (3952) 63-83-99.
E-mail: nguyenduchuynh@yandex.ru

Предлагается метод построения математических моделей для механических систем с дополнительными обратными связями, которые формируются рычажными механизмами различного рода. Показано, что математические модели могут быть получены путем упрощения более сложной системы с твердым телом, имеющим неподвижную точку вращения. При построении модели рычажные связи формально проявляются, если уменьшать момент инерции промежуточного твердого тела до малых значений. Показано, что механическая колебательная система может быть приведена к эквивалентной схеме, соответствующей системе цепного типа. Эквивалентные расчетные схемы могут иметь межпарциальные связи различного вида. Предложены и обоснованы возможности использования квазипружин. Такие сложные образования состоят из упругих звеньев, соединенных между собой рычажными механизмами. Приведенная жесткость квазипружин определяется по правилам преобразования структурных математических моделей. Основой математического моделирования является использование преобразований Лапласа с последующим построением эквивалентных в динамическом отношении структурных схем систем автоматического управления. Получены аналитические соотношения, характеризующие возможности реализации особых динамических режимов.

Ключевые слова: *рычажные связи и механизмы, парциальные системы, передаточные функции, эквивалентные расчетные схемы, приведенная жесткость*.

FEATURES OF FEEDBACK TIES AT OSCILLATIONS OF SYSTEMS WITH LEVER TIES

Eliseev Sergey Viktorovich
Irkutsk State Transport University (ISTU).
15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, Russia.
Dr. Sci. Tech., professor, director of Research and Educational Center «Modern technologies, systems analysis and modeling» of ISTU.
Phone: (83952) 66-51-29.
E-mail: eliseev_s@inbox.ru

Kinash Nikita Zhdanovich
Moscow railroad.
20, Krasnoprudnaya st., Moscow, 107996, Russia.
Chief of design department of Road Engineering Technological Center (RETC).
E-mail: n.kinash@icloud.com

Ngueyn Duc Huynh
Irkutsk State Transport University (ISTU).
15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, Russia.

Graduate student of Research and Educational Center «Modern technologies, systems analysis and modeling» of ISTU.
Phone: (3952) 63-83-99.
E-mail: nguyenduchuynh@yandex.ru

Method of construction of mathematical models is offered for mechanical systems with additional feedback ties which formed of lever mechanisms of different kinds. It shown that mathematical models can be get by simplifying more complicated system in which lever ties are realized of rigid body with fixed pivot point. Lever ties at the preparation of a model formally appear at decrease inertial moment of intermediate rigid body to very small values. It shown that mechanical oscillation system can be reduced to equivalent scheme which matches estimation scheme of chain type. Equivalent estimation schemes can to differ of various kinds of between-partial ties. Possibilities of using quasi-springs in equivalent estimation schemes are offered and justified. These complicated compositions consist of elastical elements which interconnected of lever mechanisms. Coerced stiffness's of quasi-springs defined on rules of transformation of structural mathematical models. Base of mathematical modeling is using method of transformation of Laplas with following construction of equivalent in dynamical attitude of structural schemes of automation control systems. Analytical ratios are given. They characterize possibilities of special dynamical regimes.

Keywords: *lever ties; partial systems; transfer functions; equivalent estimation schemes; coerced stiffness's.*

УДК 629.471

НЕЧЕТКИЕ МНОЖЕСТВА В СИСТЕМЕ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ЛОКОМОТИВНОГО КОМПЛЕКСА

Лакин Игорь Игоревич
ООО «АВП Технология».
111250, г. Москва, проезд завода «Серп и Молот», д. 6, кор. 1.
Ведущий инженер ООО «АВП-технология», технический руководитель проекта «Мониторинг локомотивов», аспирант МИИТа.
E-mail: lakin16@mail.ru

В статье предлагается использовать теорию нечетких множеств в системе поддержки принятия решений (СППР) информационно-управляющих систем локомотивного комплекса. Для этого предлагается метод перевода лингвистических утверждений на язык математической логики. Предлагаемый метод внедряется по принципу «встроенное качество» в единой информационно-управляющей системе мониторинга технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов сервисной компании ООО «ТМХ-Сервис» и управляющей компании ООО «Локомотивные технологии».

Ключевые слова: *локомотивы, мониторинг, надежность, информационные системы, поддержка принятия решений, нечеткие множества.*

FUZZY SET IN DECISION SUPPORT SYSTEM OF LOCOMOTIVE COMPLEX INFORMATION SYSTEMS

Lakin Igor Igorevich
LLC «WUA technology».

6/1, traveling Mill Hammer and Sickle, Moscow, 111250, Russia.
Leading engineer of «WUA Technology», technical manager of the project «Monitoring of locomotives», graduate student MIIT.
E-mail: lakin16@mail.ru

The article proposes the use of Fuzzy Sets theory in decision-making support system of locomotive complex IT-control systems. For this purpose the method of translation linguistic assertions into the language of mathematical logic proposed, which will be introduced on a built-in quality in the IT-control system of monitoring of technical condition and modes of operation of locomotives service company «TMH-Service» and management company «Locomotive technologies».

Keywords: locomotives, monitoring, reliability, IT-systems, decision support, fuzzy sets.

УДК 629.4.027

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОВОЗОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Нехаев Виктор Алексеевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая механика», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-16-88.
E-mail: nehaevVA@omgups.ru

Николаев Виктор Александрович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая механика», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-16-88.
E-mail: nikolaevVA@omgups.ru

Минжасаров Марат Хайергельдаевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Аспирант кафедры «Теоретическая механика», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-16-88.

В статье на основе анализа конструкции экипажной части электровозов новых поколений построены расчетные схемы и сформированы их математические модели вертикальной динамики. С использованием уже известных методик упрощения математических моделей выведена математическая модель вертикальной динамики условного «одноосного» электровоза нового поколения и проведены расчеты динамических и тяговых качеств железнодорожного экипажа с параметрами пассажирского электровоза ЭП2К.

Ключевые слова: *математическая модель, рессорное подвешивание, спектральная плотность виброускорения, динамические свойства электровоза, тяговые свойства электровоза.*

MATHEMATICAL MODELING OF VERTICAL DYNAMICS OF LOCOMOTIVES OF A NEW GENERATION

Nehaev Victor Alekseevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr. Sci. Tech., professor of the departament «Theoretical mechanics», OSTU.

Phone: (3812) 31-16-88.
E-mail: nehaevVA@omgups.ru

Nikolaev Victor Aleksandrovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr. Sci. Tech., professor of the departament «Theoretical mechanics», OSTU.
Phone: (3812) 31-16-88.
E-mail: nikolaevVA@omgups.ru

Minzhasarov Marat Khajergeldajevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Post-graduate of the departament «Theoretical mechanics», OSTU.
Phone: (3812) 31-16-88.

In article on the basis of the analysis of design undercarriage locomotives of new generation built the design scheme and formed their mathematical model of the vertical dynamics. Using already known techniques simplify the mathematical models derived a mathematical model of the vertical dynamics of the conditional «uniaxial» locomotive of the new generation and the calculations of the dynamic and traction qualities of the train crew with parameters passenger locomotive EP2K.

Keywords: *mathematical model, spring suspension, the spectral density of Vibroscreen, the dynamic properties of the locomotive, traction properties of the locomotive.*

УДК 629.424.3:621.436

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ТЕПЛОВОЗА

Овчаренко Сергей Михайлович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, ректор университета, заведующий кафедрой «Локомотивы», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-17.

Балагин Олег Владимирович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, помощник ректора по профессиональной ориентации и набору, доцент кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-17.
E-mail: BalaginOV@omgups.ru

Балагин Дмитрий Владимирович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-17.
E-mail: BalaginDV@omgups.ru

В статье представлена математическая модель системы охлаждения тепловоза 2ТЭ10М, позволяющая выполнять расчет параметров теплообменных аппаратов с учетом их технического состояния.

Ключевые слова: *математическая модель, теплообменные аппараты, тепловой расчет, межконтурный перепуск, гидравлический и тепловой расчет, аэродинамический расчет, коэффициент теплопередачи, термическое сопротивление, система охлаждения тепловоза.*

MATHEMATICAL MODELING HEATEXCHANGE PROCESSES IN THE LOCOMOTIVE COOLING SYSTEM

Ovcharenko Sergey Mikhailovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr. Sci. Tech., rector, head of the department «Locomotives» (OSTU).
Phone: (3812) 31-34-17.

Balagin Oleg Vladimirovich
Omsk State Transport Univirsity (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., the assistant rectors on vocational guidance and a set, the senior lecturer of the department «Locomotives», OSTU.
Phone: (3812) 31-16-72.
E-mail: BalaginOV@omgups.ru

Balagin Dmitry Vladimirovich
Omsk State Transport Univirsity (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., the senior lecturer of the department «Locomotives», OSTU.
Phone: (3812) 31-16-72.
E-mail: BalaginDV@omgups.ru

The mathematical model cooling systems of a locomotive 2TE10M allowing to carry out calculation parameters of heatexchange devices taking into account their technical condition is presented in article.

Keywords: *mathematical model, heatexchange devices, thermal calculation, interplanimetric restart-up, hydraulic and thermal calculation, aerodynamic calculation, heat transfer coefficient, thermal resistance, locomotive cooling system.*

УДК 629.45.048

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Томилова Ольга Сергеевна
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Преподаватель кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-06-72.
E-mail: motovilova@yandex.ru

Томилов Валерий Викторович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-46.
E-mail: tomilov_omsk@mail.ru

В статье приведена методика расчета потерь напора воды в системе водоснабжения пассажирского вагона, оснащенного системой очистки в виде последовательно установленных двух фильтров и проточного ультрафиолетового стерилизатора шнековой конструкции. Представлены результаты расчета потерь в различных системах водоснабжения вагонов с учетом максимальных и минимальных времени заправки и напоров воды в станционной системе водоснабжения. Определены рациональные геометрические параметры камеры обеззараживания проточного ультрафиолетового стерилизатора из условий обеспечения полного заполнения бака вагона за минимальное время стоянки с минимальным напором станционной системы водоснабжения. Величина потерь напора не превышает паспортных значений типовых конструкций. Геометрия стерилизатора позволяет интегрировать устройство в вагон. Ее расчетные значения взяты для разработки макетного образца УФ-стерилизатора, успешно прошедшего испытания. Для возможности определения потерь напора воды камера обеззараживания стерилизатора шнековой конструкции представлена змеевиком с прямоугольным сечением, «намотанным» на цилиндр. Местные потери одного витка рассчитаны с использованием справочной формулы, предложенной Г. Н. Абрамовичем.

Ключевые слова: *пассажирский вагон, система водоснабжения, стерилизатор, ультрафиолет.*

HYDRAULIC CALCULATION OF THE MODERNIZED SYSTEM WATER IN THE PASSENGER CAR OF RAILWAY TRANSPORT

Tomilova Olga Sergeevna
Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Lecturer of the departament «Railway cars and car enterprise», OSTU.
Phone: (3812) 31-06-72.
E-mail: motovilova@yandex.ru

Tomilov Valeriy Viktorovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., associate professor of the departament «Railway transport electrosuppling», OSTU.
Phone: (3812) 31-34-46.
E-mail: tomilov_omsk@mail.ru

In the article there is the method of calculating the loss of water pressure in the water system of passenger cars, equipped with a cleaning system as a series of two filters installed and the flow of ultraviolet sterilizer screw design. There is the results of calculation of losses in the various water systems of cars with the maximum and minimum charging time and the water pressure in the water system station.

The rational geometric parameters of the decontamination chamber flow ultraviolet sterilizer of the conditions to ensure complete filling of the tank car parking in the minimum time with minimum pressure of the water supply system of the station. The value of head loss does not exceed the nameplate values typical designs. The geometry of the sterilizer allows you to integrate the device into the car.

Its design values are taken to develop the prototype of a UV sterilizer successfully tested. To be able to determine the loss of water pressure chamber decontamination sterilizer screw coil design is presented with a rectangular cross section, «wound» on the cylinder. Local loss of one turn calculated using the reference formula proposed by G.N. Abramovich.

Keywords: *passenger car, water supply system, sterilizer, ultraviolet light.*

УДК 621.333:621.314.26:621.313.33:621.317

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТРЕБЛЯЕМОЙ МОЩНОСТИ ВО ВРЕМЯ ИСПЫТАНИЙ АСИНХРОННЫХ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МЕТОДОМ ВЗАИМНОЙ НАГРУЗКИ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ИХ ПИТАНИЯ

Харламов Виктор Васильевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-18-27.

Попов Денис Игоревич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-18-27.
E-mail: Popovomsk@yandex.ru

Литвинов Артем Валерьевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-18-27.
E-mail: artyom_hawk@mail.ru

В статье предлагается использование косвенного метода определения мощности, потребляемой (генерируемой) асинхронными тяговыми двигателями, в процессе их испытаний методом взаимной нагрузки и с учетом особенностей их питания от преобразователей частоты, что позволяет отказаться от использования сложных аппаратно-программных комплексов в пользу стандартных общепромышленных электроизмерительных приборов.

Ключевые слова: *методика, потери, преобразователь частоты, асинхронный тяговый двигатель, испытания, метод взаимной нагрузки.*

METHODOLOGY FOR ASSIGNING LOSSES IN TWO-ELEMENT FREQUENCY CONVERTER IN INDUCTION MOTOR TEST RIG

Harlamov Victor Vasilyevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Doctor of technical science, professor, the head of the department «Electrical machinery and general electrical», OSTU.
Phone: (3812) 31-18-27.

Popov Denis Igorevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., associate professor of the department «Electrical machinery and general electrical», OSTU.
Phone: (3812) 31-18-27.
E-mail: Popovomsk@yandex.ru

Litvinov Artyom Valerievich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., senior lecturer of department «Locomotives», OSTU.
Phone: (3812) 31-18-27.
E-mail: artyom_hawk@mail.ru

Each of the proposed circuits is composed of inverters. These devices are sources of non-sinusoidal voltage, whose frequency can vary within a wide load range of the test engine. There-

fore, to measure the power in such conditions requires either the use of special complex of hardware-software complexes to perform the direct measurement or the development of indirect methods for determining capacity. Such methods proposed for each of the schemes. The essence of the developed methods consists in a preliminary experimental determination of the dependency of the losses in the rectifiers and rectifier-inverters circuits from the power supplied to him. These dependencies are further processed during the test, using only the General-industrial electric meters that measure power consumed by the frequency Converter, and the power consumed (generated) asynchronous motors is determined by the indirect (calculated) by. On the other hand, pre-experimentally received dependence of losses in frequency converters from power consumption trolled (generated) asynchronous motor energy, you can calculate the power consumed by the frequency Converter from the network in a wide range of loads that can be used in the design of testing stations for asynchronous traction motors.

Keywords: *methodology, losses, frequency converter, asynchronous traction motor, testing, back-to-back method*.

УДК 621.2.082.18

ОЦЕНКА ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В УЗЛАХ ЭКИПАЖНОЙ ЧАСТИ ЭЛЕКТРОВОЗОВ

Шантаренко Сергей Георгиевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, доцент, проректор по научной работе, заведующий кафедрой «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС. Тел.: (3812) 31-16-27.
E-mail: nich@omgups.ru

Капустьян Михаил Федорович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.
Phone: (3812) 31-18-11.
E-mail: mcap731@gmail.com

Обрывалин Алексей Викторович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-18-11
E-mail: obryvalin_av@mail.ru

В статье предложены методики оценки потерь мощности в моторно-осевых подшипниках, буксовых узлах, тяговой зубчатой передаче. Выявлены зависимости между потерями мощности, диаметром бандажа колесной пары и скоростной характеристикой колесно-моторного блока. Полученные результаты могут быть использованы для оценки техниче-

ского состояния и энергетической эффективности тягового подвижного состава железных дорог.

Ключевые слова: *электровоз, мощность трения, моторно-осевой подшипник, буксовый узел, зубчатая передача, колесно-моторный блок, энергетическая эффективность.*

EVALUATION OF POWER LOSSES IN NODES UNDERFRAMES OF LOCOMOTIVES

Shantarenko Sergey Georgievich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr. Sci. Tech., the senior lecturer, vice rector for scientific work, leader of the departament «Technology of transport engineering and repair of rolling stock», OSTU.
Phone: (3812) 31-16-27.
E-mail: nich@omgups.ru

Kapustyan Mikhail Fedorovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk. 644046, Russia.
Ph.D., the senior lecturer of the departament «Technology of transport mechanical engineering and repair rolling stock», OSTU.
Phone: (3812) 31-18-11.
E-mail: mcap731@gmail.com

Obryvalin Aleksey Viktorovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk. 644046, Russia.
Ph.D., the senior lecturer of the departament «Technology of transport mechanical engineering and rolling stock repair», OSTU
Phone: (3812) 31-18-11.
E-mail: obryvalin_av@mail.ru

The article proposes methodology for assessing the power loss in motor thrust bearings, the nodes of box, traction gear transmission. Revealed dependence between the power losses, the diameter of the tire wheel pair and the speed characteristic of the wheel-motor block. The results can be used to assess the technical condition and energy efficiency of traction rolling stock of Railways.

Keywords: *locomotive, power friction motor-axial bearing, axle hub, gear train, the wheel-motor block, energy efficiency.*

УДК 620.98:62-682

УТИЛИЗАЦИЯ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РЕОСТАТНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Глухов Сергей Витальевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-06-23.
E-mail: svgluk@mail.ru

Тарута Виктор Федорович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-17.
E-mail: tarutavf@gmail.com

Глухова Мария Викторовна
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-06-23.
E-mail: marta_omgups@mail.ru

Реостатные испытания в обязательном порядке проводятся после ремонтов тепловозов. В качестве реостата используется комплекс оборудования с помещением обслуживающего персонала, размещаемый на определенном расстоянии от административных зданий. Для отопления помещения обслуживающего персонала используется централизованное отопление, себестоимость которого значительна, и транзитные тепловые потери часто соизмеримы с полезным потреблением отапливаемого помещения. В работе рассмотрена возможность использования вторичных энергетических ресурсов (ВЭР) на цели отопления станции реостатных испытаний. Отмечено, что в отдельных депо мероприятия по утилизации тепловой энергии от нагрузочных реостатов внедрены, но распространения не получили. Указаны внешние сдерживающие факторы, ограничивающие внедрение утилизационных установок, в том числе технические и организационные. Предложены основные мероприятия, которые целесообразно рассматривать при возможном внедрении утилизационных установок. Произведен расчет выработки тепловой энергии на реостате при типовых испытаниях тепловозов ТЭМ2 и величины нагрева теплоносителя в типовых нагрузочных водяных реостатах. Предложена схема использования ВЭР в низкотемпературных системах отопления. Отмечены преимущества использования низкотемпературных систем отопления. Произведен расчет требуемой выработки тепловой энергии утилизационной установкой за каждый месяц в течение года на примере депо ст. Омск. Отмечено, что требуемое количество испытаний для компенсации тепловых потерь совпадает с графиками работы станций реостатных испытаний большинства депо и делается вывод о применимости указанного способа испытаний. Рассчитан экономический эффект от внедрения мероприятий с учетом капитальных затрат на сооружения быстровозводимого здания над открытым реостатным баком.

Ключевые слова: *реостатные испытания, вторичные энергетические ресурсы (ВЭР), утилизационная установка, экономия энергетических ресурсов.*

THE UTILIZATION OF SECONDARY ENERGY RESOURCES DURING THE CONDUCT OF RHEOSTAT TRIALS

Glukhov Sergey Vitalievich
Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., associate professor of the department «Heat and power engineering», OSTU.
Phone: (3812) 31-06-23.
E-mail: svgluk@mail.ru

Taruta Viktor Fedorovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., associate professor of the department «Lokomotives», OSTU.
Phone: (3812) 31-34-17.
E-mail: tarutavf@gmail.com

Glukhova Mariya Viktorovna
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., associate professor of the department «Heat and power engineering», OSTU.
Phone: (3812) 31-06-23.
E-mail: marta_omgups@mail.ru

Rheostat trials must be carried out after repairing of a diesel locomotive. As a rheostat it is used a complex of equipment and it is taken a separate building for the staff, which must be situated at a set distance from office buildings. In order to keep the building for the staff warm central heating is used. The net cost is extremely high and transit heat losses are often comparable with effective consumption of the heated building. In this work the possibility to utilize the secondary energy resources for heating the stations is considered where rheostat trials are supposed to be carried out. It is noticed in separate depots that the measures of heat energy utilization from load rheostats have already been applied, but they are not widespread. There are external restrictive factors which limit the adoption of heat-recovery installations and also technical and organizational factors as well. There have been proposed principal measures which could be considered in case of the adoption of heat-recovery installations. Calculations are performed by heat energy generation by a rheostat during typical trials of diesel locomotives TEM2 and heat quantity of heat-transfer agent in typical load water rheostats. It is proposed that the plan to utilize secondary energy resources in low temperature heating systems will be effective. It is also mentioned the utilization of low temperature heating systems has many advantages. The required heat energy generation of heat-recovery installation for each month of the year have been calculated, and Station Omsk depot is one of the example where these calculations have been performed. It is noted required quantity of trials for heat loss compensation coincide with station operating schedule of rheostat trials in the majority of depots and would like to apply the indicated trial method. The calculated economical cost of these measures along with capital costs for the speed of completing the building should be considered when calculating the total cost of the station over the open rheostat tank.

Keywords: *rheostat trials, secondary energy resources, utilization unit, economy of energy resources.*

УДК 621.331

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЯГОВЫХ СЕТЕЙ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ

Закарюкин Василий Пантелеймонович
Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.
Доктор технических наук, профессор, ИрГУПС.
Тел.: (3952) 63-83-45.
E-mail: zakar49@mail.ru

Крюков Андрей Васильевич
Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.
Доктор технических наук, профессор ИрГУПСа, академик Российской академии транспорта, член-корреспондент АН ВШ РФ, заслуженный энергетик РБ.
Тел.: (3952) 63-83-45.
E-mail: and_kryukov@mail.ru

Кушов Алексей Александрович
Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.
Аспирант ИрГУПСа.
Тел.: (3952) 63-83-45.

Предложена методика параметрической идентификации тяговой сети железной дороги переменного тока. Методика позволяет получать параметры тяговой сети, которые при наличии погрешностей измерений векторов напряжений и токов, не превышающих 0,5 %, 0,5º, дают достаточно высокую точность расчета режимов систем тягового электроснабжения, обеспечивающую корректное решение многих практических задач. Компьютерное моделирование показало, что погрешности определения режима однородной тяговой сети по напряжениям не превышают 0,4 % и 0,2º, по токам – 0,9 %, 1,3º.

Ключевые слова: *системы тягового электроснабжения, параметрическая идентификация.*

DETERMINATION OF TRACTION NETWORKS PARAMETERS ON MEASURING DATA

Zakaryukin Vasiliy Panteleymonovich
Irkutsk State Transport University (ISTU).
15, Chernishevsky st., Irkutsk, 664074, Russia.
Dr. Sci. Tech., professor of ISTU.
Phone: (3952) 63-83-45.
E-mail: zakar49@mail.ru

Kryukov Andrey Vasilievich
Irkutsk State Transport University (ISTU).
15, Chernishevsky st., Irkutsk, 664074, Russia.
Dr. Sci. Tech., professor of ISTU, academician of the Russian academy of transport, Ass. Member of High School Academy of Science.
Phone: (3952) 63-83-45.
E-mail: and_kryukov@mail.ru

Kushov Alexey Alexandrovich
Irkutsk State Transport University (ISTU).

15, Chernishevsky st., Irkutsk, 664074, Russia.
Post-graduate student of ISTU.
Phone: (3952) 63-83-45.

The technique of parametrical identification of alternating current railroad traction network is offered. The technique allows receiving trellised equivalent circuits of a traction network which in the presence of measurements' errors of voltage and currents vectors which aren't exceeding 0,5 % 0,5º give rather high precision of systems modes calculation of traction power supply, providing the correct solution of many practical tasks. Computer modeling showed that uniform traction network mode errors on voltages don't exceed 0,4 % and 0.2º, on currents – 0,9 %, 1.3º.

Keywords: *systems of traction power supply, parametrical identification*

УДК 621.331:621.311.4:621.314

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ СИЛОВЫХ ВЕНТИЛЕЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Салита Евгений Юрьевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-46.
E-mail: tatevgeniy@list.ru

Ковалева Татьяна Владимировна
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-06-88.
E-mail: tatevgeniy@list.ru

Никонов Андрей Викторович
Западно-Сибирская железная дорога – филиал ОАО «РЖД».
644121, г. Омск, ул. Леконта, 20.
Электромеханик дорожной электротехнической лаборатории Западно-Сибирской железной дороги.
Тел.: (3812) 44-27-61.
E-mail: AndrewNikonov@rambler.ru

На тяговых подстанциях электрических железных дорог эксплуатируются различные преобразователи, в состав вентильных конструкций которых входят силовые вентили штыревого и таблеточного типа. При таком разнообразии вентильных конструкций становится актуальной проблема несоответствия объемов и качества информации о характеристиках и диагностических параметрах силовых полупроводниковых вентилей требованиям надежной работы системы электроснабжения. Для возможного прогнозирования нор-

мальной работы диодов и тиристоров необходимы новые приборы и простые технологии профилактического диагностирования, соответствующие государственным и отраслевым стандартам и инструкциям. Одним из наиболее точных методов, позволяющих не только определить исправность вентилей, но и дать прогноз по сроку их службы, является метод диагностирования по повторяющемуся импульсному обратному току. Этот метод положен в основу создания прибора для измерения импульсных обратных токов (ПОИТ), который применяется на Западно-Сибирской железной дороге. С помощью этого прибора проведена диагностика около 30 тысяч вентилей, по результатам которой осуществлена отбраковка неисправных вентилей, спрогнозировано состояние вентилей на перспективу. Анализ статистики проведенных исследований позволил определить ряд мероприятий для повышения надежности работы преобразователей тяговых подстанций.

Ключевые слова: *тяговая подстанция, преобразователь, силовые вентили, диагностика, импульсный обратный ток, прибор, результаты испытаний, повышение надежности*.

THE DIAOGNOSTICS OF TRACTION SUBSTATIONS POWER RECTIFIERS CONVERTERS

Salita Evgeny Jurievich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., the senior lecturer of the department «Power supply for railway transport», OSTU.
Phone: (3812) 31-34-46.
E-mail: tatevgeniy@list.ru

Kovaleva Tatiana Vladimirovna
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., the senior lecturer of the department «Theoretical the electrical engineer», OSTU.
Phone: (3812) 31-06-88.
E-mail: tatevgeniy@list.ru

Nikonov Andrey Viktorovich
West –Sibirian Railway – a branch of JSC «Russian Railways»
20, Leconte av., Omsk, 644121, Russia.
Electrician road electrotechnical laboratory of West –Sibirian Railway.
Phone: (3812) 44-27-61.
E-mail: AndrewNikonov@rambler.ru

Various converters are operated at electric railways traction substations whose rectifiers design includes plug-in power rectifiers and pill ones. Such a variety of rectifiers design causes the problem of the power supply reliable operation unavailability both of volumes and of quality information concerning the characteristics and diagnostic parameters of power semiconductors rectifiers. For a possible prediction of the diodes and thyristors proper operation, new instruments as well as simple technologies of the preventive diagnostics, correspondent to the state and industry standards and instructions should be developed. One of the most accurate methods to determine not only the serviceability of rectifiers but also to forecast their wear – life, is the diagnostic method of recurrent peak backward current. This method is the basis for the design of a peak backward cur-

rent meter which is used on the Western-Siberian railway. Using this device the screening of about thirty thousand rectifiers was carried out which resulted in the sorting of out-of-work rectifiers, predicting long term rectifiers conditions. The statistical analysis of the research allowed to determine the number of measures to improve the reliability of traction substations converters.

Keywords: *electric railways traction substations, power rectifiers, power diodes, diagnostics, recurrent peak backward current, device, results of research, improve the reliability*.

УДК 621.397.4:519.6

ПРИМЕНЕНИЕ КЛАСТЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ И ВИДЕОРЕГИСТРАЦИИ НА ТЕРРИТОРИАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ОБЪЕКТАХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Ананьева Надежда Геннадьевна
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Программист кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-05-89.
E-mail: AnanievaNG@omgups.ru

Петров Владимир Владимирович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-05-89.
E-mail: PetrovVV@omgups.ru

Выполнен анализ особенностей территориально распределенных объектов железнодорожного транспорта для реализации систем видеонаблюдения и видеорегистрации. Предложена трехэтапная методика разработки таких систем, в основе которой лежит разделение всей системы на зоны видеонаблюдения, зоны видеорегистрации и информационные кластеры, обеспечивающая оптимизацию системы по критерию минимальных затрат.

Ключевые слова: *распределенные объекты, оптимизация, линейное программирование, видеонаблюдение, видеорегистратор, информационные кластеры, локомотивное депо.*

APPLICATION OF CLUSTER TECHNOLOGY FOR DEVELOPMENT OF SYSTEMS OF VIDEO SURVEILLANCE AND VIDEO REGISTRATION ON TERRITORIALLY THE DISTRIBUTED OBJECTS OF RAILWAY TRANSPORT

Ananieva Nadezda Gennadievna
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Programmer of the department «Automation and control systems», OSTU.
Phone: (3812) 31-05-89.
E-mail: AnanievaNG@omgups.ru

Petrov Vladimir Vladimirovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., associate professor of the department «Automation and control systems», OSTU.
Phone: (3812) 31-05-89.
E-mail: PetrovVV@omgups.ru

Is executed the analysis of the special features of the territorially distributed objects of rail transport for developing the systems of video surveillance and video registration. Is proposed the three-stage design procedure of such systems, at basis of which lies the separation of entire system into the zones of video surveillance, zones of video registration and the information clusters, which ensure the optimization of system on the criterion of minimum expenditures.

Keywords: *the distributed objects, optimization, the linear programming, video surveillance, the video recorder, information clusters, locomotive depot.*

УДК 621.317:519.683

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ФИДЕРАХ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Чижма Сергей Николаевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-05-89.
E-mail: chizhmasn@omgups.ru

Лаврухин Андрей Александрович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-05-89.
E-mail: lavruhinaa@omgups.ru

Малютин Андрей Геннадьевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-05-89.
E-mail: maliutinag@omgups.ru

Окишев Андрей Сергеевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-05-89.
E-mail: okishevas@omgups.ru

Описаны структурная схема, алгоритмическая основа, функциональный состав и некоторые технологические особенности аппаратного и программного обеспечения информационной системы оперативного контроля параметров электроэнергии в сети тягового электроснабжения.

Ключевые слова: *информационная система оперативного контроля параметров электроэнергии в сети тягового электроснабжения, ток, напряжение, мощность, электроэнергия, измерительный блок, информационно-измерительный комплекс, оптический коммутатор, концентратор сбора данных подстанции, информационно-вычислительный комплекс, сервер данных телеметрии.*

PRINCIPLES OF CONSTRUCTION OF INFORMATION SYSTEM OF MONITORING AND METERING ON THE FEEDERS OF THE CONTACT NETWORK

Chizhma Sergey Nikolaevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr. Sci. Tech., associate professor, chief of the departament «Automatics and control systems», OSTU.

Phone: (3812) 31-05-89.
E-mail: chizhmasn@omgups.ru

Lavruhin Andrey Aleksandrovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., associate professor of the departament «Automatics and control systems», OSTU.
Phone: (3812) 31-05-89.
E-mail: lavruhinaa@omgups.ru

Maliutin Andrey Gennadievach
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., associate professor of the departament «Automatics and control systems», OSTU.
Phone: (3812) 31-05-89.
E-mail: maliutinag@omgups.ru

Okishev Andrey Sergeevich
Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., associate professor of the departament «Automatics and control systems», OSTU.
Phone: (3812) 31-05-89.
E-mail: okishevas@omgups.ru

The article describes the structural scheme, the algorithmic basis, functional composition and some technological characteristics of the hardware and software of information system of operating control parameters of the electric power in the traction power supply network, structural peculiarities of information-measuring complex, the hub characteristics of the data collection substation, type of equipment used in information and computational complex structure of servers for processing and storage, data volumes and characteristics of the necessary communication lines.

Keywords: *information system operational control parameters of electric power network traction power supply, current, voltage, power, electricity, measuring unit, measuring system, optical switch, concentrator substation data collection, information-computing complex, the telemetry server.*

УДК 625.143

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РЕЛЬСОВ, ИМЕЮЩИХ КОРРОЗИОННО-УСТАЛОСТНЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ

Карпущенко Николай Иванович
Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).
630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191.
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Путь и путевое хозяйство», СГУПС.
Тел.: 8 (383) 328-04-18.
E-mail: kni@stu.ru

Быстров Антон Викторович
Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).
630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191.
Преподаватель, инженер научно-исследовательской лаборатории «Путеиспытательная», СГУПС.
E-mail: bystrovanton@ya.ru

Труханов Павел Станиславович
Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).
630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191.
Аспирант, инженер научно-исследовательской лаборатории «Путеиспытательная», СГУПС.
E-mail: gaiwer123@mail.ru

Представлены данные о коррозионно-усталостных повреждениях подошвы рельсов (дефект 69) на железных дорогах России. Установлено, что причиной изломов рельсов по дефекту 69 является коррозионная усталость, возникающая в результате увлажнения по-

дошвы в зоне контакта с подрельсовой прокладкой в сочетании с высоким уровнем растягивающих напряжений в подошве рельса. Анализ статистических данных об отказах рельсов по дефекту 69 в Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры показал, что интенсивность отказов растет до наработки тоннажа 800 млн т брутто и носит усталостный характер. На участках пути со сложным планом и профилем интенсивность отказов в три – четыре раза выше, чем на спокойном Транссибирском ходу. Показаны итоги анализа данных и предложены меры по повышению надежности рельсовых плетей, имеющих склонность к образованию дефектов по коду 69.

Ключевые слова: *рельсы, коррозионная усталость, усталостные трещины, дефект 69, осевые нагрузки.*

ENSURING RELIABILITY OF THE RAILS HAVING CORROSION FATIGUE DAMAGES

Karpuschenko Nikolai Ivanovich
Siberian State Transport University (SSTU).
191, Dusi Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, Russia.
Dr. Sci. Tech., professor, head of the department «Track and Track Facilities», SSTU.
Phone: 8 (383) 328-04-18.
E-mail: kni@stu.ru

Bystrov Anton Viktorovich
Siberian State Transport University (SSTU).
191, Dusi Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, Russia.
Tutor, engineer of the research laboratory «Track Testing», SSTU.
E-mail: bystrovanton@ya.ru

Trukhanov Pavel Stanislavovich
Siberian State Transport University (SSTU).
191, Dusi Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, Russia.
Post-graduate student, engineer of the research laboratory «Track Testing», SSTU.
E-mail: gaiwer123@mail.ru

Data on corrosion fatigue damages of a sole of rails (defect 69) on the railroads of Russia are submitted. It is established that 69 the corrosion fatigue resulting from moistening of a sole in a zone of contact with subrail laying in combination with the high level of the stretching tension in a rail sole is the reason of breaks of rails on defect. The analysis of statistical data on refusals of rails on defect 69 in the West Siberian management of infrastructure showed that failure rate grows to an operating time of the tonnage of 800 million t gross and has fatigue character. On sites of a way with a complicated plan and a profile failure rate is 3 – 4 times higher, than on quiet Trans-Siberian to the course. Results of the analysis of data are shown and measures for increase of reliability of the rail lashes having tendency to formation of defects on a code 69 are offered.

Keywords: *rails, corrosion fatigue, fatigue cracks, defect 69, axial loadings.*

УДК 625.144.5: 625.173.2/5

МОДЕЛИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВЫПРАВОЧНО-ПОДБИВОЧНО-РИХТОВОЧНЫХ МАШИН ВПР-02 И ВПРС-02

Базилевич Светлана Викторовна
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Менеджмент, маркетинг и коммерция», ОмГУПС.
E-mail: bcv65@mail.ru

Зайцев Александр Васильевич
Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).
630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191.
Старший преподаватель кафедры «Подъемно-транспортные, путевые, строительные и дорожные машины», СГУПС.
E-mail: zaitsev.zaw@yandex.ru

Кузнецов Сергей Михайлович
Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).
630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология, организация и экономика строительства», СГУПС.
E-mail: ksm56@yandex.ru

Приводится алгоритм построения доверительного интервала модели оценки надежности работы выправочно-подбивочно-рихтовочных машин. В основу оценки надежности транспортно-технологического процесса положено понятие надежности, как вероятности достижения выправочно-подбивочно-рихтовочных машин конечной цели при производстве путевых работ. Одними из основных факторов надежности работы путевых машин являются коэффициент использования их по времени и коэффициент готовности к работе. В методических указаниях приводятся устаревшие данные по коэффициентам использования машин в течение рабочего времени, которые требуют обновления, так как машины постоянно совершенствуются. По результатам натурных испытаний выправочно-подбивочно-рихтовочных машин была создана база данных значений коэффициентов готовности и коэффициентов использования по времени. В базу данных заносились значения, прошедшие два этапа проверки: логический и математический.

В статье рассмотрен пример построения доверительного интервала значений коэффициента использования по времени в зависимости от комплексного показателя надежности коэффициента готовности. Для создания модели формировалась выборка значений из базы данных. После формирования выборки в соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011 (Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений) проверялась ее принадлежность закону нормального распределения с помощью критерия согласия Пирсона. Далее строились модель коэффициента использования по времени в зависимости от коэффициента готовности выправочно-подбивочно-рихтовочных машин (уравнение регрессии) и доверительный интервал модели.

Предложенные модели работы выправочно-подбивочно-рихтовочных машин позволяют прогнозировать основные комплексные организационно-технологические показатели работы конкретной машины еще на стадии проектирования технологических процессов путевых работ. Этот метод является универсальным, и его можно использовать для оценки технической надежности любых машинных систем, комплектов и отдельных машин.

Ключевые слова: *модель оценки надежности, оценка надежности работы выправочно-подбивочно-рихтовочных машин, путевые работы, коэффициент использования путевых машин по времени, коэффициент готовности путевых машин к работе, критерий согласия Пирсона, уравнение регрессии, доверительный интервал модели, проектирование технологических процессов путевых работ.*

MODEL PERFORMANCE LINER-TAMPING-STRAIGHTENING MACHINES VPR-02 AND VPRS-02

Bazilevich Svetlana Viktorovna
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., associate professor of the departament «Management, marketing and commerce», OSTU.
E-mail: bcv65@mail.ru

Zaytsev Alexander Vasilievich
Siberian State Transport University (SSTU).
191, Dusi Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, Russia.
Engineer master, senior lecturer of the departament «Lifting-transport, travel, construction and road machines», STU.
E-mail: zaitsev.zaw@yandex.ru

Kuznetsov Sergey Mikhailovich
Siberian State Transport University (SSTU).
191, Dusi Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, Russia.
Ph. D., associate professor of the departament «Technology, organization and economics of construction», STU.
E-mail: ksm56@yandex.ru

The algorithm of constructing the confidence interval of the model estimating the reliability of liner-tamping-straightening machines. The basis for assessing the reliability of transport-technological process initiated the concept of reliability, as the probability of reaching a liner-tamping-straightening machines ultimate goal in the manufacture of track work. One of the main factors reliability of track machines is the utilization of their time and availability to work. The guidelines are outdated factor data used during the working time that must be updated, as the machines are constantly being improved. According to the results of field testing of the liner-tamping-straightening machines was established database of values of the coefficients of availability and utilization over time. The data base values were recorded, the last two stages of verification: logical and mathematical.

In the article the example of constructing a confidence interval values of the coefficient of use of time depending on the complex index of reliability: availability. To create the model formed the

sample values from the database. After sampling in accordance with GOST R 8.736-2011 State system for ensuring the uniformity of measurements. The direct measurement repeated. Methods of processing the results of measurements were tested for their adherence to the law of normal distribution using the goodness of fit Pearson. Then built a model of the utilization of time depending on the availability liner-tamping-straightening machines (regression equation) and the confidence interval of the model.

The proposed model works liner-tamping-straightening machines allow us to predict the main complex organizational and technological performance of a specific machine at the design stage of technological processes of track work. This method is versatile and can be used to assess the technical reliability of any machine systems, complete sets and individual cars.

Keywords: *model reliability assessment, assessment of the reliability of liner-tamping-straightening machines, travel work, the rate of use of track machines over time, the availability of track machines to work, the goodness of fit Pearson, regression equation, confidence interval model, the design process of track work.*

УДК 681.5+625.76.08

ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТЫ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ КРАНОВ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО ПОЕЗДА

Тихонов Юрий Борисович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-18-72.
E-mail: tichonov_ub@mail.ru

В статье проведен анализ безопасности работ при подъеме одного груза двумя грузоподъемными кранами. Рассмотрен способ повышения безопасности проводимых работ с использованием радиоканала для передачи и приема информации о состоянии кранового оборудования, сигналов управления крановыми операциями системами безопасности кранов от крановщиков и стропальщиков, речевого обмена информацией между крановщиками и стропальщиками.

Ключевые слова: *грузоподъемные краны, модуль, приборы безопасности, груз, система безопасности.*

IMPROVING THE SAFETY OF OPERATION OF CRANES AND RECOVERY TRAIN

Tikhonov Yury Borisovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., associate professor of the department «Automatics and telemechanics», OSTU.
Phone: (3812) 31-18-72.
E-mail: tichonov_ub@mail.ru

In the article the analysis of safety when lifting one of the two cargo lifting cranes. Considered a method of increasing safety of works with the use of a radio channel for transmission and reception of information about the condition of the crane equipment, signals for controlling crane operations safety systems for cranes from crane operators and slingers, verbal exchange of information between the crane operators and slingers.

Keywords: *cranes, module, safety equipment, cargo, security system.*

Уважаемые коллеги!

Редакция научно-технического журнала «Известия Транссиба» приглашает Вас публиковать результаты научных исследований по тематическим направлениям журнала:

– подвижной состав железных дорог;
– транспортная энергетика;
– информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации;
– путь и искусственные сооружения;
– управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов;
– организация производства на транспорте;

Материалы просим высылать ответственному секретарю редакционной коллегии журнала Захаренко Елене Игоревне по электронной почте: izvestia_transsiba@mail.ru

Правила представления рукописей научных статей в научно-технический журнал «Известия Транссиба»

В редакцию журнала представляются:

текст статьи на белой бумаге формата А4 в двух экземплярах, а также в электронном виде (на любом носителе или по e-mail), имя файла определяется по фамилии первого автора: фамилия.doc;

название статьи, аннотация, ключевые слова (5 – 10 слов), название тематического раздела журнала, в который представляется статья (в отдельном файле – на русском и английском языках);

сведения об авторах в отдельном файле на русском и английском языках (фамилия, имя, отчество, ученая степень и звание, место работы с указанием почтового адреса, должность, контактные телефоны, e-mail для обратной связи);

один экземпляр текста статьи должен быть подписан всеми авторами на оборотной стороне каждой страницы.

Требования к аннотации статьи:

аннотация должна быть кратким точным изложением содержания статьи, включающим в себя основные фактические сведения и выводы описываемой работы;

текст аннотации должен быть лаконичным и четким, свободным от второстепенной информации, должен отличаться убедительностью формулировок;

сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте аннотации;

объем аннотации на русском и английском языках должен содержать от 200 до 250 слов;

аннотация на русском и английском языках должна включать следующие аспекты содержания статьи: предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.

дополнительно англоязычная аннотация должна быть оригинальной (не быть калькой русскоязычной аннотации); содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье); англоязычной (написанной качественным английским языком); необходимо использовать активный, а не пассивный залог.

Требования к рукописи статьи:

рукопись статьи должна содержать УДК (в левом верхнем углу, обычный, 12 пт), инициалы и фамилию (по центру, 11 пт), название статьи (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт);

текст статьи должен быть набран в редакторе Word, размер страницы: формат А4 (210 × 297 мм);

размер полей: 20 мм (все четыре поля), размер и тип шрифта основного текста: Times New Roman, 12 пт;

размеры символов в формулах (Equation): обычный – 12 пт, крупный индекс – 7, мелкий – 5, крупный символ – 15, мелкий – 12 пт;

буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавитов, математические символы такие, например, как cos, sin, max, min, – прямым шрифтом;

текст в таблицах, подрисуночные подписи и названия таблиц набираются шрифтом Times New Roman, 10 пт;

межстрочный интервал одинарный, абзацный отступ – 0,75 см;

каждый рисунок дополнительно должен быть представлен в оригинальном файле (формат JPEG или TIFF, разрешение – не ниже 300 пикс/дюйм);

рисунки, выполненные в редакторе Word, должны быть вставлены как объект;

после текста статьи следует список литературы на русском языке и в романском алфавите (латинице) с переводом названий литературных источников на английский язык;

ссылки на литературу в тексте статьи указываются в квадратных скобках, список литературы имеет заголовок *Список литературы* (не более 10 наименований), библиографическое описание источников на русском языке оформляется по требованиям ГОСТ 7.1-2003;

в романском алфавите (латинице) список литературы имеет заголовок *References* и оформляется по следующему образцу: Author1 A.A., Author2 A.A., Author3 A.A., Author4 A.A., Author5 A.A. Title of article [Nazvanie stat'i v romanskom alfavite]. Nazvanie zhurnala v romanskom alfavite – *Title of Journal*, 2014, no. 1, pp. 54 – 57.

Рукописи статей, опубликованных ранее или переданных в другие издания, не принимаются.

Число соавторов не должно превышать трех человек. Рекомендуемый объем статьи – не менее пяти и не более 10 страниц. В ином случае вопрос по объему статьи необходимо согласовать с редакцией журнала. Иллюстрации, схемы, таблицы, включаемые в текст статьи, учитываются в общем объеме текста.

Авторы должны избегать повторения одних и тех же данных в таблицах, на графиках и в тексте статьи.

В случае представления двух или более статей одновременно необходимо указывать желательную очередность их публикации.

В случае возвращения статьи автору для устранения замечаний или для ее сокращения датой представления считается день получения редакцией журнала окончательного текста.

Принятые к публикации рукописи статей не возвращаются авторам.

Материалы, оформленные не в соответствии с указанными выше требованиями, не принимаются к публикации и не возвращаются.

Редакционный совет оставляет за собой право литературного редактирования статьи без согласования с авторами.

Научное издание

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

№ 3 (23) 2015

Научно-технический журнал «Известия Транссиба» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 3 июня 2009 г. Свидетельство о регистрации – ПИ № ФС77-36469.

Номер ISSN – 2220-4245.

Подписной индекс в общероссийском каталоге НТИ Агентства «Роспечать» – 66087.

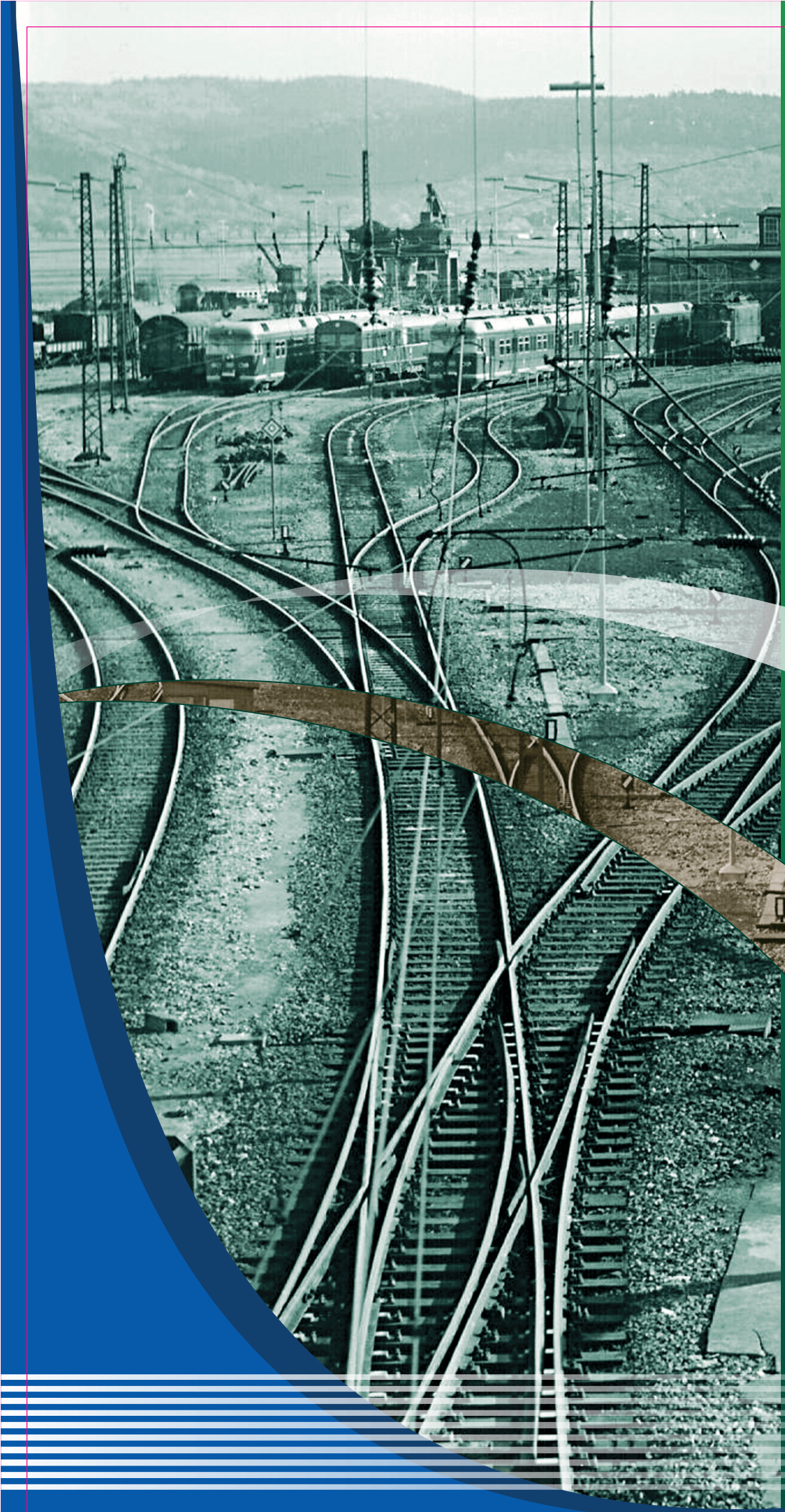
Издание обрабатывается в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Издание выходит с периодичностью 4 номера в год (каждый квартал).

Редактор – Майорова Н. А.
Компьютерная верстка – Захаренко Е. И.

Адрес редакции (издательства): 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35;
тел.: (3812) 31-05-54; e-mail: izvestia_transsiba@mail.ru

Подписано в печать 20.09.2015.
Тираж 500 экз.

Отпечатано в ГП «Омская областная типография»: 644070, г. Омск, ул. Декабристов, 37.
Дата выпуска: 27.09.2015.